

Нежурич В.И.

Национальная металлургическая академия Украины

Николенко А.В.

Национальная металлургическая академия Украины

Куваев В.Ю.

Национальная металлургическая академия Украины

Иващенко В.П.

Национальная металлургическая академия Украины

СТРУКТУРА РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ШАХТНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ИССЛЕДОВАННЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СОДЕРЖИМОГО ВАННЫ

Зазвичай при введенні в експлуатацію нових шахтних рудовідновлювальних електропечей обмежуються детальним дослідженням їх електричних, теплових і деяких інших технологічних режимів роботи, залишаючи осторонь вивчення їх газодинамічних режимів, які відіграють важливу роль при оптимізації техніко-економічних показників (ТЕП) роботи електропічного агрегату. У роботі проаналізовано результати наведених у науковій літературі досліджень газодинамічних особливостей роботи діючих електропечей для виплавки феросиліцію, ферохрому, сплавів марганцю, які дозволили сформулювати структурні моделі робочого простору рудовідновлювальних електропечей. Метою роботи є уточнення раніше запропонованої структурної моделі за рахунок дослідження газодинамічних особливостей діючої прямокутної шахтної електропечі для виплавки феросилікомарганцю. Результати досліджень наведені для поперечного перерізу ванни електропечі, який охоплює частину робочого простору від електроду до футеровки та від поверхні колошника до поду печі. Для цього перерізу наведені залежності тиску від відстані «електрод-футеровка» (l) для трьох значень заглиблення (h) вимірювальних зондів, вмісту пилу в пічному газі від потужності на електроді та вмісту шихтових матеріалів фракції «-5» мм для двох значень заглиблення, залежності вмісту монооксиду та двооксиду вуглецю для двох горизонтів шихтових матеріалів від відстані (l). Одержані результати дозволили уточнити розташування зони активного сходу шихтових матеріалів у печі, а також за спільного аналізу з полем температур виділити в об'ємі робочого простору електропечі додаткові характерні зони агрегатного стану шихтових матеріалів при виплаві феросилікомарганцю, що дозволило розширити перелік показників, які аналізуються при оптимізації ТЕП технологічного процесу виплавки сплаву. Результати досліджень доцільно використовувати при моделюванні на стадії проектування та при оптимізації ТЕП на стадії освоєння проектної потужності електропечей для виплавки феросилікомарганцю.

Ключові слова: феросилікомарганець, рудовідновлювальна шахтна прямокутна електропіч, режим роботи, робочий простір, електрод, шихтові матеріали, колошник, футеровка, газодинаміка.

Постановка проблеми. Исследованиям газодинамических свойств содержимого ванн шахтных ферросплавных электропечей посвящено сравнительно небольшое количество работ, тогда как экспериментально полученная информация о газодинамическом режиме рабочего пространства, особенно в период освоения проектной мощности или, например, при освоении компонентов шихт из новых месторождений, позволяет

более обоснованно проводить мероприятия по оптимизации технико-экономических показателей (ТЭП) технологического процесса выплавки. Оптимизация газодинамического режима работы электропечи, тесным образом связанного с электрическим (степень печного трансформатора, глубина погружения электрода и т. д.) и шихтовым (гранулометрический состав и т. д.) режимами выплавки сплава, является непременным

условием оптимизации ТЭП процесса в целом. Имеющаяся в настоящее время информация о газодинамических особенностях технологических процессов при производстве ферросплавов в шахтных электропечах носит локальный, ограниченный, несистемный характер. Объясняется это разнообразием технологических особенностей процессов получения различных марок ферросплавов, а также труднодоступностью и опасностью объектов исследования.

Большое внимание изучению газодинамических характеристик уделяется в доменном процессе [1]. Этот процесс характеризуется соответствующим технологии и устойчивым составом шихтовых материалов, что предопределило значительный прогресс в области изучения газодинамических характеристик именно в доменном производстве, а также справедливость результатов исследований для печей всех существующих объемов.

Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал по газораспределению в доменных печах позволил разработать адекватную математическую модель процесса [2] и установить, что изменение скорости газов в сечении печи описывается сложной функцией, зависящей от многих факторов плавки, и в настоящее время не поддается надежному прямому измерению, а оценка газораспределения по содержанию двуокиси углерода и по распределению температур, к сожалению, является весьма условной.

Что же касается исследований газовых режимов ферросплавных процессов, то здесь можно отметить ряд работ по некоторым видам сплавов, обладающих присущими только им технологическими особенностями. Так, в работе [3] авторы отметили, что в слое шихты ферросилициевых электропечей протекают следующие процессы: 1) теплообмен между горячими газами и шихтой, 2) взаимодействия между парами, образующимися в результате протекания первичных процессов, и углеродом или полупродуктами, 3) твердофазные процессы, 4) конденсация паров, не успевших вступить во взаимодействие, 5) фильтрация пыли в связи с уменьшением температуры отходящих газов, а значит, и их скорости движения, 6) подсос воздуха в глубинные слои шихты и сгорание углерода. Протеканию технологических процессов благоприятствует удовлетворительная газопроницаемость шихты и оптимальная скорость ее схода. Для более полного отбора тепла и конденсации паров промежуточных веществ необходимо создать условия для равномерного выхода газов из печи по всей поверхности колошника. Высокое содержание пыли в шихте

и расслоение ее компонентов объясняют неровный ход работы печи, перегрев газов, их прорыв, выброс шихты и горячего продукта.

Достаточно полно вопрос исследования газового режима закрытой печи рассмотрен в [4], где проанализирован противоток шихты и газов при выплавке углеродистого феррохрома по изменению давления и состава газов по глубине ванны печи. Автор подтвердил тот факт, что изменение состава и количества газов непосредственно отражает ход процесса в печи. Закономерное перемещение электродов в течение плавки не оказывает заметного влияния на давление газов на каждом из горизонтов ванны. Это объясняется тем, что, например, по мере подъема зон интенсивного газообразования одновременно изменяется толщина фильтрующего слоя шихты. Отмечено, что этот факт может быть использован на практике применением режима загрузки шихты, обеспечивающего постепенное повышение уровня колошника в цикле плавки по мере накопления шлака, а это позволит более полно использовать тепло газового потока, не ухудшая газопроницаемости шихтового слоя и хода самой печи. В [5] установлено, что состав колошникового газа, его температура и запыленность находятся в прямой зависимости от активной мощности электропечи, полезного фазного напряжения и заглибления электрода в рабочее пространство ванны, т.е. характер газопылевого режима работы закрытой электропечи определяется ее электрическим режимом и геометрией ванны.

Автором [6] предложен обобщенный метод расчета параметров печи, пригодный для проектирования, исходя из учета распределения теплового, температурного, электрического полей трехэлектродной печи. Отмечается, что поток газа описывается формулой аналогичной скорости схода шихты. Состав и температура газов подсводового пространства зависят от конкретного технологического процесса, от способа загрузки шихты на колошник, причем давление газа пропорционально квадрату его скорости и абсолютной температуре. Повышение давления под сводом свидетельствует о развитии в ванне нежелательных процессов, об увеличении потерь тепла и материалов. Наиболее выгодный газовый режим в подсводовом пространстве характеризуется уровнем давления, возможно более близким к давлению окружающего воздуха.

Для расчета параметров проектируемых и оптимизации режимов действующих ферросплавных печей перспективным является метод комплексного моделирования процессов в них

[7; 8]. Однако многообразие и сложность процессов в ваннах промышленных печей, трудности при получении информации о структуре рабочего пространства и механизмах процессов не позволяют пока создать в достаточной степени адекватную модель и связать ее с ТЭП работы печи. Достоверность результатов моделирования зависит от того, насколько точно в модели отражена структура рабочего пространства ванны [9].

