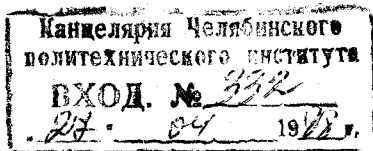


05.16.08

П224

ВСЕОБЩИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ТЕПЛОТЕХНИКИ



На правах рукописи

ПАШНИН Сергей Владимирович

УДК 621.365.71:536.5.001.57

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ САМОБЕИГАРЖЕТОСЯ  
ЭЛЕКТРОДА С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ  
СТОЙКОСТИ

Специальность 05.16.08 - Metallургическая теплотехника

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Свердловск - 1988

Работа выполнена на кафедре "Промышленная теплоэнергетика"  
Челябинского политехнического института имени Ленинского комсо-  
мола.

Научный руководитель - к.т.н., доцент КОРОЛЕНКО Ю.А.

Официальные оппоненты: → д.т.н., профессор

ТУЛУЕВСКИЙ Ю.И.

- к.т.н. ЛОБАНОВ Д.Л.

Ведущее предприятие - Ермаковский ферросплавный завод  
(ЕФЗ).

Защита состоится "2" июня 1988 г. в 15 час. на  
заседании специализированного совета К 141.07.01 Всесоюзного  
научно-исследовательского института металлургической теплотех-  
ники по адресу: 620219, Свердловск, ГСП-175, Студенческая, 16,  
ВНИИМТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВНИИМТ.

Автореферат разослан "22" апреля 1988 г.

Ученый секретарь специали-  
зированной совета К 141.07.01  
кандидат технических наук

*Кузнецов*  
Ю.М. Кузнецов



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Директивами XXVII съезда КПСС в XII пятилетке предусматривается увеличение выпуска легированных и низколегированных сталей. Основные добавки (ферросплавы) для получения таких сталей в основном выплавляют в рудовосстановительных печах (РВП) с самообжигающимися электродами. Поэтому в современных условиях важное значение приобретает базаварийный режим работы рудовосстановительных печей.

В процессе эксплуатации нередки аварии основных элементов РВП - самообжигающихся электродов (обрывы, обломы). Это вызывает простои печи, уменьшение количества выплавляемых сплавов. Повышение эксплуатационной стойкости самообжигающихся электродов существенно уменьшает эти потери.

Эксплуатационная стойкость электрода во многом определяется температурным полем, формирующимся в его объеме. Поэтому исследование тепловых процессов, происходящих в самообжигающихся электродах и влияние на них различных факторов составляет важную научную и народнохозяйственную задачу.

Наиболее эффективным способом исследования процессов, происходящих в самообжигающихся электродах, является метод математического моделирования. Создание математической модели, учитывающей факторы, влияющие на распределение температур по высоте, радиусу и периметру электродов, позволяет изучить влияние каждого из них и разработать рекомендации, способствующие повышению эксплуатационной стойкости электрода.

Работа выполнялась в соответствии с целевой программой О.Ц. 026 "Автоматизация управления технологическими процессами, производством и оборудованием с применением мини-ЭВМ и микро-ЭВМ", утвержденной постановлением ЦКПТ СССР от 8 декабря 1981 года

№ 491 и темой 5.29 координационного плана ВПО "Союзспецсталь" Министерства черной металлургии СССР на 1984-1985 годы, утвержденного 4.08.83 года.

Цель работы. Основной целью работы является создание трехмерной математической модели тепловой работы самообжигающегося электрода, учитывающей все основные конструктивные, эксплуатационные, технологические факторы, в том числе обгар рабочего конца его. Исследование влияния этих факторов на эксплуатационную стойкость электрода с помощью модели.

Научная новизна. На базе метода баланса разработана методика расчета трехмерного нестационарного температурного поля самообжигающегося электрода, имеющего переменные теплофизические характеристики, граничные условия и внутренние тепловыделения, с учетом обгара его рабочего конца. Для учета локальных тепловых эффектов кожуха разработан методический прием расчета гетерогенных тел с тонкими теплопроводными вставками, которые позволяют учесть изменения температур вблизи ребер и обечайки кожуха, не вызывая существенного увеличения продолжительности расчета. Для учета влияния обгара на температурное поле электрода предложена температурная зависимость скорости разрушения боковой поверхности электрода, полученная на основе экспериментальных данных. На основе этих разработок предложен алгоритм расчета и реализована трехмерная математическая модель тепловой работы самообжигающегося электрода, учитывающая все основные факторы, влияющие на формирование самообжигающегося электрода. С помощью этой модели исследовано влияние обдувки и конструкции кожуха на температурные поля электродов диаметром от 1,2 до 1,9 м.

