

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭНЕРГИИ В ОБЪЕМЕ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА
ТРЕХФАЗНОЙ РУДОВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОПЕЧИ**

Аннотация. Предложена математическая модель распределения плотности тока в сечении самообжигающегося электрода, удельной активной мощности в объеме рабочего пространства ванны, напряженности магнитного поля на поверхности свода рудовосстановительной электропечи по методу вторичных источников в форме интегральных уравнений Фредгольма II-го рода с привлечением экспериментальных данных действующих печей.

Ключевые слова: рудовосстановительная электропечь, рабочее пространство ванны электропечи, электрод, метод вторичных источников, потери электроэнергии.

Постановка проблемы. Решение задачи поддержания оптимального шихтового, электродного и электрического режимов конкретного технологического процесса рудовосстановительных электропечей (РВП) обеспечивается выбором оптимальных геометрических параметров ванны печи, электропечного контура и поддержанием рационального электрического режима плавки, что создает необходимое с точки зрения термодинамики распределение вводимой энергии в рабочем пространстве ванны печи.

Анализ последних исследований и публикаций. Данные многолетних исследований коллективом кафедры электротехники НМетАУ (ДМетИ) распределения активной мощности, плотности тока, потенциалов, температур в объеме рабочего пространства ванн действующих промышленных печей, а также лабораторных исследований выломок из рабочего пространства ванн этих же печей, остановленных на капиталь-

ный ремонт, дали возможность сформировать картину строения рабочего пространства ванны печи при выплавке разных сплавов и решить ряд задач по оптимизации их выплавки. Результаты исследований позволили разработать обобщенную схему замещения электрической цепи РВП, что обеспечило возможность эффективного управления электрическим и технологическим режимами работы печи с использованием АСУ ТП [1 - 3].

Известен также ряд математических моделей распределения энергии в объеме ванны, позволяющих прогнозировать его для осваиваемых и проектируемых электропечей [4 - 6].

Цель исследования. Авторами решалась задача разработки математической модели распределения плотности тока в сечении самообжигающегося электрода, удельной активной мощности в объеме рабочего пространства ванны РВП по методу вторичных источников в форме интегральных уравнений Фредгольма II-го рода с привлечением экспериментальных данных действующих печей. Этот метод [7] отличается от других тем, что дает возможность рассматривать различные варианты полей, варьируя геометрическими параметрами печи.

Необходимо отметить, что у метода вторичных источников есть свои недостатки. Например, с увеличением количества зон однородной проводимости в рассчитываемом объеме проводящей среды очень усложняются интегральные уравнения, что влияет на объем вычислительных операций, а это, в свою очередь, иногда вызывает необходимость рационального уменьшения числа зон однородной проводимости.

Приведенная работа представляет собой очередной шаг по использованию данного метода расчета поля рудовосстановительной электропечи. Очередными шагами может быть разработка оптимальной системы интегральных уравнений, введения в расчет вихревой составляющей электромагнитного поля, то есть непосредственно расчет электромагнитного поля.

Основной материал исследования. Структура реакционной зоны рабочего пространства круглой трехэлектродной РВП (например, РКГ-75 фирмы «Танабэ») симметрична оси каждого электрода, поэтому, исходя из условий осевой симметрии рассматривалось меридиальное се-

чение электрода и реакционной зоны с подводом тока через сверхпроводящий контакт электрода, находящегося в неоднородной среде, и отводом через сверхпроводящую ванну сплава (рис.1, а).

