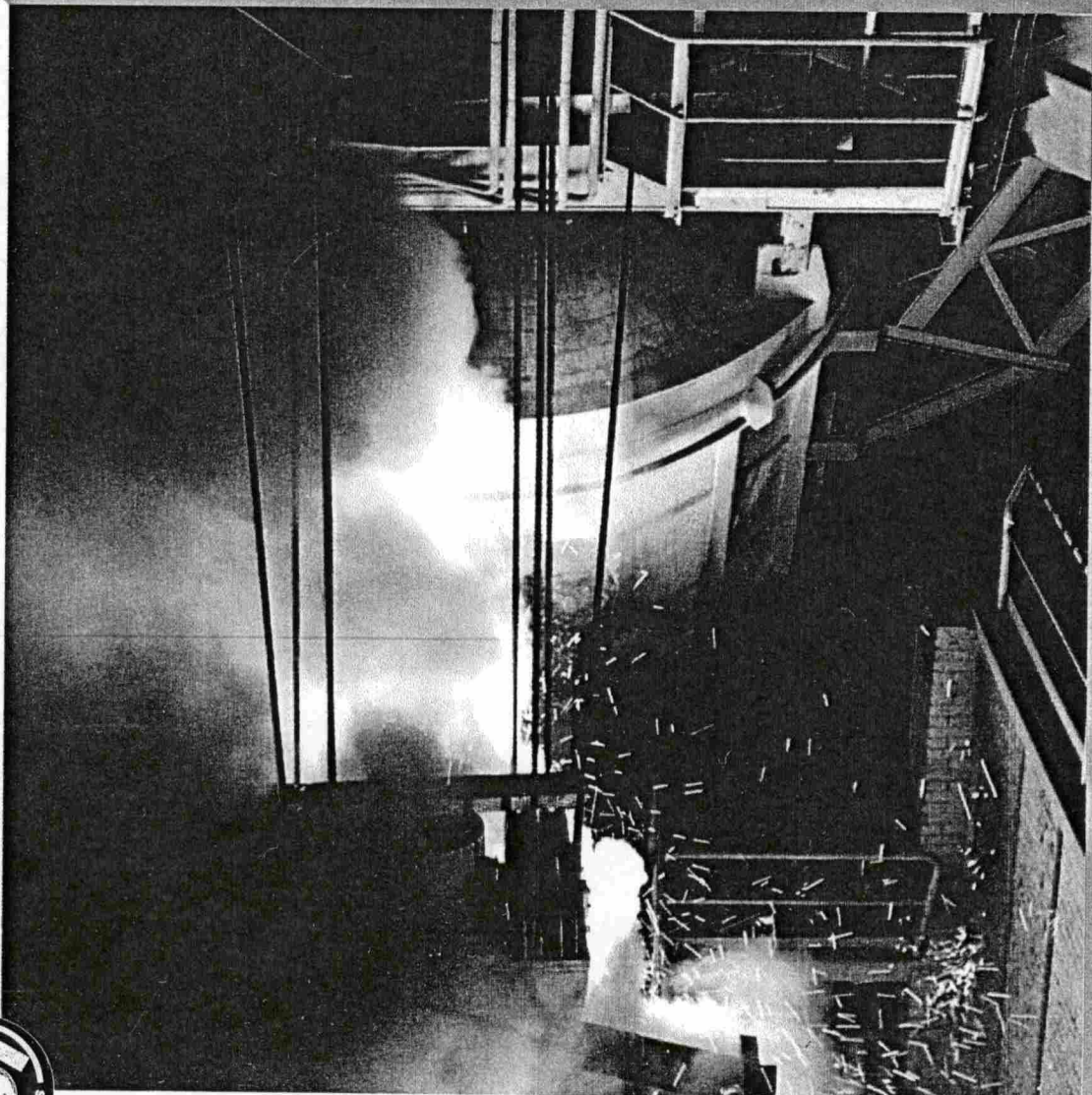


ISSN 1684-5781

ЭлектроМеталлургия

Ежемесячный
научно-технический,
производственный
и учебно-методический
журнал

10/2011



ЭлектроМеталлургия

Ежемесячный научно-технический, производственный и учебно-методический журнал

Издается с мая 1998 г.

10/2011

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук

Журнал переводит на английский язык и выпускает издательство «Pleiades Publishing Ltd.» в виде приложений к журналу «Russian Metallurgy (Metally)», распространение которого осуществляет издательство «Springer»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Белитченко А.К., Воробьев Н.И., Гонтарук Е.И.,
Дейнеко А.Д., Дуб А.В., Карабасов Ю.С.,
Карноухов В.Н., Островский Я.И., Павлов В.В.,
Снитко Ю.П., Тимофеев В.Н.,
Усачев А.Б., Шаманов Г.А.,
[Шахпазов Е.Х.] Шевцов А.З.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала
д-р техн. наук **Уточкин Ю.И.**

Заместитель главного редактора
д-р техн. наук Семин А.Е.