Практическое значение работы. Разработанная математическая модель позволяет учесть влияние основных конструктивных, эксплуатационных и технологических характеристик на температурное поле

самообжигающегося электрода и позволяет рассчитывать температурные поля электродов любых типоразмеров. С помощью модели оценено влияние толщины обечайки, толщины, ширины и местоположения ребер кожуха на распределение температур по периметру самообжигающегося электрода. Проанализировано влияние режимов обдувки на температурное поле участка электрода, расположенного над щелками.

С помощью модели разработана конструкция кожуха, способствующая существенному выравниванию температур по периметру и повышению эксплуатационной стойкости самообжигающегося электрода. Рудовосстановительная печь, использующая эту конструкцию кожуха самообжигающегося электрода, признана изобретением и внедрена на Ермаковском ферросплавном заводе с экономическим эффектом 47 тысяч рублей за 1986 год (доля автора 80%).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Трехмерная математическая модель тепловой работы самообжигающегося электрода.
2. Температурная зависимость скорости разрушения рабочего конца электрода и учет ее при разработке и реализации математической модели.
3. Результаты исследования влияния обдувки и конструкции кожуха на температурное поле самообжигающегося электрода с помощью математической модели.
4. Результаты внедрения рудовосстановительной печи, оснащенной электродами с кожухами, разработанными с помощью модели. Эта печь признана изобретением.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на VII-XI Всесоюзных семинарах по САИР "автоматизация проектирования в электротехнике и энергетике" (г.Иваново, 1982 г.; г.Куйбышев, 1984 г.; г.Челябинск, 1985 г.; г.Иваново, 1986 г.; г.Ив-

вочеркасск, 1987 г.); на областной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (Челябинск, 1986 г.); на LV Всесоюзном симпозиуме "Параметры рудовосстановительных электропечей, совершенствование конструктивных элементов и проблемы управления процессами" (г. Никополь, 1987 г.), на научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в области совершенствования тепловых процессов и новые технологии промышленных установок и ТЭЦ" (г. Челябинск, 1987 г.), на ежегодных итоговых конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола (г. Челябинск, 1982-1987 г.г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в семи печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков и 1 таблицу. Список использованной литературы содержит 103 наименования. В приложении - акты внедрения результатов работы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

#### ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В САМОСБИГАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОДАХ

Исследованию физико-химических процессов, происходящих при формировании самообжигающегося электрода посвящены работы М.И. Гасика, В.Л. Розенберга, В.Г. Кушнарера, М.А. Рысса, В.Я. Капеллянова, А.М. Киселева, В.В. Кашкуля и др.

Эти исследования показали, что на процесс формирования самообжигающегося электрода существенное влияние оказывает неравномерность температур по сечению электрода. В каждой из температурных зон это влияние своеобразно: в зоне жидкой массы и

зоне коксования неравномерность температур по периметру ведет к усилению сегрегации электродной массы, в спексованном блоке - к увеличению термических напряжений. Это вызывает усиление анизотропии свойств, обломы, сколы рабочего конца электрода.

Исследования М.И.Гасика, В.Г.Кушнарева, В.Л.Розенберга и др. показали, что формирование самообжигающегося электрода в основном происходит за счет джоулева тепла, выделяющегося в электроде при протекании по нему электрического тока. Возникновение в электроде электромагнитных эффектов (поверхностного эффекта, эффекта близости), неравномерное стекания тока в зашиктованной части ведет к неравномерному выделению джоулева тепла в объеме электрода и формированию в нем переменного температурного поля. Исследования С.Дунски, Б.М.Струнского показали, что каждый из этих эффектов существенно влияет на распределение плотности тока по сечению электрода. С ростом диаметра электродов влияние электромагнитных эффектов в них возрастает.

Существенное влияние на распределение температур и стойкость самообжигающегося электрода оказывает обгар боковой и торцевой поверхности электрода, а так же поверхностей щелей, образовавшихся в углеродистом блоке после разрушения ребер. Изучение образцов рабочих концов электродов, вынутых из печи после их обломов, показывает, что ширина щелей больше со стороны, обращенной к центру печи.

Исследованию температурных полей самообжигающихся электродов посвящены многочисленные работы в СССР и за рубежом.