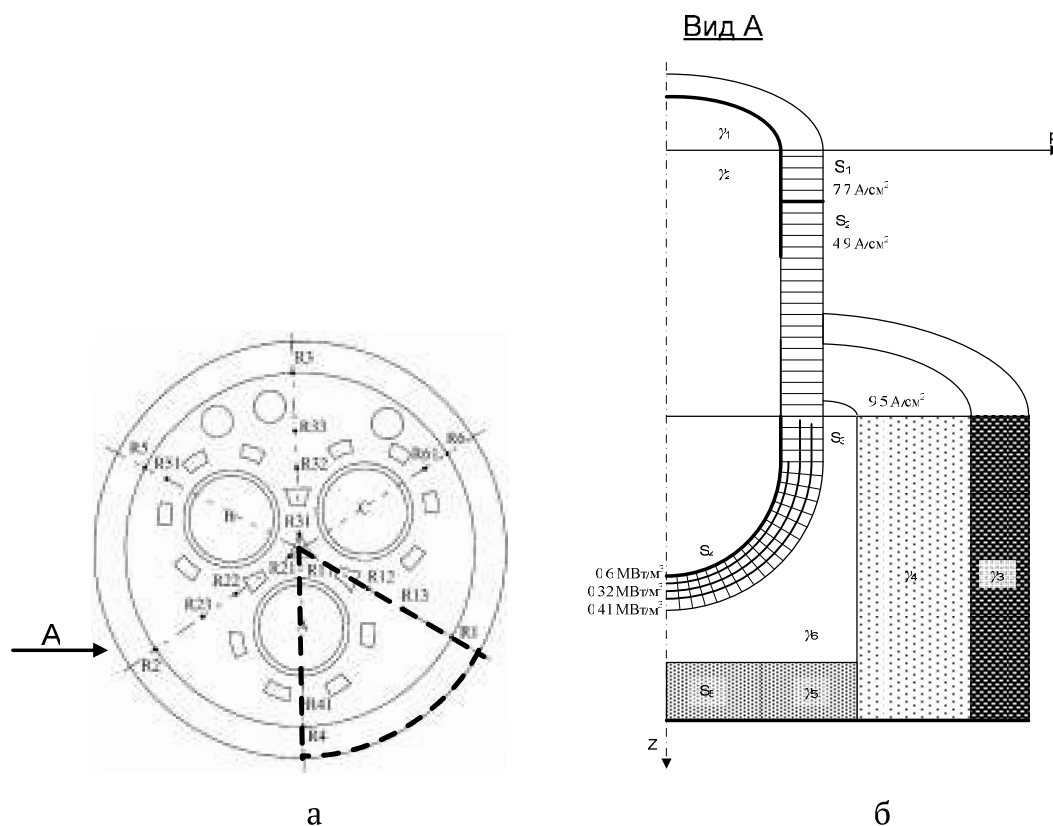


Рисунок 1 – расчетная часть реакционного пространства электропечи (а), результаты моделирования рабочего пространства электропечи РКГ-75 (б)

Возможность создания рациональной картины электромагнитного поля рудовосстановительной электропечи на этапе проектирования является актуальной задачей, которая решает две проблемы: реализацию ведения оптимального металлургического процесса и экономию электроэнергии.

Поверхностный эффект и эффект близости при промышленной частоте проявляется не очень сильно, поле можно рассматривать как квазистационарное, данными эффектами можно пренебречь и рассматривать поле печи, как поле постоянного тока.

Вещества, проводящие ток, неоднородны в объеме ванны по проводимости. Но есть возможность, ориентируясь по температурному по-

лю, выделить в объеме неоднородной ванны ряд зон, в которых проводимость можно считать постоянной.

Если пренебречь дуговыми процессами в ванне печи, можно с достаточной степенью точности рассматривать электромагнитное поле рудовосстановительной электропечи как электрическое поле постоянного тока в кусочно-однородной проводящей среде.

Алгоритм расчета поля плотности тока, удельной активной мощности следующий:

1. Рассчитывают распределение вторичных источников на поверхности раздела сред с разной проводимостью $\gamma_1 \div \gamma_6$

2. По распределению вторичных источников рассчитывается напряженность поля в выбранных точках сечения электрода и рабочего пространства печи.

3. Рассчитывается плотность тока (j_i) и удельная активная мощность в выбранных точках рабочего пространства ванны печи $j = \gamma_i E_i$ и $p_i = \gamma_i E_i^2$.

При расчете полагали, что магнитная проницаемость содержимого ванны соответствует магнитной проницаемости выделенных зон, а геометрия ванны и электродов отвечает в масштабе параметрам ванны действующей печи.

Модель разработана для полусферической формы торца электрода и глубины его погружения в ванну печи 1 м. В работе представлены эпюры распределения плотности тока по сечению электрода и линии равной удельной активной мощности в объеме рабочего пространстве в предположении, что мощность сосредоточена в центре выбранных элементарных площадок сечения ванны. На рис.1, б представлено распределение вышеуказанных величин в симметричном оси электрода объеме ванны электропечи и в сечении электрода.

На точность полученных результатов существенно влияет количество выбранных расчетных точек в выделенных на основе экспериментальных исследований действующих печей зон неоднородности, характерных для конкретного типа сплава.

Анализ показывает, что значения удельных активных мощностей в выделенных расчетных точках и экспериментально полученных в доступных для измерений точках рабочего пространства, например, при выплавке силикомарганца, совпадают с инженерной точностью.

Основными требованиями к эксплуатации печей являются как оптимальное распределение удельной мощности в ванне печи, так и минимальные удельные потери электроэнергии, что достигается на основе рекомендаций, полученных при экспериментальном исследовании действующих электропечей. В связи с этим важную роль в решении этого вопроса играет возможность математического моделирования распределения электромагнитного поля на поверхности свода печи, которое может быть использовано при расчете потерь на стадии проектирования новых и реконструкции действующих электропечей [8].

На основании составленной системы алгебраических уравнений с помощью ПЭВМ, с использованием стандартного программного обеспечения, рассчитаны значения напряженности магнитного поля на поверхности ванны электропечи (рис. 2).

