

М. И. Гасик /д. т. н./, А. Г. Гриншпунт /д. т. н./
Национальная металлургическая академия
Украины

Создание и развитие теории и технологии производства и эксплуатации непрерывных самообжигающихся электродов рудовосстановительных электропечей

Показано, что вопросы качества электродной массы и надежность работы самообжигающихся электродов являются составной и неотъемной частью научно-технических проблем технологии выплавки электрометаллургической продукции и во многом определяют технико-экономические показатели работы рудовосстановительных электропечей.

Обобщены и проанализированы результаты исследований физико-химических процессов, протекающих при высокотемпературном обжиге электродных масс с добавками попутного сырья электродных заводов. Показано, что температура начала графитации компонентов электродной массы снижается на 150–200 °С. Установлены закономерности распределения температурных зон в самообжигающихся электродах высокоомощных электропечей РКЗ, РПЗ и РКГ при выплавке марганцевых, кремневых и никелевых сплавов. Создана математическая модель расчета тепловых полей круглых и плоских самообжигающихся электродов, применительно к различным типам, конструкциям и мощностям печей, видам выплавляемых сплавов. Программа, написанная на алгоритмическом языке Турбо-Паскаль и СИ++, оформлена в виде автоматизированной системы температурного анализа для ПЭВМ. (Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 14 назв.)

Ключевые слова: рудовосстановительная печь, электродная масса, самообжигающийся электрод, попутное сырье математическая модель, температурные поля электродов.

It is shown that questions of electrode weight quality and reliability of work of self-burning electrodes are the component and integral part of scientific and technical problems of technology of smelting of electrometallurgical products and in many respects determine technical and economic indicators of work of ore-smelting furnace.

Results of researches of physical and chemical processes occurring while high-temperature roasting of electrode masses with additives of passing raw materials of electrode plants are generalized and analyzed. It is shown that temperature of the beginning of components graphitization of electrode mass decreases up 150–200 °C. Distribution regularities of temperature zones in self-burning electrodes of high-power electric furnaces of types RKZ, RPZ and RKG when manganese, silicon and nickel alloys smelting are determined. The mathematical model of calculation of thermal fields of round and flat self-burning electrodes, in relation to various types, designs and capacities of furnaces, types of the melted alloys is created. The program written in algorithmic language of the Turbo Pascal and SI ++ is arranged in the form of automated system of temperature analysis for PC.

Key words: ore-thermal furnace, anode paste, self-burning electrode, passing raw materials, temperature fields of electrodes.

Ферросплавные предприятия Украины выплавляют наиболее крупнотоннажные марганцевые и кремнистые ферросплавы, а также ферроникель, которые по своим качественным показателям обладают высокой конкурентоспособностью на Европейском, Североамериканском и Азиатском рынках металлопродукции. Ферросплавы на заводах Украины получают в высокоомощных рудовосстановительных электропечах (РПЗ-63, РКГ-75, РКЗ-16,5, РКЗ-21, РКЗ-27), оборудованных непрерывными самообжигающимися электродами (НСЭ), особенность которых состоит в том, что, в отличие от прессованных и предварительно обожженных угольных и графитированных электродов, производимых в Украине на ПАО «Укрграфит», они формируются согласно предложенному в 1918 г. норвеж-

ским инженером Содербергом патента из периодически загружаемой углеродной электродной массы в стальном наращиваемом кожухе непосредственно на действующих печах и непрерывно расходуются в ванне печи. Температура электродной массы изменяется от окружающей до температуры электрической дуги на торце рабочего конца НСЭ [1–3].