Основные данные о процессах, протекающих в самообжигающихся электродах получены М.И.Гасиком, В.Г.Кушнаревым, В.Л.Розенбергом, В.Г.Филимоновым, В.В.Кашкулем и др. с помощью экспериментов, проводимых на электродах действующих печей.

Однако в последнее время все большее внимание специалистов

привлекают методы математического моделирования тепловых процессов, происходящих в самообжигающихся электродах. Математические модели позволяют рассчитать температурное поле самообжигающегося электрода в целом, проанализировать влияние отдельных факторов на температурное поле электрода изолированно друг от друга.

Наиболее удачные двумерные математические модели разработаны В.Л.Розенбергом, Л.Ольсенем, З.А.Вальковой, В.И.Горбенно, К.А.Черепановым. Однако они не учитывают неравномерное распределение температур по периметру электрода и факторы, способствующие этому. Это существенно снижает точность моделей и возможности их применения.

При разработке трехмерной математической модели Р.Инзаера принято, что ребра кожуха имеют форму шипов и не влияют на распределение электрического тока в объеме электрода. Не учитываются влияние обгара боковой поверхности и разгара щелей, образующихся в углеродистом блоке после разрушения ребер. Это снижает степень адекватности модели температурному полю реального электрода и существенно ограничивает ее применение.

Для анализа процессов, происходящих в самообжигающемся электроде, нужно создать трехмерную математическую модель его тепловой работы без существенного упрощения задачи.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ САМООБИГАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОДА И МЕТОД ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

С тепловой точки зрения самообжигающийся электрод представляет собой гетерогенное цилиндрическое тело с переменными по поверхности граничными условиями, переменными внутренними источниками тепла, изменяющимися от температуры тепло- и электрофизи-



ческими характеристиками. Распространение тепла в таком теле происходит, в основном, теплопроводностью. Поэтому нестационарное температурное поле самообжигающегося электрода описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v + q_\varphi \quad (1)$$

Теплообмен между боковой поверхностью электрода и окружающей средой описывается граничными условиями третьего рода с учетом лучистой и конвективной составляющей теплового потока.

Все теплофизические характеристики уравнения (1) существенно меняются в зависимости от температуры и состояния электродной массы. Граничные условия резко различаются по высоте электрода.

Аналитическое решение дифференциального уравнения (1) в такой сложной постановке практически невозможно. Поэтому для расчета температурного поля самообжигающегося электрода применен численный метод баланса. В качестве расчетной принята явная схема метода баланса.

Для учета локальных тепловых эффектов, возникающих вблизи обечайки и ребер кожуха, разработан методический прием расчета гетерогенных тел с тонкими теплопроводными вставками. Температура по толщине такой вставки не изменяется. Тепловое влияние вставки (ребра) на основное тело (электрод) состоит лишь в действии ее внутренних тепловыделений. Поэтому температурное поле тела со вставками можно рассчитывать как температурное поле основного тела с вынутыми из него вставками, на поверхности образовавшихся щелей которого рассматриваются граничные условия второго рода, соответствующие тепловыделениям вставки. Для расчета доли тепла, пошедшей к тому или иному элементу основного тела, в элементе вставки отсчитывается точка экстремума темпера-

турной кривой. Часть тепла, пошедшая к левому или правому элементу основного тела, отыскивается по следующим соотношениям:

$$\Delta Q_1 = \frac{x}{b} \Delta Q_B \quad (2)$$

$$\Delta Q_2 = \frac{b-x}{b} \Delta Q_B \quad (3)$$

Температура элемента вставки находится из уравнения теплового баланса элемента вставки с соседними с ним элементами электродной массы.

Исключение элементов вставок из основной расчетной схемы метода баланса позволяет существенно увеличить шаг во времени и уменьшить продолжительность расчета по сравнению с обычной методикой.

С целью определения оптимального местоположения точек среднеинтегральных температур проведен анализ местоположения их в элементах разбиения бесконечной пластины. Оказалось, что в регулярном режиме для линейных задач теплопроводности местоположение этих точек постоянно во времени и близко к геометрическому центру элементов. Анализ расчетов показал, что местоположение точек среднеинтегральных температур практически не зависит от числа Био. Это качественно подтверждает выбор центрального положения точек для нелинейных задач теплопроводности.

#### РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ САМОБЪИГАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОДА

В качестве расчетной выбрана часть электрода, полученная делением электрода вертикальной плоскостью, проходящей через центр электрода и центр печи. Деление электрода на элементы проведено так, чтобы ребра и обечайка кокуха были выделены в

отдельные элементы. Для каждого элемента электродной массы составляются конечно-разностные уравнения баланса энергии с соседними. Явная схема метода баланса позволяет находить температуру элементов электродной массы в явном виде. Для элементов электродной массы, смежных с элементами кокуха, уравнение баланса энергии принимает следующий вид:

$$\Delta Q_{i,j,k} = \Delta Q_{k,i,j,i,j,k} + \Delta Q_{i,j,k} + \Delta Q_{i,j,i,k} + \Delta Q_{i,j-1,k} + \Delta Q_{i,j,k+1} + \Delta Q_{i,j,k} + \Delta Q_{V,i,j,k} \quad (4)$$

После раскрытия скобок и преобразования уравнения (4) получается расчетная зависимость:

$$T_{i,j,k,n+1} = T_{i,j,k,n} + \frac{\Delta \tau}{c_{i,j,k} M_{i,j,k}} \left( \sum_{m=1}^{m=5} \frac{T_{m,i}}{R_{m,i}} - T_{i,j,k,n} \sum_{m=1}^{m=5} \frac{1}{R_{m,i}} \right) + \frac{\Delta Q_{V,i,j,k} + \Delta Q_{k,i,j,i,j,k}}{c_{i,j,k} M_{i,j,k}} \quad (5)$$

Тепло внутренних тепловыделений кокуха  $\Delta Q_{k,i,j,i,j,k}$  находится в зависимости от местоположения точки экстремума температурной кривой в этом элементе.

В качестве внутренних тепловыделений рассматривается джоулево тепло электрического тока:

$$\Delta Q_{V,i,j,k} = \delta_{i,j,k}^2 \gamma_{i,j,k} \Delta V_{i,j,k} \Delta \tau \quad (6)$$

Плотность тока в элементах разбиения электрода рассчитывается на основе решения дифференциального уравнения электромагнитного поля для проводящей среды. Учет эффекта близости и неравномерных растечек электрического тока проводился на основе работ С.Дунски и В.М.Струнского.

Теплообмен на поверхности электрода рассчитывается с учётом конвективной и лучистой составляющей теплового потока, в зоне контакта "щетка-электрод" - с учетом контактного тепла. На

участке между щеками и сводом печи учитывается неравномерный лучистый теплообмен по периметру электрода.

Для учета влияния обгара на температурное поле самообжигающегося электрода предложена методика экспериментального определения температурной зависимости скорости обгорания боковой поверхности электрода. В соответствии с ней на Ермаковском ферросплавном заводе проведены экспериментальные замеры ширины щелей рабочих концов, вынутых из печи после обломов электродов. Статистическая обработка результатов замеров позволила определить количество массы, удаляемой с поверхности электрода на различных уровнях по его высоте. Используя данные с величине и периодичности перепуска электродов в печь, рассчитана скорость разрушения боковой поверхности электрода. Сопоставление скорости разрушения с распределением температур по высоте рабочего конца электрода позволили получить температурную зависимость скорости разрушения боковой поверхности электрода (рис.1). Расчет количества массы, удаленной с боковой поверхности электрода, проводится по формуле:

$$M_{i,j,k} = M_{i,j,k-1} + K_{i,j,k} \tau_{об} F_{i,j,k} \quad (7)$$

Используя проведенные разработки, был составлен алгоритм расчета трехмерного нестационарного температурного поля самообжигающегося электрода. Особенностью алгоритма является исключение элементов коуха из основной расчетной схемы метода баланса и введение на их месте граничных условий второго рода.

На основе алгоритма составлена программа расчета температурного поля на ЭВМ. Программа написана на алгоритмическом языке СОРТРАП-4 и реализована на ЭВМ серии ЕС.

