УДК 621.365

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОЙ**

**ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ ПЛАВКЕ КУСКОВОЙ ШИХТЫ**

**Кувалдин А.Б., Федин М.А., Перов Р.И.**

*Россия, г. Москва, НИУ «МЭИ»*

*С использованием компьютерного моделирования исследовано изменение электрических характеристик индукционной тигельной печи в начальный период плавки шихты. Получены зависимости мощности в загрузке, коэффициента мощности и электрического КПД от температуры и размеров шихты. Показано влияние наличия крупных кусков шихты на эффективность нагрева.*

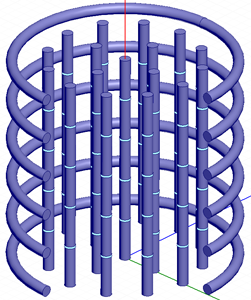
*Ключевые слова: компьютерное моделирование, индукционная тигельная печь, кусковая шихта, электрические характеристики.*

*The topic of this article is to study the changes in the electrical parameters of induction crucible furnace during the initial period of charge melting with help of the computer modeling. The dependences of the heating power, the power factor and the energy conversion efficiency on temperature and size of charge are obtained in this study. The effect of the presence of large pieces of charge on heating efficiency is also shown.*

*Keywords: computer modeling, induction crucible furnace, lumpy charge, electrical parameters.*

при проектировании мощного электротермического оборудования, к которому относятся и индукционные тигельные печи (ИТП), возрастает проблема энергосбережения. С целью сбережения энергии система автоматического управления ИТП должна обеспечивать ввод максимального значения электрической мощности в печь в период расплавления шихты, что позволит ускорить процесс плавки. для реализации системы автоматического управления необходимо разработать и исследовать математическую модель ИТП на стадии плавки кусковой шихты.

В принятой математической модели кусковая шихта (загрузка) представлена в виде совокупности металлических цилиндров (рис. 1), как и в [1, 2], но в отличие от этих работ цилиндры разбиты по высоте, что позволяет учитывать краевые эффекты в системе индуктор – загрузка.



*Рис. 1. Модель системы*

*индуктор – загрузка*

Для расчёта данной системы индуктор – загрузка использована программа *ANSYS Maxwell*, в которой приняты следующие допущения:

- не учитываются теплообменные процессы, возникающие в ходе нагрева;

- температуры всех цилиндров одинаковы;

- загрузка выполнена из немагнитного материала.

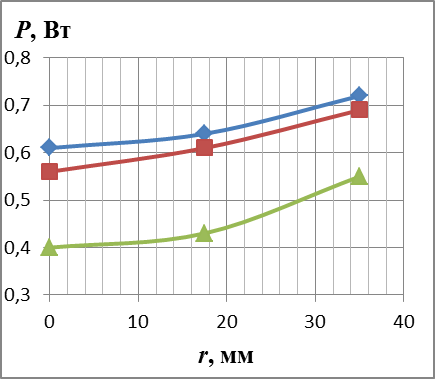
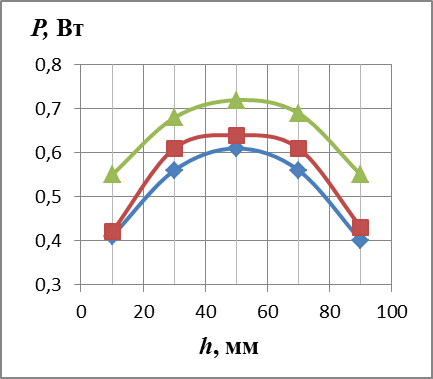
В ходе расчёта получено распределение мощности в цилиндрах в зависимости от их расположения по высоте и радиусу, определены зависимости мощности, коэффициента мощности и электрического КПД системы от температуры и размеров цилиндров.

В расчете приняты следующие параметры (с учетом имеющейся экспериментальной установки частотой 22,5 кГц): ***ток индуктора*** - 210 А;

***индуктор***: внутренний диаметр – 100 мм, высота – 100 мм, число витков – 6, материал – медь;

***цилиндры*** (каждый): диаметр – 5 мм, высота – 20 мм, материал – нержавеющая сталь, общее число цилиндров – 85, расположены в 3 ряда по радиусу и в 5 рядов по высоте.

Рассчитанное распределение мощности в цилиндрах с учетом их расположения в индукторе показано на рис. 2 *а*, *б*. Цифрами **I**, **II**, **III** (рис. 2 *а*) показаны графики для центрального, среднего и крайнего рядов цилиндров соответственно. Расчёты показали, что разница мощностей, выделяющихся в центральном и крайнем цилиндре, может достигать 35%. Это значение можно уменьшить до 15–20%, если уменьшить высоту загрузки до соотношения ее высоты и высоты индуктора, равного 0,8.