Задача создания высокоэффективных научно-обоснованных технологий производства ферросплавов в высокоомощных рудовосстановительных электропечах в значительной степени предопределяется разработкой, исследованием и внедрением одного из основных и наиболее ответственных конструктивных элементов печи – непрерывных самообжигающихся электродов, преимуществом которых является

ся дешеви́зна, возможность изготовления электродов практически любых форм и размеров непосредственно на действующих электропечах. Формирование НСЭ является определяющей и неотъемлемой частью процесса электроплавки и в значительной степени определяет электрический и тепловой режим работы печи, ее производительность, удельный расход электроэнергии и другие технико-экономические показатели. В 2013 г. в Украине эксплуатировалась 41 электропечь общей мощностью 1538 МВА, на которых установлено 114 круглых непрерывных самообжигающихся электродов диаметром от 1000 до 2000 мм и 60 электродов прямоугольного сечения 2800×650 и 3000×750 мм.

Проведенный комплекс исследований, выполненный работниками вузов, НИИ и производственных предприятий, позволил впервые в практике ферросплавного производства за относительно короткий срок освоить эксплуатацию крупногабаритных НСЭ высокомо́щных электропечей и достичь их проектной мощности и производительности, что было отмечено Государственными премиями Украины и СССР*.

Теоретические положения, выводы и результаты, полученные исследователями, а также промышленные технологии выплавки ферросплавов, с использованием разработанных рациональных составов и эффективных схем производства электродных масс, а также оптимальных режимов эксплуатации электродов, используются в учебном процессе в высших учебных заведениях Украины, России, Казахстана и Грузии**.

Несмотря на 80-летнюю историю использования НСЭ в ферросплавном производстве Украины, вопросы обеспечения высокой стойкости последних являются весьма актуальными, что обуславливает острую необходимость проведения комплексных исследований процессов, протекающих на всех стадиях производства и эксплуатации. Конечной целью при этом является подбор исходных материалов с высокими физико-механическими и теплофизическими характеристиками, разработка рационального рецептурного и гранулометрического со-

става электродных масс и высокоэффективных ресурсосберегающих технологий их производства, а также выявление оптимальных условий и режимов формирования НСЭ. Успешное решение этой задачи позволяет обеспечить надежную работу электродов и рудовосстановительных электропечей в целом, повышает эффективность технологии выплавки.

Создание высокомо́щных закрытых и герметичных ферросплавных электропечей влечет за собой увеличение размера и веса электродов, ужесточение условий их эксплуатации, что требует использования электродных масс с высоким комплексом физико-механических характеристик. В свою очередь, качественные показатели электродной массы находятся в прямой зависимости от компонентного и гранулометрического состава, вида и режима термической обработки используемых шихтовых материалов, технологических особенностей производства, определяют пластичность массы, склонность к седиментации компонентов, оказывают большое влияние на положение агрегатных зон, а также на основные свойства угольного блока электрода – электропроводность, механическую прочность, термостойкость, допустимую плотность тока, окисляемость и др.

Электродные массы отечественных предприятий, при использовании тройной композиции «термоантрацит – каменноугольный кокс – связующее» имеют наиболее высокие физико-механические и теплофизические характеристики при одинаковом или близком к этому соотношению наполнителей. Оптимальное содержание связующего при этом составляет 20–24 %, а его отклонение в обе стороны нарушает как отдельные характеристики материала, так и его термическую стойкость в целом.

Особенности технологии производства и эксплуатации НСЭ за рубежом по-прежнему остаются важнейшим производственным секретом. В составе масс зарубежные фирмы, как правило, используют антрацит высокотемпературной обработки (>1800 °С). Гранулометрический состав наполнителей характеризуется повышенным содержанием мелких фракций (<0,5 мм). В качестве твердых компонентов частично применяют

*М. И. Гасик, Б. И. Емлин, Д. В. Ильинков и др. «Комплексное использование алюмосиликатов с созданием и внедрением в промышленность эффективных, замкнутых технологических схем производства...». Государственная премия Украинской ССР, 1977 г.

М. И. Гасик, Б. Ф. Величко, А. Г. Гриншпунт и др. «Техническое перевооружение и расширение производства марганцевых ферросплавов с внедрением печей большой мощности». Премия Совета Министров СССР, 1991 г.