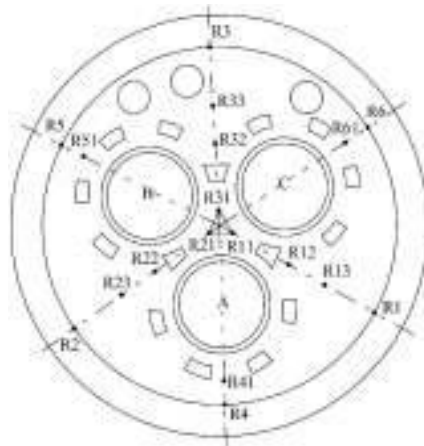


Рисунок 2 - Напряженность магнитного поля на поверхности свода электропечи РКГ-75

Выводы. Практическое использование предлагаемой математической модели при расчете параметров рудовосстановительной печи может выглядеть следующим образом:

1. Определение основных электрических и геометрических параметров печи с помощью известных инженерных методов расчета.

2. Разработка и расчет математической модели проектируемой печи для выявления влияния геометрии ванны на распределение мощности в объеме ванны печи и нахождение оптимального значения диаметра распада электродов и глубины ванны, полагая критерием оптимальности максимальное значение выделяемой мощности в межэлектродном и подэлектродном пространстве ванны печи.

3. Уточнение предварительно рассчитанных геометрических параметров рудовосстановительной печи.

Адекватность математической модели расчета магнитного поля на поверхности свода однородной ванны электропечи оценена путем сравнения с результатами исследований магнитного поля свода действующей печи. Математическая модель может быть использована при реконструкции и проектировании печей, для определения потерь в ее металлоконструкциях на стадии проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьменко С. Н. Определение параметров и характеристик элементов схем замещения ванн рудовосстановительных электропечей / С. Н. Кузьменко, А. В. Николенко. // Сталь. – 2005. – №12. – С. 35–38.

2. Определение оптимальных параметров электрического режима при выплавке ферросиликомарганца / [В. С. Куцин, В. А. Гладких, А. В. Николенко и др.]. // Сталь. – 2009. – №1. – С. 52–54.

3. Selecting the smelting parameters for ferrosilicomagnese on the basis of the electrical characteristics / [V. S. Kutsin, V. A. Gladkikh, A. V. Nikolenko and other]. // Steel in Translation. – 2010. – №40. – С. 56–58.

4. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электротермии / С. А. Ольдзиевский, В. А. Кравченко, В. И. Нежурин, И. А. Борисенко. – Москва: Металлургия, 1990. – 112 с.

5. Миронов Ю. М. Комплексное математическое моделирование энергетических процессов в электрических цепях и ваннах электропечей смешанного нагрева / [Ю. М. Миронов и др.] // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2001. – № 2. – С. 82–90.

6. Левченко С. А. Електромагнітне та теплове поля руднотермічної плавильної печі / С. А. Левченко. // Вісник НТУ«ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2016. – №17. – С. 76–80.

7. Тозони О. В. Расчет трехмерных электромагнитных полей / О. В. Тозони. – Киев: Техника, 1974. – 322 с.

8. Розенберг В. Л. Определение электромагнитных потерь в металлических элементах печи РПЗ-48 / В. Л. Розенберг. // Сб. Труды ВНИИЭТО. – 1972. – №6. – С. 100–105.

REFERENCES

1. Kuzmenko S. N. Opredelenie parametrov i harakteristik elementov shem zamescheniya vann rudovosstanovitelnyih elektropetchey / S. N. Kuzmenko, A. V. Nikolenko. // Stal. – 2005. – №12. – S. 35–38.

2. Opredelenie optimalnyih parametrov elektricheskogo rezhima pri vyiplavke ferrosilikomargantsa / [V. S. Kutsin, V. A. Gladkih, A. V. Nikolenko i dr.]. // Stal. – 2009. – №1. – S. 52–54

3. Selecting the smelting parameters for ferrosilicomagnese on the basis of the electrical characteristics / [V. S. Kutsin, V. A. Gladkikh, A. V. Nikolenko and other]. // Steel in Translation. – 2010. – №40. – С. 56–58.

4. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh poley pechey rudnoy elektrotermii / S. A. Oldzievskiy, V. A. Kravchenko, V. I. Nezhurin, I. A. Borisenko. – Moskva: Metallurgiya, 1990. – 112 s.

5. Mironov Yu. M. Kompleksnoe matematicheskoe modelirovanie energeticheskikh protsessov v elektricheskikh tsepyah i vannah elektropetchey smeshannogo nagreva / [Yu. M. Mironov i dr.] // Trudyi Akademii elektrotehnicheskikh nauk Chuvashskoy Respubliki. – 2001. – № 2. –S. 82–90.

6. Levchenko S. A. Elektromahnitne ta teplove polia rudnotermichnoi plavylnoi pechi / S. A. Levchenko. // Visnyk NTU«KhPI». Serii: Mekhaniko-tehnolohichni systemy ta kompleksy. – 2016. – №17. – S. 76–80.

7. Tozoni O. V. Raschet trehmernyih elektromagnitnyih poley / O. V. Tozoni. – Kiev: Tehnika, 1974. – 322 s.

8. Rozenberg V. L. Opredelenie elektromagnitnyih poter v metallicheskih elementah pechi RPZ-48 / V. L. Rozenberg. // Sb. Trudyi VNIIEТО. – 1972. – №6. – S. 100–105.