Зависимость скорости обгорания электрода с боковой  
поверхности от температуры

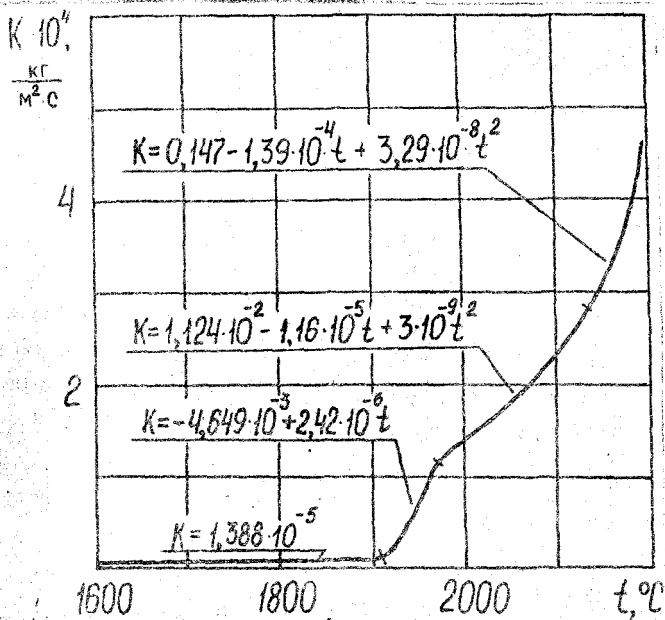


Рис. I

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ

Степень соответствия результатов, получаемых с помощью математической модели, реальному распределению температур в самообжигающемся электроде можно установить только с помощью эксперимента. Существует ряд способов замеров температур в объеме электрода: метод штуцеров, метод проходных термопар, метод переносных термопар. Анализ возможностей этих методов показал, что для оценки адекватности математической модели более других подходит метод переносных термопар. Метод позволяет получать обширную информацию о температурном поле электрода в сравнительно короткие сроки и с достаточной точностью.

Для оценки адекватности модели этим способом проведен эксперимент на одной из действующих печей Ермаковского ферросплавного завода. Были замерены температуры в объеме самообжигающегося электрода диаметром 1900 мм. На одном и том же электроде с периодичностью в одни сутки было проведено три серии замеров температур в объеме электрода. Статистическая обработка результатов замеров показала, что погрешность замера температур, включающая в себя погрешность, вносимую измерительными устройствами, и случайную ошибку эксперимента, не превышает 4%. Построены зависимости температур по высоте электрода (кривые отклика) в характерных точках сечения электрода. Одновременно с замерами температур были получены конструктивные, эксплуатационные и технологические характеристики электрода во время эксперимента. Эти данные приняты в качестве исходных для расчетов с помощью трехмерной математической модели тепловой работы самообжигающегося электрода. Сравнение расчетных и экспериментальных данных проводилось с учетом реального местоположения

способ термомпар и моментов времени замеров. Отличие данных расчета от данных, получаемых на кривой отклика, не превосходит 3%. Такая степень адекватности математической модели достаточна для анализа процессов, протекающих в самообжигающемся электроде.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ  
САМООБИЖАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОДА С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

С помощью модели проанализировано влияние обдувки электрода и конструкции кожуха на температурное поле самообжигающегося электрода. Обдувка электрода влияет на температурное поле участка электрода, расположенного над щелками, и обуславливает высоту зоны жидкой массы. Это существенно, так как высота зоны жидкой массы должна находиться в технологически допустимых пределах.

Основными параметрами обдувки являются температура и расход воздуха. На модели проанализировано влияние этих параметров. Расчеты показали, что при постоянном расходе на обдувку температура участка электрода, расположенного над щелками, практически линейно зависит от температуры обдувочного воздуха. Рациональным оказалось использовать для горячей обдувки температуру воздуха равную  $200^{\circ}\text{C}$ . Эта температура обуславливает значительный тепловой поток на поверхности электрода, не вызывая преждевременного коксования электродной массы. Анализ влияния расхода воздуха показал, что с ростом его скорость изменения температуры электрода растет до определенного предельного значения расхода. Для электрода диаметром 1900 мм предельное значение расхода равно  $3 \text{ м}^3/\text{с}$ . Увеличение расхода воздуха больше этого значения нецелесообразно, так как практически не

0330957

влияет на процесс теплообмена "воздух-электрод". С использованием теории подобия разработана формула для определения предельной скорости воздуха для обдувки электродов любых диаметров.

Расчеты, проведенные на модели, показали, что при обдувке горячим воздухом возрастает температура по всей высоте мантии. Для предотвращения этого недостатка предложен секционный мантиль с подачей горячего дутья в нижнюю секцию. Рассчитаны размеры нижней секции мантии. В этом случае удастся обеспечить необходимую высоту зоны жидкой массы.