М. И. Гасик, С. Г. Грищенко А. В. Коваль и др. «Электрометаллургический марганцевый комплекс Украины: освоение энерго- и ресурсосберегающих технологий производства ферросплавов». Государственная премия Украины, 1998 г.

** Гасик М. И., Лякишев Н. П. Производство ферросплавов: учеб. для вузов. – М: Металлургия, 1991, 714 с.

нефтяной и пековый кокс, а связующее иногда представлено смолопекком с температурой размягчения 45–50 °С. В некоторых рецептах электродных масс, производимых за рубежом, содержание термоантрацита составляет более половины сухой части шихты. Существенное значение зарубежные фирмы придают вязкопластичным характеристикам, оценивая их по коэффициенту пластичности и температуре деформации массы. Механическая прочность на разрыв обожженной до 900 °С электродной массы передовых фирм («ELKEM», Норвегия) находится в пределах 2,0–2,5 МПа. Для оценки упругих свойств фирма («НИПОН-ЭЛЕКТРОД», Япония) определяет модуль и коэффициент термического расширения.

Надежность работы НСЭ, как впервые установлено М. И. Гасиком в середине прошлого столетия в значительной степени определяется формой и положением агрегатных зон, которые, в свою очередь, зависят от физико-химических процессов в ванне печи, плотности тока в электроде конструкции печи (открытые, закрытые, герметичные), качества изготовления кожухов, особенностей конструкции контактного узла и др. Высокопроизводительная работа электропечи осуществима только при обеспечении оптимальных режимов формирования электродов в зависимости от электрических и технологических параметров процесса [1–4].

Следовательно, дальнейшее повышение эффективности выплавки ферросплавов в высокомошных электропечах может быть достигнуто в результате разработки, исследования и внедрения рациональных рецептурных составов и высокоэффективных технологий производства электродных масс, а также обеспечения оптимальных режимов эксплуатации с учетом токовых нагрузок, условий тепловой работы, режима воздушного охлаждения электрода, высокого качества изготовления и наращивания стального кожуха и др.

С целью повышения эксплуатационной стойкости НСЭ предложено использовать в качестве компонента электродных масс попутное сырье электродных заводов – углеродографитокарбидную смесь (УКС), представляющую собой продукт высокотемпературной обработки (1800–2800 °С) кокса и кремнезема (песка) при использовании их в качестве теплоизоляционной засыпки в технологическом процессе производства прессованных графитированных электродов. УКС содержит в основном 50–75 % углерода (в том числе в виде графита), 15–25 % карбида кремния, 5–15 % кремнезема, 5–10 % оксидов железа и алюминия [5–12].

Введение УКС в состав электродной массы обусловлено значительным положительным эффектом графита и карбида кремния на теплопроводность, термостойкость и другие характеристики углеродных композиций. Например, теплопроводность силицированного графита в 4–5 раз выше, чем исходного. Графит является высокоэлектропроводным материалом и значительно повышает электропроводность электродных масс. В тоже время удельное электросопротивление карбида кремния при низких температурах на несколько порядков выше, чем у графита, что обуславливает увеличение выделения тепла при прохождении тока по электроду. Таким образом, при использовании УКС растет количество выделяемого «джоулевого тепла» при высоком значении тепла за счет теплопередачи, что способствует повышению зоны коксования самообжигающихся электродов.

Петрографические исследования показали, что основная масса УКС представлена чешуйчатым графитом в виде пластинок с высокой отражательной способностью и зернами кубического гранецентрированного β -SiC (ГЦК-решетка, $a = 0,43996$ нм). Имеются включения кварца в виде кристаллов обломочной формы с отчетливо выделяющимися образованиями слоистого гексагонального α -SiC по ним, встречаются также включения оксидов железа и алюминия.