Члены редакционной коллегии

Бигеев В.А., Богданов С.В., Григорович К.В.,
Григорян В.А., Дуб В.С., Дурынин В.А.,
Егоров А.В., Жарницкий М.Д., Жучков В.И.,
Зинуров И.Ю., Ковалевский М.А.,
Кувалдин А.Б., Кудря А.В., Либерман А.Л.,
Лопухов Г.А., Макаров А.Н., Некрасов В.М.,
Парецкий В.М., Рошин В.Е., Смирнов Н.А. (отв.
секретарь), Соيفер В.М., Чередниченко В.С.,
Шевелев Л.Н.

Зарубежные члены редколлегии

Гасик М.И. (Украина),
Райле В.Т. (Германия),
Добровски Л. (Чехия),
Медовар Л.Б. (Украина),
Островский О.И. (Австралия),
Пройдак Ю.С. (Украина),
Савицки А. (Польша),
Смирнов А.Н. (Украина),
Фу Дзе (Китай)

При использовании материалов журнала
в любой форме ссылка на журнал обяза-
тельна.

За достоверность информации
и рекламы ответственность
несут авторы и рекламодатели.

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон/факс: (499) 269-52-97

E-mail: sokol@nait.ru

http://www.nait.ru

© ООО «Наука и технологии», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Перспективы развития отрасли

Уточкин Ю.И., Семин А.Е., Смирнов Н.А. Развитие в России металлургического мини-производства и возникающие проблемы с металлоломом 2

Некрасов В.М. Проблемы заготовки металлолома — общие для заготовителей и металлургов 6

Богданов С.В., Гальцова М.С. Оценка тенденций развития сталеплавильного производства в России . . 11

Управление производством

Боева Л.М., Еременко О.И., Цуканов М.А. Алгоритм автоматизированного диспетчерского управления разливочными кранами в сталеплавильном производстве 17

Ресурсосбережение

Агеев Е.В. Получение порошков из отходов твердых сплавов методом электроэрозионного диспергирования 24

Качество металлопродукции

Крюков Н.Е., Ковальский И.Н., Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Крюков Р.Е. Изготовление нефтяных резервуаров, работающих в условиях Севера 28

Методические материалы

Елизаров В.А. Разработка тепловой модели рудно-термической печи с закрытой дугой 32

Информационные материалы

Дуб В.С. Новый комплекс ЭШП 40

Соифер В.М. Проекты фирмы «Даниели» по непрерывной разливке стали 41

К столетию Матвея Яковлевича Смелянского 48

Памяти Евгения Христофоровича Шахпазова

УДК 621.365.61

Разработка тепловой модели рудно-термической печи с закрытой дугой*

В.А. Елизаров

Московский энергетический институт (технический университет)

E-mail: veliz@yandex.ru

Рассмотрена упрощенная тепловая модель реакционной зоны рудно-термической печи, учитывающая связь между электрическим и тепловым режимами, по результатам исследования которой получены зависимости параметров температурного поля в зоне реакций от времени и от координаты.

Ключевые слова: рудно-термическая печь, электрическая модель, тепловая модель, распределение мощностей, оценка теплового режима.

Большие установленные мощности рудно-термических печей (РТП), достигающие 250 МВ·А [1, 2], определяют актуальность решения задачи повышения их энергоэффективности. Успехи, достигнутые в развитии средств микропроцессорной техники, позволяют повысить производительность РТП и улучшить качество выплавляемого продукта путем совершенствования алгоритмов управления.

Выбор режима работы и сам процесс управления РТП с закрытой дугой затруднен, так как по требованиям технологического процесса нижние концы электродов всегда погружены в шихту. Таким образом, дуги горят в тиглях, образованных газовыми пузырями и спекшейся шихтой. Тигель опирается на жидкий расплав. Стенки тигля имеют температуру плавления шихтовых материалов, и именно в них происходят восстановительные реакции. Восстановленный металл каплями стекает на подину печи. Следовательно, подводимый к электроду ток протекает не только по дуге, но и через стенки тигля, поскольку спекшаяся шихта является хорошим проводником. В многоэлектродных печах ток проходит

также и от электрода к электроду через шихту, однако холодная шихта имеет высокое сопротивление, и этот ток, как показывает опыт эксплуатации печей, пренебрежимо мал. Картина растекания токов в ванне РТП проиллюстрирована на рис. 1.

По мере расплавления шихты в тигле ее место занимает шихта, спускающаяся вниз вдоль электродов. Остальные участки шихты (у стен печи и между электродами) остаются неподвижными и не участвуют в восстановительных реакциях. Поэтому загрузка в РТП, как правило, осуществляется вблизи электродов, создавая вокруг них конусы — колошники. Выделяющиеся в процессе восстановления газы выходят вдоль электродов и удаляются цеховыми системами пылеулавливания. Накопившийся в печи сплав периодически

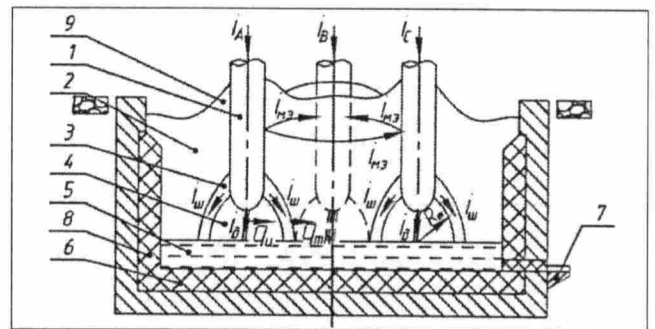


Рис. 1. Схема рудно-термической печи:

1 — электрод; 2 — шихта; 3 — стенки тигля; 4 — газовый пузырь; 5 — расплав; 6 — подина; 7 — леточное отверстие; 8 — стенки печи; 9 — колошник; i_A, i_B, i_C — фазные токи печи; i_D — доля тока, протекающая через дугу; $i_{ш}$ — доля тока, замыкающаяся по шихте; $i_{мэ}$ — доля тока, замыкающаяся от электрода к электроду; q_n — плотность теплового потока излучения; $q_{тп}$ — плотность теплового потока теплопроводности в стенку тигля; R_T — радиус тигля

* Статья публикуется в авторской редакции.

выпускают через специальное леточное отверстие.

Эффективная работа РТП, обеспечивающая равномерный нагрев реакционной зоны печи, возможна при определенном соотношении мощностей, выделяемых в дуговом промежутке и в проводящих стенках тигля. В настоящее время объективных методов контроля распределения токов и мощностей в ванне РТП не существует, что обусловлено недоступностью их измерения. Выбор режима работы печи, как правило, определяется интуицией оператора или опытом эксплуатации аналогичных установок.

В настоящей статье рассматривается возможность построения тепловой модели ванны РТП с закрытой дугой, исследование ее работы и связи с разработанной ранее электрической моделью.

Как известно, однофазные печи в связи с ограничениями по вводимой мощности не находят широкого применения в промышленности. Но так как трехфазные установки выполняют симметричными, задачу исследования многофазных РТП можно свести к однофазной.

Поставленную задачу можно условно разделить на два этапа. Первый этап заключается в построении электрической модели РТП. На этом этапе определяются зависимости гармонического состава фазного тока от соотношения токов, протекающих в стенках тигля и в дуге, и составляющих выделяемой в ванне печи мощности от сопротивления стенок тигля и длины дуги. Вторым этапом — построение тепловой модели. На этом этапе определяется зависимость температурного поля в ванне печи от мощностей, выделяемых в шихте и дуге.

Для построения электрической модели использована упрощенная схема замещения однофазного печного контура [3], показанная на рис. 2. При построении схемы замещения были сделаны следующие допущения и упрощения:

шунтирующее сопротивление футеровки не учитывается;

элементы электрической цепи представлены активными и индуктивными сопротивлениями, подобранными таким образом, чтобы при одинаковых внешних напряжениях токи и мощности действительной схемы и схемы замещения были равны;

сопротивление дуги принято чисто активным и представлено семейством вольт-амперных ха-

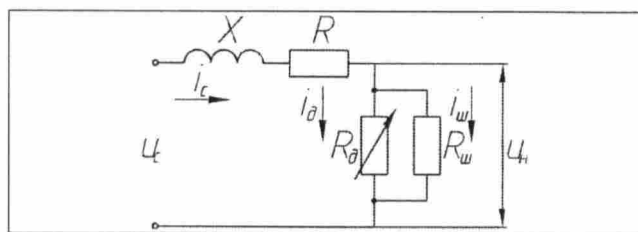


Рис. 2. Схема замещения однофазной рудно-термической печи:

X — индуктивное сопротивление короткой сети, включающее в себя индуктивное сопротивление обмотки трансформатора и токоподвода; R — активное сопротивление короткой сети, состоящее из активного сопротивления трансформатора, токоподвода и электрода; R_w — сопротивление материала шихты (тигля), шунтирующего дугу; R_d — нелинейное сопротивление дуги, зависящее от тока

рактеристик, функций тока и длины дуги, т.е. $R_d = u_d(i_d, l_d)$;

сопротивления подводящих кабелей первичного контура не учитываются ввиду их небольшого значения;

трансформатор представляется совокупностью активного и индуктивного сопротивлений.

По схеме замещения рис. 2 была записана система уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} u_c - u_H = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i; \\ u_c = u_d(i_d, l_d); \\ u_H = i_d \cdot R_d(i_d); \\ u_H = R_w \cdot i_w; \\ i = i_w + i_d, \end{cases} \quad (1)$$

где u_c — напряжение сети; u_H — напряжение нагрузки (параллельного соединения сопротивления дуги и шихты); L — индуктивность короткой сети, состоящее из сопротивления обмотки трансформатора и токоподвода; R — активное сопротивление короткой сети, включающее сопротивление трансформатора, токоподвода и электрода; i — полный ток печи; $u_d(i_d, l_d)$ — напряжение дуги, зависящее от тока дуги i_d и длины дуги l_d ; $R_d(i_d)$ — сопротивление дуги; R_w — сопротивление стенок тигля (шихты); i_w — ток, протекающий по стенкам тигля.

Система (1) является нелинейной и не поддается аналитическому решению, поэтому она была упрощена и переведена при помощи пре-

образований Лапласа в операторную форму, по которой построена модель в пакете прикладных программ *MatLab Simulink*. Дуга представлена в виде идеальной вольт-амперной характеристики, аппроксимированной знаковой функции $u_d = U_d \cdot \text{sign}(i_d)$ [4].