*а) б)*

*Рис. 2. Распределение мощности в цилиндрах по высоте (а) и по радиусу (б)*

**I**

**II**

**III**

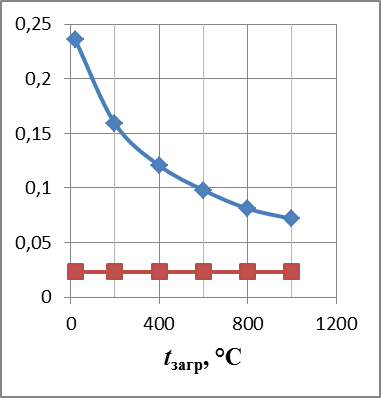
h= 90 мм

h= 70 мм

h= 50 мм

Из картины распределения мощности по радиусу (рис. 2 *б*) видно, что наибольшее выделение мощности происходит в ближайших к индуктору цилиндрах, так как электромагнитное поле ослабевает к оси системы.

Зависимости cos φ и ηэл от температуры показаны на рис. 3. Снижение значения ηэл при нагреве можно объяснить тем, что с ростом температуры увеличивается удельное электрическое сопротивление цилиндров и, следовательно, глубина проникновения электромагнитной волны в загрузку. В данном случае это приводит к тому, что цилиндры становятся более прозрачными для электромагнитных волн, из-за чего мощность тепловыделения в них падает. Практически постоянный cos φ можно объяснить тем, что металлические цилиндры занимают небольшую часть объёма внутри индуктора и их вклад в общее сопротивление системы индуктор – загрузка незначителен.

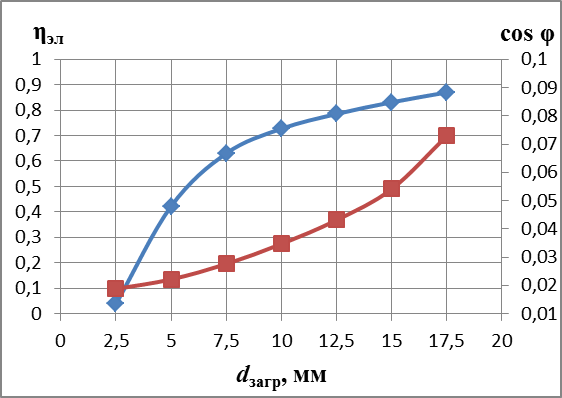


*Рис. 3. Зависимости*

cos φ *и* η*эл от температуры*

Эл. КПД

cos φ



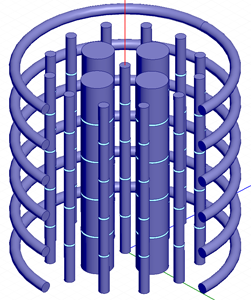
*Рис. 4. Зависимости*

cos φ *и* η*эл от размера цилиндров*

Эл. КПД

cos φ

На рис. 4. показаны зависимости cosφ и ηэл от диаметра цилиндров. Видно, что с увеличением диаметра цилиндров улучшаются энергетические характеристики системы индуктор – загрузка, т.е. чем большим будет размер кусков загружаемой в индуктор шихты, тем эффективнее будет осуществляться нагрев. Однако в реальности далеко не всегда есть возможность заполнить тигель печи большими кусками шихты. В таких случаях зачастую используют так называемые «концентраторы выделения мощности». На практике они представляют собой несколько крупных кусков шихты, пространство между которыми заполняется мелкой шихтой.



*Рис. 5. Модель системы индуктор – загрузка с концентраторами выделения мощности*

Также проведено исследование влияния наличия концентраторов выделения мощности (крупных кусков шихты) на энергетический баланс установки. Концентраторы (4 штуки) представлены в виде цилиндров с диаметром 15, 20 и 25 мм и размещенных между цилиндрами диаметра 5 мм, как показано на рис. 5.

Влияние концентраторов на нагрев показано в табл. 1.

***Таблица 1. Зависимость полезной мощности и* cos φ *от наличия концентраторов тепловыделения.***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Диаметр  концентраторов, мм | Мощность в  загрузке *Р*2, Вт | cosφ | ηэл |
| 5  без концентраторов | 52 | 0,023 | 0,236 |
| 15 | 287 | 0,030 | 0,631 |
| 20 | 422 | 0,035 | 0,715 |
| 25 | 546 | 0,041 | 0,765 |

По результатам исследования можно получить регрессионные уравнения зависимости электрических параметров системы индуктор – загрузка от температуры на начальном этапе плавки кусковой шихты, которые могут быть использованы при построении и анализе системы автоматического регулирования режима работы ИТП.

Список литературы

1. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – 2-е изд., перераб. и доп., М.: Энергия, 1965. – 552 с.
2. Кувалдин А.Б., Федин М.А., Алфёрова Е.С. Математическое моделирование индукционной тигельной печи с кусковой загрузкой. // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век [Текст] / – Орёл: Госуниверситет-УНПК, 2014. – С. 58–60.

**Кувалдин Александр Борисович**, д-р техн. наук, профессор кафедры АЭТУС, НИУ «МЭИ».

[kuvaldinab@mpei.ru](mailto:kuvaldinab@mpei.ru)

**Федин Максим Андреевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры АЭТУС, НИУ «МЭИ».

[fedinma@mpei.ru](mailto:fedinma@mpei.ru)

**Перов Роман Игоревич,** студент кафедры АЭТУС, НИУ «МЭИ».

[perovri@mpei.ru](mailto:perovri@mpei.ru)