Влияние УКС на процессы, протекающие в НСЭ, изучали петрографическим, рентгеноструктурным, микрорентгеноспектральным, масс-спектроскопическими методами на образцах электродной массы, подвергнутых высокотемпературному обжигу до 2800 °С. Как показали результаты масс-спектроскопического исследования, карбид кремния в угольном блоке НСЭ начинает разрушаться при 1900–2000 °С. В парах при этих температурах наряду с атомарным кремнием присутствуют SiC_2 и Si_2C . Снижение температуры начала диссоциации SiC при обжиге электродных масс обусловлено влиянием активной парогазовой фазы и наличием примесей в составе УКС. Процессы разложения, содержащихся в УКС продуктов, приводят к совершенствованию кристаллической структуры углеродных компонентов массы, что подтверждается уменьшением размеров d_{002} и увеличением размеров L_a и L_c .

Микрорентгеноспектральным анализом показано, что одновременно с процессами разложения компонентов УКС имеет место накопление мелкодисперсного углерода, переходящего при температурах выше 2100 °С в кристаллический графит.

Кроме этого, в некоторых областях разложения происходит накопление примесного желе-

за, приводящее, в конечном итоге, к образованию включений ферросилиция, который также оказывает каталитическое действие на графитацию углеродного блока. Положительная роль железа обусловлена также тем, что оно легко разрушает карбиды, способствуя тем самым сдвигу реакции их разложения в сторону более низких температур.

Электродная масса, содержащая УКС, прошла длительные промышленные испытания на электропечах РПЗ-63 и РКГ-75 при выплавке силикомарганца. При этом изотерма коксования НСЭ повысилась на 100–300 мм, что обусловлено увеличением теплопроводности за счет содержащегося в УКС графита и SiC, а также дополнительного тепловыделения при прохождении электрического тока по электроду, сформированному из электродной массы с более высоким УЭС (рис. 1). Использование разработанного состава электродной массы, содержащей УКС, обусловило сокращение горячих простоев за счет уменьшения обрывов электродов, увеличение производительности, снижение удельного расхода электроэнергии и электродной массы, а также улучшение других технико-экономических показателей (табл. 1).

Выполнены исследования по научному обоснованию способа повышения качества электродной массы путем импульсного воздействия. Сформулирована физическая и математическая модели распространения импульсных колебаний в электродной массе [4; 12].

Динамика вязкой среды электродной массы включает систему дифференциальных уравнений, вывод которых основывается на законах со-

хранения массы, импульса энергии, механики сплошных сред. Для несжимаемых сред, плотность которых постоянна ($\rho = \text{const}$), уравнение неразрывности принимает вид:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0,$$

где U, V, W – компоненты вектора скорости в соответствующих осях координат, м/с.

Динамика уплотнения вязкой среды электродной массы в общем случае описывается уравнением Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + DK\bar{U} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}P + \nu \nabla^2 \bar{U},$$

где $DK\bar{U}$ – конвективная составляющая движения; ∇ – оператор Лапласа; P – поверхностные силы давления; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; t – время, с.; $\bar{U} = \{U, V, W\}$ – составляющие компоненты вектора скорости, м/с.

В работе рассмотрена одномерная математическая модель (задача Стокса) и двухмерная (в переменных функциях тока-вихрь).

Если одномерная математическая модель замкнута (неограниченная плоская стенка совершает гармонические колебания), она допускает точное аналитическое решение в следующем виде:

$$\bar{U}(y, t) \frac{U(y, t)}{a} = \exp^{-A} \cos(\omega t - A),$$

где $A = y \cdot \sqrt{\omega / 2\nu}$ – безразмерная пространственная переменная; $\Omega = \exp^{-A}$ – безразмерный фактор затухания.