На построенной модели исследовали влияние напряжения на дуге и сопротивления шихты на гармонический состав фазного тока и мощностей, выделяющихся в дуговом промежутке и в шихте.

Методика исследования электрического режима и полученные зависимости гармонического состава фазного тока, токов в стенках тигля и дуге, а также мощностей, выделяемых в ванне печи, приведены в работах [5, 6].

Построение тепловой модели начинается с рассмотрения строения тигля РТП с закрытой дугой, которое схематически изображено на рис. 1. Схема рис. 1 иллюстрирует пути растекания тока, а также возможные направления тепловых потоков в тигле печи: $q_{и}$ — плотность теплового потока излучения; $q_{тп}$ — плотность теплового потока теплопроводности в стенку тигля.

Задача определения теплового поля ванны печи сложна, нелинейна и неоднозначна, со многими неизвестными, допущениями и упрощениями. Существует несколько подходов: некоторые основаны на решении уравнения баланса энергий, учитывающего законы химической кинетики, как, например, в работе [7], другие базируются на так называемом методе декомпозиции ванны РТП [8]. Для идентификации температурного поля также используются методы физического моделирования в электролитических ваннах [9].

В настоящей статье рассматривается построение тепловой модели печи на основе дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с внутренними источниками теплоты [10]

$$a \cdot \nabla^2 \theta + w \cdot \frac{1}{c \cdot \gamma} = \frac{d\theta}{dt}, \quad (2)$$

где a — коэффициент температуропроводности; ∇^2 — оператор Лапласа; θ — температура исследуемой точки; w — мощность внутренних источников теплоты; c — теплоемкость шихтовых материалов; γ — плотность шихтовых материалов; t — время.

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры во времени в данном материале, т.е. температурную инерцию вещества, и определяется из выражения [10]

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}, \quad (3)$$

где λ — теплопроводность шихтовых материалов.

Уравнение (2) описывает процесс переноса тепла внутри тела в самом общем виде, оно является математической моделью целого класса явлений теплопроводности. Так как явления передачи тепла внутри тел бесконечно разнообразны, то существует бесчисленное множество различных решений, удовлетворяющих этому уравнению. Чтобы получить частное решение, соответствующее решаемой задаче, необходимо к исходному уравнению добавить данные, соответствующие особенностям рассматриваемого процесса, так называемые условия однозначности: начальные и граничные условия.

В качестве начальных приняты условия равномерного распределения температуры по объему ванны в начальный момент времени, которые записываются следующим образом:

$$\theta_{t=0} = \theta_0 = \text{const}, \quad (4)$$

где θ_0 — начальная температура окружающей среды. В ходе моделирования принято $\theta_0 = 20$ °С.

Для определения граничных условий используется закон теплообмена на стенке тигля, т.е. равенство плотности тепловых потоков излучения $q_{и}$ и теплопроводности $q_{тп}$

$$q_{тп} = q_{и}$$

или, используя закон сохранения энергии (количество тепла, подводимое к элементу поверхности, должно отводиться внутрь тела)

$$-\lambda \cdot \left(\frac{d\theta}{dn} \right)_{\text{пов}} = q_{и}. \quad (5)$$

Для упрощения модели приняты следующие допущения:

задача осесимметрична и реакционная зона печи имеет форму правильной полусферы, что позволяет свести трехмерную задачу к двумерной;

доминирующей составляющей теплообмена от дуги считается излучение (суммарные тепло-

вые потоки состоят на 85—95% из потоков излучений [11]), т.е. конвективным теплообменом внутри тигля пренебрегают;

дуга имеет цилиндрическую форму и располагается строго по оси электрода и печи;

сопротивление, теплопроводность и теплоемкость шихтовых материалов постоянны и не зависят от температуры;

в ванне печи основными источниками нагрева являются дуговой разряд и ток, протекающий по шихте, остальные источники (экзотермические реакции, процесс сторания электрода) мало мощны, и ими пренебрегают.

При указанных допущениях решение задачи удобнее всего искать в полярной системе координат [12]. Для этого проведена замена переменных:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \delta; \\ y = r \cdot \sin \delta, \end{cases} \quad (6)$$

где x и y — координаты в прямоугольной системе координат; r — радиус-вектор; δ — угол, изменяющийся от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

Используя замену переменных (6), уравнение (2) и условия однозначности (4) и (5), записана система уравнений в полярной системе координат:

$$\begin{cases} a \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial \delta^2} \right] + w \cdot \frac{1}{c \cdot \gamma} = \frac{d\theta}{dt}; \\ \theta(r, \omega, 0) = \theta_0 = \text{const}; \\ -\lambda \cdot \left(\frac{d\theta}{dr} \right)_{r=R_T} = q_{\text{и}}. \end{cases} \quad (7)$$

Особый интерес представляет нахождение теплового потока излучения дуги $q_{\text{и}}$. Существует множество подходов для его определения, связанных в основном с особенностью представления дуги как источника излучения. Так, например, в работе [13] дугу ввиду небольшого занимаемого относительно всего рабочего пространства печи объема принимают как источник излучения бесконечно малых размеров шарообразной формы, а для расчета теплового потока используют формулу Кеплера. Однако такой подход оказывается ошибочным при соизмеримых размерах дуги и рабочего пространства, а также при представлении дуги в виде цилиндра [14]. Наиболее точным