Необходимо отметить, что строение рабочего пространства печей РПЗ-48(63) при выплавке ферросиликомарганца изучалось многими исследователями. Так, в [9; 10] с помощью специального зондирования были получены структурные схемы рабочего пространства в соответствии с температурой и агрегатным состоянием шихты. В [11] строение рабочего пространства уточняется результатами измерения скорости схода шихтовых материалов по площади колошника и определением зон активного схода шихты по глубине ванны.

Анализ материалов приведенных, а также ряда других работ, посвященных исследованию рабочих режимов печей, выплавляющих ферросиликомарганец, показывает, что результаты исследований не увязывались в достаточной мере с газодинамическими показателями технологического режима.

Постановка задания. Основываясь на вышеизложенном, результаты проводимых нами экспериментальных исследований газодинамических характеристик приэлектродного объема действующей печи предполагалось использовать для дополнения и уточнения экспериментально обоснованной структуры рабочего пространства прямоугольной электропечи, выплавляющей ферросиликомарганец в диапазоне рабочих мощностей, учет которых позволит, на наш взгляд, улучшить показатели ее работы, а также может быть полезным при моделировании.

Изложение основных результатов исследования. Нами проводились экспериментальные исследования особенностей газодинамики содержимого ванны действующей электропечи РПЗ-48, выплавляющей товарный ферросиликомарганец, результаты которых изложены в [12]. Для уточнения структуры рабочего пространства прямоугольной печи была проведена серия инструментальных исследований распределения давлений, состава, запыленности газов, позволяющая определить особенности газодинамики не только приэлектродной зоны, но и всего объема ванны печи с помощью известных методов исследований. Измерения проводились в слоях

шихты объема ванны через загрузочные воронки и взрывные клапаны у электродов в диапазоне рабочих мощностей печных трансформаторов. Получены закономерности распределения газодинамических характеристик в приэлектродных зонах [12] и других характерных зонах ванны печи. Для анализа процессов газодинамики было выбрано сечение рабочего пространства ванны печи, проходящее через оси взрывного клапана и электрода, ограниченное соответственно боковой поверхностью электрода и футеровкой ванны, а также колошником печи и подом ванны. Анализируемое сечение рабочего пространства ванны представлено на рис. 1, где в дальнейшем выполнялось уточнение общепринятой структуры ванны электропечи, выплавляющей ферросиликомарганец. За расстояние l принято расстояние от боковой поверхности электрода до футеровки (m), a – ширина зоны активного схода шихтовых материалов (m). Точкой ввода измерительных зондов считалась точка пересечения оси взрывного клапана и линии, проходящей по его поверхности. Следовательно, глубиной измерения h считается расстояние по вертикали от точки ввода до точки измерения параметра. Давление печных газов определялось в паскалях, запыленность газа – в граммах на норм. куб. метр, содержания окиси и двуокиси углерода в печных газах – в процентах. Изменение давления в выбранном сечении рабочего пространства выполнялось при работе печи на активной мощности 50 МВт, мощность на данном электроде составляла 7,5 МВт, реактивная мощность печи составляла 34 Мвар, напряжение электрода – 200 В, ток – 100 кА, сопротивление под электродом – 0,1 мОм. Фракционный состав шихтовых материалов был следующим: фракция «+10» мм – 56,7%, «+5» мм – 16,4%, «-5» мм – 26,9 %. Для глубины $h = 2$ м закономерность изменения давления выглядит следующим образом:

$$p_1 = - 24,545 l^2 + 353,36 l - 229,09 \text{ (Па)},$$

для глубины $h = 2,5$ м – $p_2 = - 164,545 l^2 + 989,36 l - 709,09 \text{ (Па)}$,

для глубины $h = 3$ м – $p_3 = - 221,818 l^2 + 1378,545 l - 943,63 \text{ (Па)}$ (в направлении от футеровки к боковой поверхности электрода). Давление у поверхности футеровки и поверхности электрода отличается на порядок, подтверждая вывод [12] о преимущественном выходе печных газов из подэлектродной полости через зону активного схода шихты в подсводовое пространство печи.