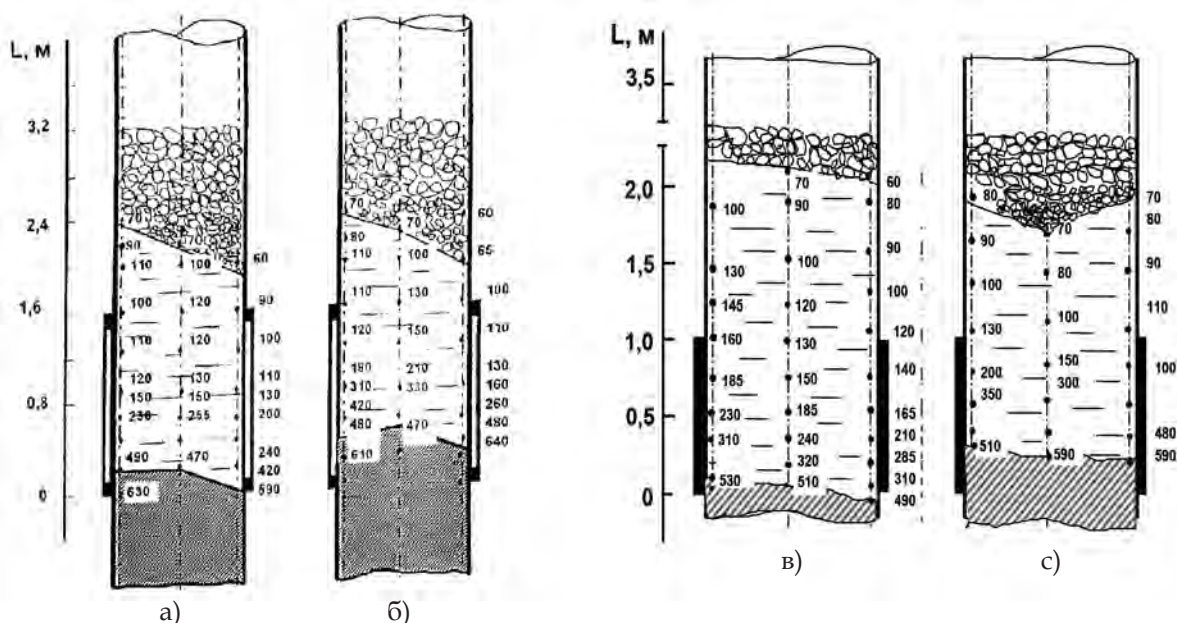


Рис. 1. Тепловые поля электродов размером 750×3000 мм печи РПЗ –63И1 (а, б) и диаметром 2000 мм печи РКГ-75 (в, с) при использовании электродной массы без УКС (а, в) и массы с 30 % УКС (б, с)

Влияние УКС и импульсной обработки на технико-экономический показатель работы печи РПЗ-63 в период внедрения рациональных составов и эффективных технологий производства электродных масс

Наименование	Показатель			
	Масса без УКС	Масса с УКС	Масса без импульсной обработки	Масса с импульсной обработкой
Содержание золы, %	7,2	9,9	7,1	7,1
Содержание летучих веществ, %	14,0	13,9	14,2	14,2
Механическая прочность на разрыв, Мпа	1,71	1,96	1,86	2,24
УЭС, $10^{-6} \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}$	95	94	96	92
Пористость, %	28	26	27	21
Теплопроводность, Вт/м · град	1,97	3,46	2,01	2,62
Среднесуточная мощность, МВт	48,26	50,08	45,6	48,75
Среднесуточная производительность, баз. т	251,2	266,4	205,0	259,7
Удельный расход электрической энергии, кВт ч / баз. т	4610,6	4511,8	4537,0	4502,5
Удельный расход электродной массы, кг/баз. т	24,1	22,9	23,8	22,2
Простои печи, сутки:				
Холодные	5,67	4,51	6,68	2,76
Горячие	4,58	4,2	5,69	2,53
Удельный среднесуточный расход электродов, мм/баз. т сутки	2,73	2,45	2,87	2,28