описанием процесса излучения от дуги можно считать методику, изложенную в работе [15], где дуга представляется элементарным точечным цилиндрическим излучателем. Согласно этой работе, плотность теплового излучения дуги, падающего в любую точку пространства (рис. 3), определяется выражением

$$dq_{\text{и}} = \alpha_{\text{изл}} \cdot \frac{dP \cdot \cos \alpha_i \cdot \cos \beta_i}{\pi^2 \cdot l_i^2}, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{изл}}$ — коэффициент излучения дуги; dP — мощность, выделяемая в элементарном излучающем цилиндре; α_i — угол между нормалью к оси дуги n_1 и направлением излучения; β_i — угол между нормалью к поверхности n_2 и направлением излучения; l_i — расстояние от источника излучения до расчетной точки на поверхности.

Излучение в точке C складывается из излучения двух участков дуги длиной l_1 и l_2 . Расстояние от оси дуги до точки C обозначено как l_i . Участок излучает в точку C , в пределах угла OCB ($\angle OCB = \beta_1$), а участок l_2 излучает в пределах угла $O'CB$ ($\angle O'CB = \beta_2$). Полный угол, под которым дуга излучает в точку C , находится как сумма $\beta = \beta_1 + \beta_2$. Текущий угол между нормалью к дуге n_1 и расстоянием l_i от оси дуги до точки C обозначен через α_i , а текущий угол между нормалью к поверхности тигля n_2 и поверхностью тигля — β_i . Угол между нормалью n_2 и прямой $BC = R$ равен φ (рис. 3).

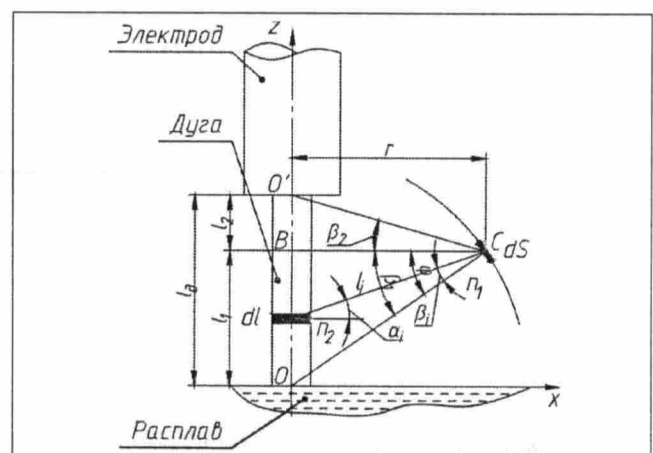


Рис. 3. К определению плотности теплового потока излучения от дуги на элементарную площадку dS (обозначения в тексте)

Мощность dP , выделяемая в элементарном излучающем цилиндре dl , определяется из выражения

$$dP = \frac{P_d}{l_d} \cdot dl, \quad (9)$$

где P_d — мощность, выделяемая в дуговом промежутке; l_d — длина дуги.

При подстановке выражения (9) в уравнение (8) получено выражение для определения плотности потока излучения, падающего в точку C от элементарного излучающего цилиндра dl

$$dq_{и} = \alpha_{изл} \cdot \frac{P_d \cdot \cos \alpha_i \cdot \cos \beta_i}{\pi^2 \cdot l_i^2 \cdot l_d} \cdot dl. \quad (10)$$

Интегрирование выражения (10) по углам β_1 и β_2 дает окончательное выражение для определения плотности теплового потока от дуги (некоторые математические выкладки опускаются) [15]

$$q_{и} = \frac{\alpha_{изл} \cdot P_d}{2 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot l_d} \cdot [\cos \varphi \cdot (\beta + \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_1 + \sin \beta_2 \cdot \cos \beta_2) + \sin \varphi \cdot (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2)]. \quad (11)$$

Для определения некоторых неизвестных в выражении (11) применяется методика, предложенная в работе [16]. Мощность, выделяемую в электрической дуге P_d , определяли при решении электрической задачи как

$$P_d = U_d \cdot I_d,$$

где U_d — действующее значение напряжения дуги; I_d — действующее значение тока.

Длину дуги l_d определяли по выражению

$$l_d = \frac{U_d - (U_a + U_k)}{b},$$

где $(U_a + U_k)$ — сумма прианодного и прикатодного падений напряжения. Как правило, $(U_a + U_k)$ принимается в диапазоне 15–20 В; b — градиент напряжения в столбе дуги.