Запыленность печного газа исследовалась в зависимости от мощности на электроде и от содержания в шихте фракции «-5» мм. Зависимость

запыленности от мощности устанавливалась для двух значений заглубления h – 1,5 и 2 м. Электрический режим работы печи характеризовался изменением мощности на электроде от 8 МВт до 6 МВт. Для глубины $h = 1,5$ м зависимость запыленности от активной мощности на электроде имеет вид:

$$З = - 0,0071 P^2 + 0,518 P - 7,36,$$

где $З$ – запыленность печного газа, г/нм³, P – активная мощность на электроде, МВт. Соответственно, для глубины $h = 2$ м получили аналогичную зависимость:

$$З = - 0,151P^2 + 1,207 P - 21,81.$$

Из полученных зависимостей видно, что запыленность печного газа увеличивается по мере заглубления в рабочее пространство печи почти в 1,12 раза, а при уменьшении мощности на электроде с 8 до 6 МВт – почти в 2,8 раза, что согласуется с результатами известных [4] исследований. Изменение запыленности печного газа в выбранном сечении рабочего пространства в зависимости от содержания в шихте фракции «-5» мм выполнялось при работе печи на активной мощности 49 МВт, мощность на данном электроде составляла 7,2 МВт, реактивная мощность печи составляла 34 Мвар, напряжение электрода – 180 В, ток – 100 кА, сопротивление под электродом – 0,8 мОм. Зависимость запыленности печного газа от содержания в шихте фракции «-5» мм описывается следующими соотношениями:

$$\text{для глубины } h = 1,5 \text{ м} - З = - 0,0018 \Phi^2 + 0,179\Phi - 2,165,$$

$$\text{для } h = 2 \text{ м} - З = - 0,0016 \Phi^2 + 0,1803 \Phi - 2,2275,$$

где $З$ – запыленность, г/нм³, Φ – содержание в шихте фракции «-5» мм, %. Как следует из полученных зависимостей, запыленность растет с глубиной и повышением содержания в шихте мелкой фракции. Снижение содержания фракции « - 5» мм в шихте приводит к снижению запыленности печного газа.

Зависимость распределения основных компонентов печных газов CO и CO_2 от расстояния l изучалась для двух значений заглубления зонда h . Для заглубления $h = 1,5$ м распределение компонентов описывалось следующими соотношениями:

$$CO, \% = 15,4545 P - 37,036 l + 27,909;$$

$$CO_2, \% = 3,2727 P - 20,98 l + 42,545 ,$$

а для заглубления $h = 2,25$ м –

$$CO, \% = 11 P - 16,1 l + 18,1;$$

$$CO_2, \% = 5,545 P - 35,26 l + 67,1.$$

Из полученных зависимостей видно, что содержание CO растет к поверхности электрода (в зоне активного схода шихтовых материалов), при этом содержание CO_2 снижается, причина чего изложена в [12], причем полученные на основании этих зависимостей кривые изменения CO и CO_2 попарно пересекаются в точке, которая для каждого значения h лежит на границе зоны активного схода шихты шириной a с остальной частью шихтовых материалов рабочего пространства ванны печи. Следовательно, обобщая полученные и имеющиеся результаты по распределению температур, давления, запыленности и состава