Анализ распространения колебаний в электродной массе, передающихся плоским источником, свидетельствует, что колебательные движения происходят с убывающей по мере удаления от источника амплитудой $a \cdot \exp^{-A}$. При этом два слоя, находящихся один от другого на расстоянии $L = 2\pi\sqrt{2\nu/\omega}$, совершают колебательные движения в одинаковой фазе. Это расстояние соответствует длине волны колебаний. Для определения скорости распространения импульсных колебаний в электродной массе необходимо конкретизировать значение кинематической вязкости (ν), частоты колебаний источника (ω), координаты y , характеризующей расстояние от источника колебаний, и время t . Разработанные математические модели для одно и двух пространственных измерений, реализованы в виде математических моделей, что позволяет моделировать распространение импульсных колебаний в любой точке плоскости действия источника. Выполнен анализ распространения импульсных колебаний в электродной массе в зависимости от ω , ν и t . Определены и отработаны в промышленных условиях оптимальные режимы импульсных колебаний. Установлено, что механическая прочность электродной массы, подвергнутой импульсному воздействию, после обжига до 900 °С возрастает на 30 %, УЭС снижается на 8–10 %, а пористость уменьшается на 5–7 %. Разработанная ресурсосберегающая технологическая схема производства электродной массы с использованием импульсного воздействия позволила повысить

эксплуатационную стойкость электродов, снизить расход электроэнергии и электродной массы (табл. 1).

Для обеспечения надежной, высокопроизводительной работы электропечей весьма большое значение приобретают сведения о положении агрегатных зон самообжигающихся электродов, которые позволяют своевременно принимать необходимые меры по обеспечению оптимального их уровня и тем самым предотвратить те нежелательные явления, которые приводят к обрывам электродов по скокованной и нескокованной части.

Исследования проводились с использованием одного из надежных, хотя и трудоемкого метода проходных термомпар, впервые разработанного и использованного М. И. Гасиком на ферросплавном заводе и абразивном комбинате г. Запорожья в 1956–1959 гг. Исследованиями эксплуатационных режимов и тепловых полей НСЭ диаметром 2000 мм печи РКГ-75 установлено, что зона коксования электродов при мощности печи 42–45 МВт имела выпуклый характер и находилась практически на уровне нижней кромки контактных щек. Высота столба «жидкой» массы составляла 2,5–3,0 м. Относительно низкое положение зоны коксования требовало строгого соблюдения режимов перепуска электродов (100–200 мм три раза в сутки) и соответственно режимов обдувки в различные периоды времени года, обеспечения высокого качества сварных швов кожуха, равномерности загрузки электродной массы. Высокая надежность

работы электродов печи РКГ-75 обеспечивалась применением кожуха листовой стали толщиной 4 мм. Для повышения зоны коксования была рекомендована, освоена и внедрена качественно более теплопроводная электродная масса, содержащая УКС (табл. 1) [12].

Исследованиями эксплуатационных режимов работы НСЭ диаметром 1200 мм рудовосстановительных электропечей мощностью 21–27 МВ·А ПАО «ЗФЗ» при выплавке ферросилиция марок ФС-25, ФС-45 и ФС-65 установлено, что с увеличением содержания кремния в сплаве зона коксования повышается при постоянстве прочих факторов. При выплавке ФС25 положение зоны коксования близко к оптимальному, ее уровень составляет 300–500 мм выше нижней кромки контактных щек. Наиболее высокий уровень зоны коксования характерен для печей, выплавляющих ФС65, и составляет 700–1100 мм выше низа щек. При выплавке ФС45 положение уровня зоны коксования электрода промежуточное и находится на расстоянии 300–900 мм выше нижней кромки щек.

Разработаны алгоритмы и программный комплекс, позволяющий моделировать тепловые поля НСЭ ферросплавных печей. Программа написана на алгоритмическом языке Турбо-Паскаль и С++ и не требует использования каких-либо специальных системно зависимых средств на всех этапах ее работы [12–14].