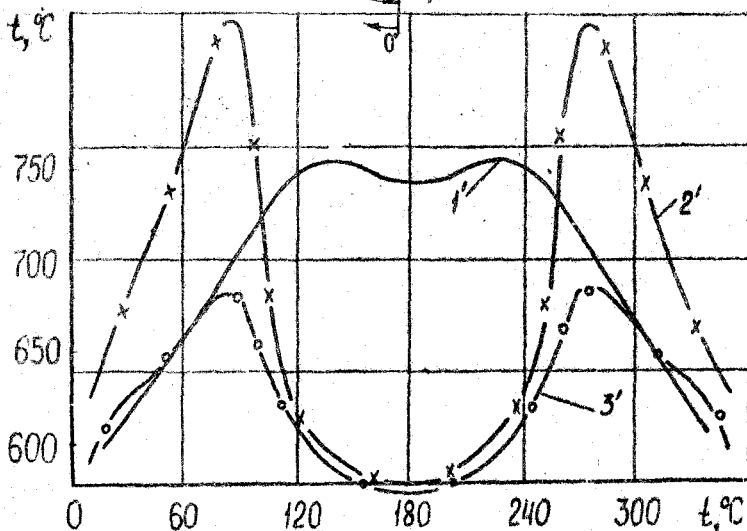
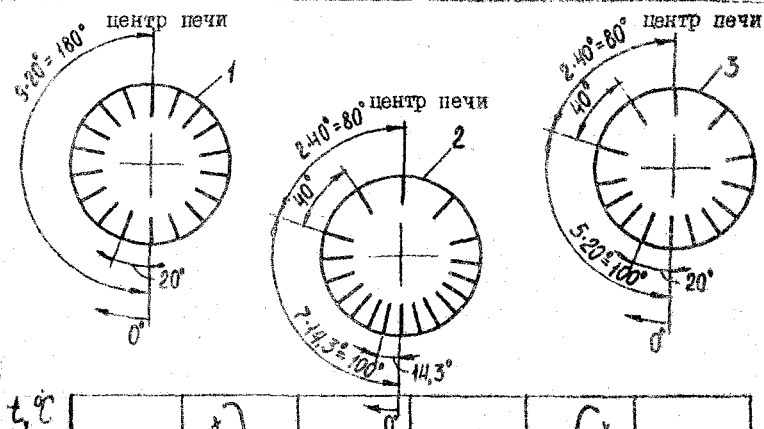
Для экономии тепла, необходимого для создания определенного температурного уровня в верхней части электрода, предложена обдувка электрода воздухом с периодически меняющейся температурой. Это позволяет экономить до 33% тепла на подогрев обдувочного воздуха.

Анализ влияния конструкции кожуха проводился с целью определения возможности выравнивания температуры по периметру электрода.

Было проанализировано влияние переменной по периметру толщины ребер, толщины обечайки, ширины ребер, местоположения ребер. Расчеты показали, что толщина и ширина ребер, толщина обечайки практически не влияют на распределение температур по периметру электрода. Единственным фактором, оказывающим существенное влияние на распределение температур в электроде, является местоположение ребер кожуха. Расчеты показали, что увеличение углового шага ребер на стороне, обращенной к центру печи, по сравнению с шагом ребер, обращенных кнаружи печи, существенно уменьшает перепады температур по периметру электрода в зоне коксования электродной массы (рис. 2). Это способствует уменьшению ее сегрегации, повышению прочности коксованного блока электрода. Увеличение шага ребер на стороне, обращенной к центру печи,



Распределение температуры в электроде диаметром 1,9 м по углу поворота радиуса 0,895 м на уровне 0,05 м ниже щёк



1, 2, 3 - конструкции кожухов; 1', 2', 3' - соответствующие им распределения температур

Рис. 2

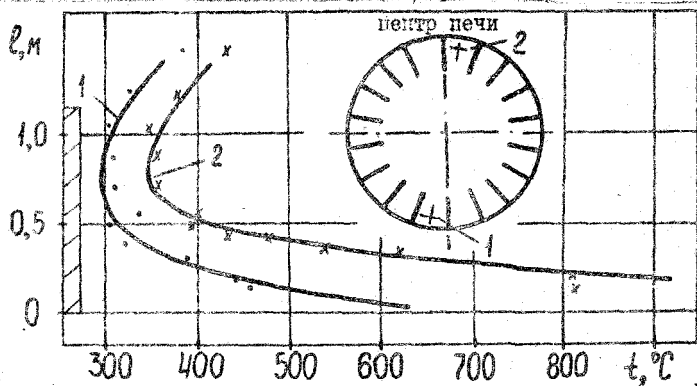
увеличивает размеры секторов углеродистого блока электрода, образованных ребрами. Так как паузы, образующиеся на месте выгоревших ребер, имеют большие размеры на стороне, обращенной к центру печи, то увеличение шага ребер на этой стороне приводит к уменьшению возможности скалывания секторов углеродистого блока. Разработана формула определения углового шага ребер с горячей стороны электрода.