Поиск решения нестационарной системы уравнений (7) в связи со сложностью отыскания аналитического решения ведется численным методом. Для численного решения применяется метод конечных разностей (МКР), а точнее, его разновидность — метод контрольных объемов (МКО). Основная идея метода состоит в следующем: расчетную область разбивают на не-

которое число непересекающихся контрольных объемов таким образом, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. Дифференциальные уравнения интегрируют по каждому контрольному объему. Для вычисления интегралов используют кусочные профили, которые описывают изменение функции между узловыми точками. В результате находят дискретный аналог дифференциального уравнения, в которое входят значения функции в нескольких узловых точках. Полученный подобным образом дискретный аналог выражает закон сохранения энергии для конечного контрольного объема точно так же, как дифференциальное уравнение выражает закон сохранения энергии для бесконечно малого контрольного объема. Одним из важных свойств МКО является то, что в нем заложено точное интегральное сохранение такой величины, как энергия на любой группе контрольных объемов и, следовательно, на всей расчетной области. Это свойство проявляется при любом числе узловых точек, а не только в предельном случае очень большого их числа. Основным недостатком МКР перед МКО является то, что в МКР в качестве решения рассматриваются только значения функции в узлах и не делается никаких явных указаний о характере изменения функции между этими точками [17].

Для получения дискретного аналога системы уравнений (7) построена расчетная область, приведенная на рис. 4. Узловые точки расположены одна от другой на заданном расстоянии $2 \cdot \Delta r$ и $2 \cdot \Delta \varphi$. Исследуемая точка (i, j) в которой происходит поиск температуры, окружена точками $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$ и $(i, j+1)$. Расчетные точки также следует поместить на каждую границу. Грани контрольных объемов расположены точно посередине между расчетными точками. Следовательно, для внутренних точек характерны обычные контрольные объемы, а у границ области — половинные. Применяемый контрольный объем на рис. 4 заштрихован.

Для рассматриваемой задачи сделано предположение, что размеры контрольного объема по координатам r и φ одинаковы и равны $2 \cdot \Delta r = 2 \cdot \Delta \varphi = h$, а в направлении z равны 1 (рассматривается двумерная задача). Таким образом, контрольный объем составит $h \times h \times 1$.

После математических преобразований и разделения переменных дифференциальное уравне-

ние системы (7) было приведено к виду дискретного аналога

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\lambda}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right) + r \cdot w = r \cdot c \cdot \gamma \cdot \frac{d\theta}{dt}. \quad (12)$$

В модели принят вид температурного профиля (интерполяционной формулы), согласно которому температура в узловой точке отлична от температуры окружающего ее контрольного объема, т.е. имеет место кусочно-линейный профиль, представленный на рис. 5, который показывает, что изменение температуры между узловыми (черными) точками t_{ij} , t_{i-1j} , t_{i+1j} , $t_{i,j-1}$ и $t_{i,j+1}$ описывается линейными интерполяционными функциями. Светлые точки, расположенные посередине между узловыми, обозначают грани контрольного объема.

Полагая, что скорость изменения температуры в расчетной точке $\frac{d\theta_{j,i}}{dt}$ является характерной для всего контрольного объема, после интегрирования уравнения (12) по контрольному объему, т.е. от расчетной точки i_- до точки i_+ по координате φ и от точки j_- до точки j_+ по координате r , получено:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{j,i}}{dt} = & a_{j,i} \cdot \theta_{j,i} + b_{j,i} \cdot \theta_{j,i-1} + \\ & + c_{j,i} \cdot \theta_{j,i+1} + d_{j,i} \cdot \theta_{j-1,i} + e_{j,i} \cdot \theta_{j+1,i} + f_{j,i}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$a_{j,i} = - \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda \cdot (r_{j-} + r_{j+}) + \frac{\Delta r \cdot \lambda}{\Delta\varphi} \cdot \left(\frac{1}{r_{j-}} + \frac{1}{r_{j+}} \right)}{2 \cdot \Delta\varphi \cdot r_*^2 \cdot c \cdot \gamma};$$

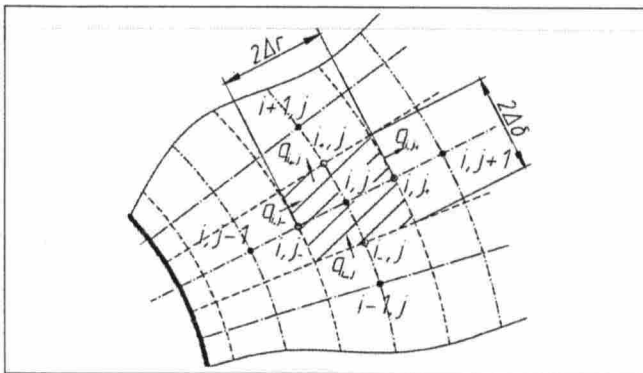


Рис. 4. Расчетная модель тигля однофазной руднотермической печи (обозначения в тексте)

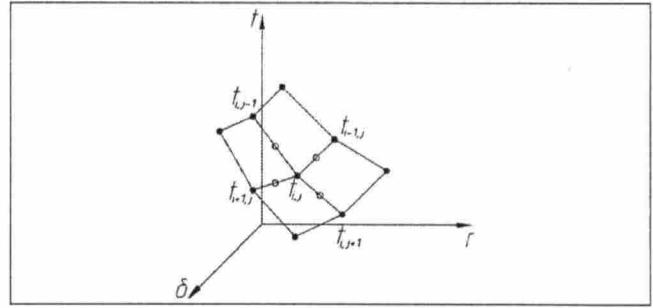


Рис. 5. Принятый в модели профиль температуры между расчетными точками

$$b_{j,i} = \frac{\Delta r \cdot \lambda}{2 \cdot (\Delta\varphi)^2 \cdot r_{j-} \cdot r_*^2 \cdot c \cdot \gamma};$$