Построению математической модели предшествовала формулировка решаемых задач в векторной форме с учетом влияния основных технологических, электрических и конструктивных параметров. В основу модели положено уравнение распространения тепла в электроде с учетом влияния различных факторов. Моделям сопоставлены их численно-аналитические аналоги, обладающие точностными свойствами, аналитической и вычислительной простотой численных решений, хорошей технологичностью передачи информации между внутренними узлами сеточной области и границей, где заданы условия однозначности. Для построения адекватных и экономичных алгоритмов решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих тепловые поля электрода, применялись конечно-разностные методы и метод расщепления по пространственным переменным Писмана – Рекфорда, что позволило свести алгоритм к скалярным прогонам и, тем самым, построить экономичные по количеству арифметических операций схемы.

При построении модели использовали уравнения и граничные условия, адекватно описывающие реальные процессы, протекающие в

каждой температурной зоне НСЭ. Для зон твердой массы – уравнения теплопроводности, а для «жидкой зоны» использовали систему уравнений Навье – Стокса применительно к вязкой несжимающей жидкости. Совокупность базисных задач, возникающих при анализе температурных полей электродов рудовосстановительных печей, допускает объединение уравнений, условий однозначности и их записи в стандартизированной форме:

$$\frac{\partial Y}{\partial \tau} = A(Y)\nabla^2 Y + B(Y)\frac{\partial Y}{\partial y} + C(Y)\frac{\partial Y}{\partial x} + D(Y)\frac{\partial Y}{\partial z} + W,$$

где $Y = T_k$, $k = 1, 2, 3, \dots$ вектора искомых функций температур, упорядоченных по k -м зонам электрода; $A(Y)$, $B(Y)$, $C(Y)$, $D(Y)$ – известные функции, характеризующие физико-механические, теплофизические и электрические свойства электродной массы; W – векторы источников, характеризующих теплопередачу из печи, удельную теплоту коксования электродной массы, «джоулево тепло» электрического тока, тепло колошниковых газов, теплопередачу в окружающую среду и в шихте, с охлаждающей водой, на нагрев и расплавление массы и т. д. На динамику процесса наложены начальные и граничные условия.

При анализе различных методов решения системы предпочтение было отдано методу расщепления по пространственным переменным, который позволяет построить компактную систему алгоритмов для реализации решения рассматриваемого класса задач и допускает дополнение системы при увеличении количества влияющих на температурное поле факторов.

В основу программы положена идея структурного программирования с пошаговой детализацией решаемых задач и формирования ее структурных моделей. Отдельные фрагменты программы оформлены в виде функций-операторов, локализованных в одном месте программы, что удобно при внесении изменений в программу.

Средства комплекса программы позволяют вводить исходные данные, необходимые для расчета, анализировать и обрабатывать результаты, а также выдавать их в виде таблиц и рисунков. Разработанный комплекс программ автоматизированной системы температурного анализа НСЭ может быть использован для выявления и прогнозирования рациональных условий формирования электродов.

Для идентификации процессов, протекающих в НСЭ, предложен метод, основывающийся на принципах решения обратных задач теплообмена, если по определенной информации о температурном или электрическом полях, из-

вестных из эксперимента, требуется восстановить какие-либо причинные характеристики. Проведена классификация наиболее характерных обратных задач теплообмена применительно к эксплуатации самообжигающихся электродов. Разработаны модели, алгоритм и программа решения граничных обратных задач теплопроводности (ОЗТ) применительно к идентификации процессов теплообмена в самообжигающемся электроде. Алгоритм обладает пошаговой регуляризацией, аттестован на аналитических решениях задач теории теплопроводности, достаточно просто обобщается на решение других классов обратных задач и может быть рекомендован в практику обработки и интерпретации данных теплофизических измерений применительно к идентификации процессов теплообмена в самообжигающихся электродах рудовосстановительных электропечей [13].