Для подтверждения результатов, полученных с помощью трехмерной математической модели, на Ермаковском ферросплавном заводе был проведен промышленный эксперимент. Исследовался электрод с экспериментальным кожухом, ребра которого располагаются реже со стороны, обращенной к центру печи, чем снаружки. В течение эксперимента были проведены замеры температур в электроде с экспериментальным кожухом и кожухом обычной конструкции (с равномерным распределением ребер), проведена оценка эксплуатационной стойкости электрода с экспериментальным кожухом. Для возможности сопоставления результатов замеры температур проводились на одном и том же электроде на участке с кожухом обычной конструкции и участке с экспериментальным кожухом. Для возможно точной фиксации местоположения горячих сплав термопар замеры температур проводились методом проходных термопар. Замеры проводились одновременно с холодной и горячей стороны электрода.

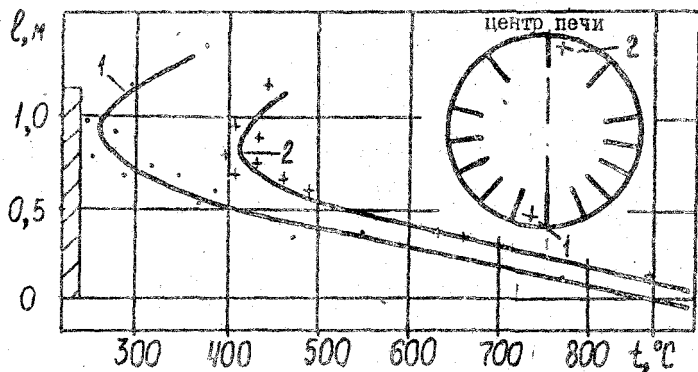
Данные эксперимента показали, что в электроде с кожухом обычной конструкции перепад температур между холодной и горячей стороной электрода увеличивается, начиная от середины высоты щек до нижней кромки их. У нижней кромки перепад температур достигает  $350^{\circ}\text{C}$  (рис. 3).

В электроде с экспериментальным кожухом перепад температур по периметру электрода, начиная от середины высоты контактных щек, остается постоянным и равным  $50^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 3).

Распределение температуры в электроде диаметром 1,9 м по высоте щели в 0,055 м от его поверхности



а



б

а - с кожухом обычной конструкции; б - с кожухом, разработанным с помощью модели; 1 - с холодной стороны электрода; 2 - с горячей стороны

Рис. 3

Уменьшение перепадов температур по периметру привело к заметному повышению эксплуатационной стойкости самообжигающегося электрода.

Рудовосстановительная печь, оснащенная электродами с кожухами разработанной конструкции, признана изобретением и внедрена в цехе № 6 Ермаковского завода ферросплавов. Фактический экономический эффект от внедрения составил 47 тысяч рублей за 1986 год.

## В В В О Д Ы

1. Разработана методика решения трехмерной нестационарной задачи теплопроводности для самообжигающегося электрода с учетом переменных теплофизических характеристик, граничных условий, внутренних тепловыделений, обгара рабочего конца электрода.

2. Разработан методический прием расчета температурных полей тел с тонкими теплопроводными вставками. Он позволяет учитывать локальные тепловые эффекты кожуха самообжигающегося электрода, не вызывая существенного увеличения продолжительности расчета.

3. на основе результатов эксперимента предложена температурная зависимость скорости разрушения рабочего конца электрода. Разработана методика учета влияния обгара рабочего конца электрода на его температурное поле.

4. Проведена разработка алгоритма расчета трехмерного нестационарного температурного поля самообжигающегося электрода с учетом локальных эффектов кожуха и обгара рабочего конца. Математическая модель реализована на ЭВМ серии ЕС.

5. Эксперимент, проведенный на электродах промышленных печей Ермаковского ферросплавного завода, показал хорошее совпа-

дение данных расчета и эксперимента, что позволяет использовать математическую модель для анализа процессов, происходящих в самообжигающихся электродах.

6. Расчеты на математической модели показали, что изменение расхода и температуры воздуха на обдувку электрода влияют на скорость изменения температуры участка электрода, расположенного над щелками. Скорость изменения температуры растет только до определенного предельного значения расхода (скорости) обдувочного воздуха. При значении скорости дутья больше этой величины скорость изменения температуры электрода остается практически постоянной. Определена зависимость предельной скорости воздуха на обдувку электрода от диаметра электрода и температуры обдувочного воздуха.