$$c_{j,i} = \frac{\Delta r \cdot \lambda}{2 \cdot (\Delta\varphi)^2 \cdot r_{j+} \cdot r_*^2 \cdot c \cdot \gamma};$$

$$d_{j,i} = \frac{\lambda \cdot r_{j-}}{2 \cdot \Delta r \cdot r_*^2 \cdot c \cdot \gamma};$$

$$e_{j,i} = \frac{\lambda \cdot r_{j+}}{2 \cdot \Delta r \cdot r_*^2 \cdot c \cdot \gamma};$$

$$f_{j,i} = \frac{w_{j,i}}{c \cdot \gamma};$$

$$r_*^2 = \frac{r_{j+}^2 - r_{j-}^2}{2}.$$

Граничные условия системы уравнений (7) выражаются аналогичным уравнением.

На основе проведенного анализа записана система уравнений (7) в матричной форме:

$$\begin{cases} X' = A_1 \cdot X + B_1 \cdot u; \\ Y = C_1 \cdot X + D_1 \cdot u, \end{cases} \quad (14)$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_{n \cdot m})$ — $n \cdot m$ -мерный вектор состояния; $Y = (\theta_{1,1}, \theta_{1,2}, \dots, \theta_{n,m})$ — $n \cdot m$ -мерный вектор выходных параметров, A_1 — матрица переменных состояния (размера $n \cdot m \times n \cdot m$); B_1 — матрица управления (размера $n \cdot m \times n \cdot m$); C_1, D_1 — матрицы выходных параметров (размера $n \cdot m \times n \cdot m$); u — $n \cdot m$ -мерный вектор управления.

Алгоритм численного решения матричной системы уравнений реализован в качестве программного комплекса при взаимодействии программных пакетов *MatLab* и *MatLab Simulink*. Программный комплекс позволил совместно моделировать электрическую и тепловую задачи, а также анализировать полученные зависимости.

Моделирование проводили в абсолютных величинах. В качестве объекта исследования была выбрана ферросплавная печь РКО-16,5, предназначенная для получения ферросилиция. Питание печи РКО-16,5 осуществляется от трех однофазных трансформаторов. Основные данные электрической печи приведены в табл. 1 [18]. Шихту для получения ферросилиция принимали трехкомпонентной: кварцит, углеродистый восстановитель и железосодержащая стружка в соответствующих концентрациях [19]. Основные теплофизические параметры среды, рассчитанные по методике [20] для получения 45%-ного ферросилиция, приведены в табл. 2 (данные взяты из работы [21]).

Результаты теплового расчета — зависимости температуры от времени и от координаты — для следующих параметров: углы между нормалью к поверхности и направлением излучения $\beta_1 = \varphi = 0$; $\beta = \beta_2 = 39$ град.; градиент напряжения в столбе дуги $b = 1600 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ [22]; сопротивление шихты 1,58 мОм; напряжение дуги 26,7 В; напряжение источника питания 130 В; ток в электроде 62,2 кА; радиус реакционного тигля 0,5 м представлены на рис. 6 и 7. Этим параметрам соответствуют следующие рассчитанные значения: мощность, выделяемая в токопроводящем слое ших-

1. Основные параметры фазы печи РКО-16,5

Параметр	Значение параметра
Установленная мощность трансформатора, МВ·А	5,5
Рабочий ток в электроде, кА	63
Рабочее напряжение, В	175
Частота питающей сети, Гц	50
Сопrotивление на фазу, мОм:	
реактивное	0,990
активное	0,139

2. Основные параметры шихтового материала

Параметр	Значение параметра
Теплоемкость, Дж/кг·°С	642,8
Теплопроводность, Вт/м·°С	31,6
Плотность, кг/м ³	4137,6
Рабочая температура процесса, °С	2800

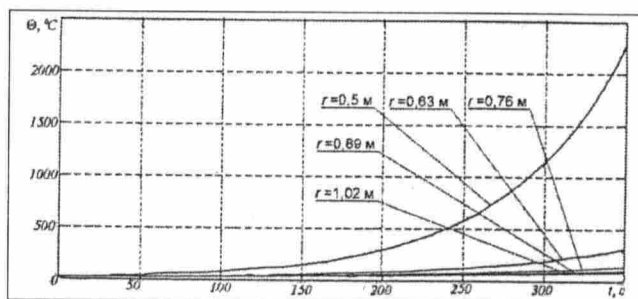


Рис. 6. Зависимость температуры шихты от времени

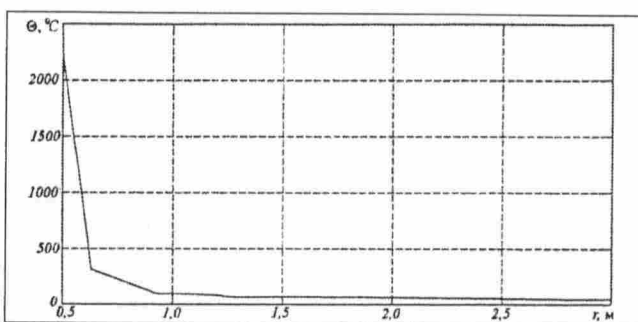


Рис. 7. Зависимость температуры шихты от координаты

ты, равна 1,05 МВт; мощность, выделяемая в дуге, — 0,58 МВт; полная мощность, выделяемая в ванне печи, — 1,63 МВт.