Библиографический список

1. Производство и эксплуатация непрерывных самообжигающихся электродов и анодов / М. И. Гасик, Р. И. Рагулина, О. К. Львова [и др.]. – М.: Металлургия, 1965. – 254 с.
2. Гасик М. И. Самообжигающиеся электроды рудовосстановительных электропечей / М. И. Гасик. – М.: Металлургия, 1976. – 368 с.
3. Гасик М. И. Электроды рудовосстановительных электропечей / М. И. Гасик. – М.: Металлургия, 1984. – 248 с.
4. Гриншпунт А. Г. Повышение эксплуатационной стойкости самообжигающихся электродов мощных ферросплавных электропечей / А. Г. Гриншпунт // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1997. – № 4. – С. 30–32.
5. Гриншпунт А. Г. Использование отходов графитации электродов в составе углеродистых электродных масс / А. Г. Гриншпунт // *Сталь*. – 1997. – № 9. – С. 79–82.
6. О каталитическом действии добавок карбида кремния на процесс графитации самообжигающихся электродов / М. И. Гасик, Л. И. Анелок, В. В. Кашкуль, А. Г. Гриншпунт, В. Л. Яковлев // *Химия твердого топлива*. – 1982. – № 2. – С. 73–78.
7. Гриншпунт А. Г. Пути повышения эксплуатационной стойкости самообжигающихся

ся электродов высокоомощных электропечей / А. Г. Гриншпунт, В. В. Кашкуль, Л. И. Анелок // *Металлургия и коксохимия*. – К.: Техніка, 1983. – Вып. 81. – С. 71–76.

8. Пат. 3564 Украина, МКИ С 01В 31/02. Электродна маса для самовипалювальних електродів рудовідновлювальних електропечей / М. І. Гасик, О. Г. Гріншпунт, В. В. Кашкуль, В. Т. Зубанов, Б. Ф. Величко, Г. О. Дунаєв. – № 3442346; 19.05.82; опубл. 30.06.94. Бюл. № 6. – 3 с.

9. Пат. 9384 Украина, МКИ С 01 В 31/02. Вуглецевомісна маса самовипалювальних електродів / М. І. Гасик, О. Г. Гріншпунт. – № 4294731; 05.09.96. Бюл. № 3. – 4 с.

10. Пат. 9387 Украина, МКИ С 04 В 35/54. Вогнетривка маса для самовипалювальних електродів / М. І. Гасик, О. Г. Гріншпунт, В. В. Кашкуль, О. М. Порада, В. Т. Зубанов, Г. О. Дунаєв. – № 3343458; 06.10.81; опубл. 30.09.96. Бюл. № 3. – 4 с.

11. А.с. 998336 СССР, МКИ С 01 В 31/02. Углеродсодержащая масса для самообжигающихся электродов / М. И. Гасик, А. Г. Гриншпунт, В. В. Кашкуль, В. Ф. Лысенко, А. Н. Порада, В. Т. Зубанов, Д. П. Ковтюх, Г. А. Дунаев. – № 3347484/23; заявлено 27.07.81; опубл. 23.02.83. Бюл. № 7. – 4 с.

12. Гриншпунт А. Г. Создание научно обоснованных технологий производства ферросплавов за счет обеспечения надежной работы электродов высокоомощных электропечей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Г. Гриншпунт, 2001. – 39 с.

13. Гриншпунт А. Г. Идентификация процессов при обжиге цилиндрического композитного сталь-углеродного электрода с внешним и внутренним источником тока / А. Г. Гриншпунт, А. А. Шмукин // *Доповіді Національної Академії Наук*. – 1998. – № 3. – С. 114.

14. Гриншпунт А. Г. Система температурного анализа самообжигающихся электродов рудовосстановительных печей на ПЭВМ / А. Г. Гриншпунт, А. А. Шмукин, И. В. Гендин // *Сталь*. – 1998. – № 11. – С. 33–36.

Поступила 27.05.2016