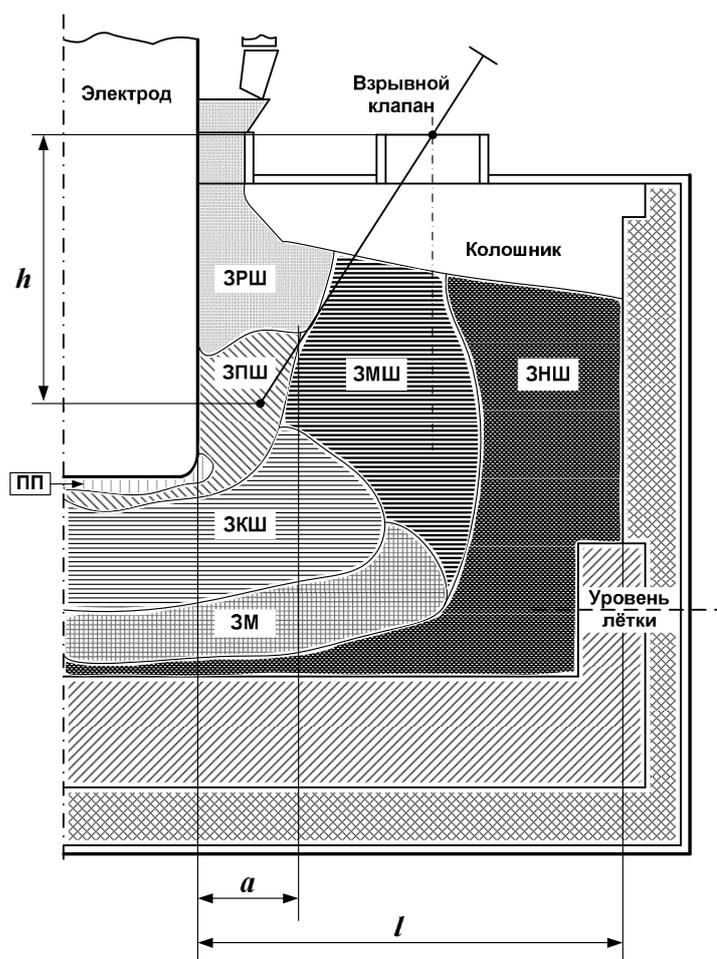


Рис. 1. Структура рабочего пространства прямоугольной электродпечи, выплавляющей ферросиликомарганец:
 l – расстояние от боковой поверхности электрода до футеровки,
 a – ширина зоны активного схода шихтовых материалов, h – расстояние по вертикали от точки ввода зонда до точки измерения параметра

газа в объеме рабочего пространства ванны прямоугольной электропечи для получения ферросиликомарганца, удалось уточнить общепринятую структуру содержимого ванны такой шахтной электропечи (рис. 1). В объеме ванны печи можно выделить следующие зоны: К – колошник печи с углом естественного откоса шихтовых материалов, ЗРШ – зона рыхлой шихты, подаваемой из трубопроводов на колошник, ЗПШ – зона первичного шлака, ЗМШ – зона малоподвижной шихты, скорость схода которой на порядок меньше скорости схода рыхлой шихты, ЗНШ – зона неподвижной шихты, ПП – подэлектродная полость, ЗКШ – зона конечного шлака, ЗМ – зона металла. В результате глубокого зондирования рабочего пространства через взрывной клапан у электрода выявить наличие явно выраженного коксового слоя не удалось.

Полученные результаты исследований позволяют однозначно убедиться в том, что источником повышенного давления в печи является ПП, откуда газ поступает в подсводовое пространство

печи вдоль поверхности электрода через зоны ЗПШ и ЗРШ, а также по границе с зоной ЗМШ. Постоянно присутствующая в воронках шихта играет роль своеобразного «подвижного затвора», поэтому газ поступает в подэлектродное пространство у подошвы приэлектродного конуса шихты. Указанные зоны обладают хорошими фильтрующими свойствами, препятствуют потерям марганца и обеспечивают дополнительный подогрев шихты, поступающей в реакционную зону печи.

Выводы. Выполнены исследования распределения давления печных газов, их запыленности, содержания CO и CO_2 в них в сечении рабочего пространства прямоугольной шахтной электропечи для получения ферросиликомарганца.

В результате проведенных исследований уточнена модель структуры рабочего пространства прямоугольной ферросиликомарганцевой электропечи, которая может быть полезна для анализа процессов, протекающих в ванне печи.