Полученные зависимости не противоречат представлениям о физике протекания процессов, а именно: с течением времени температура точек возрастает, а по мере удаления от дуги температура нагрева снижается. Кроме того, полученные результаты качественно совпадают с аналогичными данными, приведенными в различных литературных источниках, например, в работе [23].

С использованием разработанного программного комплекса проведены исследования зависимости температурного поля от напряжения на дуге, изменения сопротивления тигля, радиуса тигля, теплофизических параметров шихтовых материалов, что позволило выявить связь между тепловым режимом печи и гармоническим составом фазного тока.

Установлено, что увеличение напряжения на дуге приводит к повышению мощности, выделяемой в дуге, и росту высших гармонических составляющих; при этом значителен перегрев стенки тигля. Этот вывод можно считать очевидным. Он также согласуется с практикой. С другой стороны, мощность, выделяющаяся в шихте, при увеличении ее сопротивления снижается,

что, в свою очередь, негативно влияет на распределение температуры.

С увеличением радиуса тигля температура на его стенке значительно снижается, так как увеличивается расстояние от дуги. Такое состояние также негативно влияет на ход технологического процесса, так как возможно уменьшение температуры на внутренней стенке тигля ниже температуры плавления материала.

Следует отметить, что применение модели ограничено определенным временным интервалом, так как не учитывалось явление массопереноса, т.е. сход шихты по мере ее нагрева и расплавления. Временной интервал определяется целым рядом параметров, таких как длина дуги, вид шихтовых материалов, соотношение между токами и многими другими. Тем не менее разработанная комплексная модель РТП и полученные зависимости позволяют рассматривать тепловые процессы не только для оценки теплового состояния печи, но и вырабатывать рекомендации по ведению эффективного технологического процесса, что приводит к экономии электрической энергии, электродной массы и шихтовых материалов.

Список литературы

1. **Промышленные** установки электродугового нагрева и их параметры / Под ред. Л.Е. Никольского. М.: Энергия, 1971. 272 с.
2. **Рубцов В.П., Батов Н.Г.** Электротехнологические установки специального назначения. М.: Изд. МЭИ, 2006. 64 с.
3. **Цишевский В.П.** Рудовосстановительные печи и энергетические балансы дуговых металлургических печей. М.: МЭИ, 1980. 76 с.
4. **Марков Н.А.** Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. М.: Энергия, 1957. 208 с.
5. **Рубцов В.П., Елизаров В.А.** Анализ гармонического состава кривой фазного тока для оценки распределения мощности в тигле рудно-термической печи // *Электromеталлургия*. 2011. № 3. С. 11—19.
6. **Рубцов В.П., Елизаров В.А.** Анализ гармонического состава тока для оценки теплового режима режима в рудно-термической печи с закрытой дугой // *Вестник МЭИ*. 2011. № 2. С. 5—10.
7. **Ершов В.А.** Современные методы учета технологических параметров при расчетах режимов РВП // VII Всесоюзное научно-техническое совещание по электротермии и электротермическому оборудованию. Тезисы докл., М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 33—34.
8. **Богатырев М.Ю.** Декомпозиция модели рудно-термической печи // *Автоматические системы оптимального управления технологическими процессами*. Тула: ТулПИ, 1982. С. 79—82.
9. **Лыков А.Г., Розенберг В.Л.** Распределение мощности на электролитической модели ванны ферросплавной печи // *Исследования в области промышленного электронагрева*. Вып. 3. М.: Энергия, 1969. С. 48—54.
10. **Свенчанский А.Д.** Электрические промышленные печи: Учебник для вузов. В 2 ч. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. М.: Энергия, 1975. 384.
11. **Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н.** Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 320 с.
12. **Тихонов А.М., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. М.: Изд. Московского университета, 1999. 799 с.
13. **Леушин А.И.** Дуга горения. М.: Металлургия, 1973. 240 с.
14. **Макаров А.Н., Свенчанский А.Д.** Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.
15. **Макаров А.Н.** Теплообмен в электродуговых и факельных печах и топках паровых котлов. Тверь: ТГТУ, 2003. 348 с.
16. **Ячиков И.М., Бердников А.В.** Особенности поведения теплового потока излучения электрической дуги при отклонении ее оси от нормали к поверхности расплава. Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы XIV Международной конференции. Часть 2. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. С. 154—158.
17. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
18. **Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей.** Справочник / Под ред. Я.Б. Данциса, Г.М. Жилова. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
19. **Электromеталлургия** стали и ферросплавов / Под ред. Д.Я. Поволоцкого. М.: Металлургия, 1974. 552 с.
20. **Дульнев Г.Н., Новиков В.В.** Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 248 с.
21. **Физические величины.** Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
22. **Арменский С.В., Холоднов В.А.** Математическая модель дуги в руднотермической печи // *Химия и химическая технология*. 2004. 47 (3). С. 108—111.
23. **Сисоян Г.А.** Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1971. 304 с.