7. Исследования на модели показали, что на распределение температур в самообжигающемся электроде существенное влияние оказывает местоположение ребер кожуха. Предложена формула для расчета углового шага ребер, способствующего существенному выравниванию температур по периметру электрода и повышению его стойкости.

8. Влияние местоположения ребер кожуха на температурное поле и стойкость электрода подтверждено экспериментально на электродах промышленной печи Ермаковского ферросплавного завода. Рудовосстановительная печь, оснащенная электродами с такими кожухами, признана изобретением и внедрена на Ермаковском ферросплавном заводе. Фактический экономический эффект от внедрения составляет 47 тысяч рублей за 1936 год.

## Условные обозначения:

$n$  - временной индекс;  $i, j, k$  - индексы пространственных координат;  $c$  - удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $q_v$  - удельный тепловой поток внутренних тепловыделений, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_p$  - удельный тепловой поток фазовых переходов в электродной массе, Вт/м<sup>2</sup>;  $\delta$  - толщина вставки, м;  $x$  - расстояние от поверхности вставки (со стороны элемента I) до точки экстремума, м;  $\Delta Q_8$  - количество тепла выделяющееся в элементе кожуха за интервал времени  $\Delta t$ , Дж;  $\Delta Q_1, \Delta Q_2$  - количество тепла, пошедшее к I или 2 элементу электродной массы соответственно, Дж;  $\Delta t$  - шаг расчета во времени, с;  $M$  - масса элемента, кг;  $\delta$  - плотность электрического тока в элементе, А/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  - удальное электро-сопротивление электродной массы, Ом·м;  $\Delta V$  - объем элемента, м<sup>3</sup>;  $K$  - показатель скорости разрушения боковой поверхности электрода, кг/(м<sup>2</sup>с);  $\tau_{об}$  - время обгара элемента, с;  $F$  - поверхность, на которой происходит разрушение элемента, м<sup>2</sup>;  $R$  - тепловое сопротивление, К/Вт.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПУБЛИКОВАНЫ  
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Пашнин С.В. Расчет температурных полей гетерогенных тел с учетом локальных эффектов вставок // Ред. журнала "Известия вузов. Энергетика". - Минск, 1983. - Изд. Библиогр.: 6 назв. - Деп. в ВНИИТИ 26.12.83. - № 7023.

2. Короленко Ю.А., Пашнин С.В. Повышение эксплуатационной стойкости самообжигающихся электродов изменением конструкции кожуха: инф. листок о научно-техническом достижении. - Челябинск: ЦНТИ, 1986. - 4с.

3. А.с. 1302443, МФИ И 05 в 7/09. Рудовоостансвительная

трансформаторная электропечь / Короленко Ю.А., Горбенко В.И., Пашнин С.В. (СССР). - 3872371/24-07; Заявлено 23.01.85; опубл. 07.04.87, Вол. № 13 // Открытия, Изобретения. - 1987. - № 13. - С.248.

4. К оценке теплового влияния ребер кожуха на температурное поле самообжигающегося электрода / Короленко Ю.А., Пашнин С.В., Чискунов А.А., Тимофеев Г.Д. // Известия вузов. Черная металлургия. - № 2. - 1987. - С.33-35.

5. Горбенко В.И., Короленко Ю.А., Пашнин С.В. Объемная математическая модель тепловой работы самообжигающегося электрода, учитывающая обгар его рабочего конца // Тезисы докладов IV Всесоюзного научно-технического симпозиума "Параметры рудовосстановительных электропечей, совершенствование конструктивных элементов и проблемы управления процессами". - М.: Информэлектро. - 1987. - С. 27-28.

6. Дятлов В.И., Короленко Ю.А., Пашнин С.В. Управление температурным полем верхней части самообжигающегося электрода периодическим изменением температуры обдувочного воздуха // Тезисы докладов IV Всесоюзного научно-технического симпозиума "Параметры рудовосстановительных электропечей, совершенствование конструктивных элементов и проблемы управления процессами". - М.: Информэлектро. - 1987. - С. 88-89.

7. Короленко Ю.А., Пашнин С.В. Исследование тепловых процессов, происходящих в самообжигающихся электродах // Тезисы докладов научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в области совершенствования тепловых процессов и новые технологии промышленных установок и ТЭЦ". - Челябинск. - 1987. - С. 15-17.

*Jan*