Список литературы:

1. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса. Москва : Металлургия, 1990. 216 с.
2. Лялюк В.П. Моделирование процессов доменной плавки. Москва : Изд-во Инфра-Инженерия, 2020. 160 с.
3. Николаев Э.В., Врублевский О.П. Газовый режим закрытых ферросилициевых печей мощностью 33 МВА. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1973. № 11. С. 1011–1012.
4. Арбузов В.И. Характеристика газового режима закрытой электропечи. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1972. № 10. С. 915–917.
5. Розенберг В.Л., Вальдберг А.Р. Влияние электрических режимов и геометрии закрытых ферросплавных печей на газопылевой выброс. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1966. № 11. С. 12–14.
6. Tunso E.A. Computer analysis of temperature distribution and energy consumption in a Submerged arc furnace. *Acta univ. Paduana*. 1980. № 17. P. 42.
7. Миронов Ю.Н., Козлов А.И., Парамонова М.Г. *Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики*. 2001. № 2. С. 82–91.
8. Machulec B. Comparison the physico-chemical model of ferrosilicon smelting process with results observations of the process under the industrial conditions. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016. Vol. 61. № 1. P. 265–270.
9. Определение параметров и характеристик элементов схем замещения ванн рудовосстановительных электропечей / Кузьменко С.Н., Николенко А.В., Ольшанский В.И. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 2005. № 2. С. 35–38.
10. Жердев И.Т., Яськов Е.С. Строение ванны печи РПЗ-48. *Электротехническая промышленность. Серия: Электротермия*. 1974. № 4. С. 10–11.
11. Исследование скорости и характера схода шихтовых материалов при выплавке марганцевых сплавов в закрытых руднотермических электропечах / Карманов Э.С., Кучер И.Г., Нежурин В.И. *Сталь. Ежемесячный международный научно-технический и производственный журнал*. 1991. № 7. С. 37–40.
12. Исследование особенностей газодинамики рабочего пространства ванны действующей электропечи РПЗ-48(63) при выплавке ферросиликомарганца / Нежурин В.И., Николенко А.В., Куваев В.Ю. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія Технічні науки*. 2020. Т. 31 (70). Ч. 2. № 2. С. 9–16.

Nezhurin V.I., Nikolenko A.V., Kuvaiev V.Yu., Ivashenko V.P. THE STRUCTURE OF THE WORKING SPACE OF A RECTANGULAR MINE ELECTRIC FURNACE FOR SMELTING FERROSILICON MANGANESE, WITH CONSIDERING THE EXPERIMENTALLY STUDIED GAS-DYNAMIC FEATURES OF THE CONTENTS OF THE BATH

Typically, at the commissioning of new mine Ore-reducing electric furnaces are limited to detailed research of their electrical, thermal and technological operating modes, leaving aside the study of their gas-dynamic modes, which play an important role in optimizing the feasibility indicators of the electric furnace unit as a whole. The paper analyzes the results of research in the scientific literature of gas-dynamic features of existing electric furnaces for smelting ferrosilicon, ferrochrome, manganese alloys, which allowed formulating a structural model of the working space of the ore-reducing electric furnace. The purpose of the presented work is to clarify the previously proposed structural model by studying the gas-dynamic features of the existing rectangular mine electric furnace for ferrosilicon manganese smelting. The results of the research are given for the cross section of the electric furnace bath, which covers the part of the working space from the electrode to the lining and from the furnace top surface to the hearth of the furnace. For this section, the relationships of the pressure change on the distance "electrode-lining" (l) for three values of the depth (h) of the measuring probes, changes in dust content in the furnace gas from the power on the electrode and the content of charge materials fraction "-5" mm for two values of depth, the relationships of the change in the content of carbon monoxide and dioxide for the two horizons of charge materials on the change in the distance (l). The obtained results confirmed the location of the zone of active descent of charge materials in the furnace, allowed, also based on the known temperature distribution, allocating additional zones of the state of charge materials of the mine electric furnace to obtain ferrosilicon manganese, which allowed analyzing the process from another angle. The research results should be used in the design and commissioning of mine ore-reducing electric furnaces for ferrosilicon manganese.

Key words: *ferrosilicon manganese, ore-reducing rectangular mine electric furnace, operating mode, working space, electrode, charge materials, furnace top, lining, gas dynamics.*