

УДК 621.365.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-91-100

## Электротепловая модель и режимы работы индукционной тигельной печи с проводящим ферромагнитным тиглем

М.А. Федин, А.Б. Кувалдин, А.О. Кулешов, С.В. Ахметьянов, С.С. Кондрашов

Разработана нелинейная математическая модель, основанная на методе конечных элементов, для расчета электрических и тепловых характеристик индукционной тигельной печи с проводящим ферромагнитным тиглем. Изучены электрические характеристики печи в зависимости от частоты, температуры и тока индуктора. Решена нестационарная тепловая задача. Математическая модель реализована в пакете ELCUT.

Выделены и исследованы три режима работы печи, характерных для плавки металлов: холодный, когда температура ферромагнитного тигля ниже температуры точки Кюри ( $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а загруженный в него металл представляет кусковую шихту; переходный, когда температура тигля ниже точки Кюри, а металл внутри жидкий; горячий, когда температура тигля выше точки Кюри, а тигель немагнитный. Получены зависимости активного сопротивления и индуктивности системы «индуктор – нагрузка» от частоты, температуры и тока в среде Simulink/Matlab.

Разработан экспериментальный стенд, состоящий из индукционной тигельной печи с ферромагнитным проводящим стальным тиглем, высокочастотного регулируемого транзисторного источника питания, микропроцессорной системы управления и системы сбора данных. Проведен эксперимент на лабораторной печи со стальным тиглем с нагрузкой из алюминиевого сплава. Результаты эксперимента хорошо совпадают с результатами математического моделирования, что подтверждает адекватность математической модели.

*Ключевые слова:* индукционная тигельная печь, ферромагнитный проводящий тигель, электротепловая модель, электрические характеристики.

*Для цитирования:* Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Ахметьянов С.В., Кондрашов С.С. Электротепловая модель и режимы работы индукционной тигельной печи с проводящим ферромагнитным тиглем // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 91—100. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-91-100.

## The Electrothermal Model and Operating Modes of an Induction Crucible Furnace with a Conducting Ferromagnetic Crucible

M.A. Fedin, A.B. Kuvaldin, A.O. Kuleshov, S.V. Akhmet'yanov, S.S. Kondrashov

A non-linear mathematical model intended for calculating the electrical and thermal characteristics of an induction crucible furnace with a conducting ferromagnetic crucible is developed using the finite element method. The furnace electrical characteristics as functions of the inductor frequency, temperature, and current are studied. The non-stationary thermal problem is solved. The mathematical model has been implemented in the ELCUT software package.

Three furnace operation modes typical for melting of metals are identified and investigated: cold, in which the ferromagnetic crucible temperature is below the Curie point ( $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), and the metal loaded into the crucible is in the form of lump charge; transitional, in which the crucible temperature is below the Curie point, and the metal inside the crucible is in liquid state; and hot, in which the crucible temperature is above the Curie point, and the crucible is in nonmagnetic state.

The resistance and inductance of the “inductor–charge” system as functions of the frequency, temperature and current are obtained in the Simulink/Matlab environment.

An experimental bench consisting of an induction crucible furnace with a ferromagnetic conducting steel crucible, a high-frequency adjustable transistor power supply, a microprocessor control system, and a data acquisition system is developed. An experiment on a laboratory furnace equipped with a steel crucible and with an aluminum alloy charge was carried out. The experimental results are in good agreement with the mathematical simulation results, which confirms adequacy of the mathematical model.

*Key words:* induction crucible furnace, ferromagnetic conducting crucible, electrothermal model, electrical characteristics.

*For citation:* Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Kuleshov A.O., Akhmet'yanov S.V., Kondrashov S.S. The Electrothermal Model and Operating Modes of an Induction Crucible Furnace with a Conducting Ferromagnetic Crucible. Bulletin of MPEI. 2019;5:91—100. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-91-100.

## Введение

Индукционные тигельные печи с проводящим тиглем используются для плавки цветных металлов и сплавов, к которым предъявляются особые требования по чистоте, однородности и точности химического состава, позволяют проводить плавку металлов и сплавов, обладающих низкими значениями удельного электрического сопротивления, с высокой энергоэффективностью.

В промышленности применяются индукционные тигельные печи с проводящим немагнитным графитовым тиглем для плавки меди, золота, серебра, других металлов и сплавов и проводящим ферромагнитным стальным тиглем для плавки магния [1 — 6]. Индукционные тигельные печи с графитовым тиглем, обладающим стабильным и высоким значением удельного электрического сопротивления, позволяют увеличить электрический КПД установки при плавке металлов с относительно небольшими значениями удельного электросопротивления. Индукционные тигельные печи со стальным тиглем нужны для плавки магния и его сплавов, поскольку данный тигель не вступает в химические соединения с ними, а кроме того использование стального тигля увеличивает электрический КПД и  $\cos\phi$  при плавке кусковой немагнитной шихты, обладающей относительно низким удельным электросопротивлением. Магний и его сплавы выплавляются под слоем флюса в связи с их высокой химической активностью.

В индукционной тигельной печи с проводящим тиглем в электромагнитном поле нагревается как тигель, так и загрузка, если она электропроводна, и глубина проникновения тока в материал тигля превышает толщину стенки тигля [7 — 8].

В публикации [9] разработана методика электрического расчета индукционной тигельной печи с немагнитным графитовым проводящим тиглем, вычислены и исследованы электрические и энергетические характеристики. Расчет индукционной тигельной печи с ферромагнитным проводящим тиглем представляет более сложную нелинейную задачу, поскольку относительная магнитная проницаемость стали зависит как от температуры, так и от напряженности магнитного поля. Ее решение этой и создание электротепловой модели позволит изучить режимы работы печи в зависимости от температуры тигля и расплавляемого металла, сформулировать требования, предъявляемые к системе управления, повысить энергоэффективность установки в целом.

## Постановка задачи

На рисунке 1 дан эскиз системы «индуктор — загрузка» печи для плавки магния. Загрузку индукционной тигельной печи с проводящим тиглем образуют стальной тигель и магний.

Основная сложность расчета индукционной тигельной печи с ферромагнитным проводящим тиглем

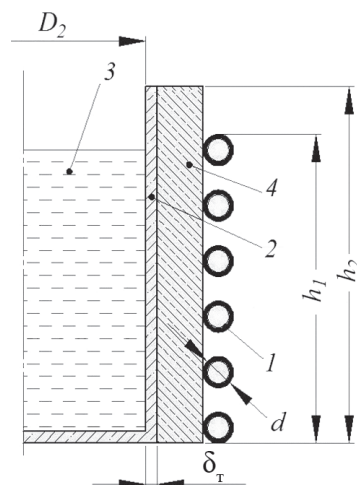


Рис. 1. Эскиз системы «индуктор — загрузка»: 1 — индуктор; 2 — тигель; 3 — жидкий металл; 4 — теплоизоляция

состоит в том, что электрические характеристики материала загрузки (тигля) меняются в зависимости от температуры  $t$  и напряженности магнитного поля  $H$  [10]. Магнитная проницаемость составляет  $\mu = \mu(H, t)$ , а удельное электросопротивление —  $\rho = \rho_2(t)$ . Выделим три характерных режима работы печи (табл. 1).

Таблица 1

## Режимы работы печи

Режим плавки	Магнитная проницаемость $\mu$	Состояние шихты
Холодный	$\mu > 1$	Кусковая
Переходный		Расплавленная
Горячий	$\mu = 1$	

В холодном режиме работы печи до температуры плавления загрузка представляет собой однослойное проводящее тело. Поскольку электромагнитная волна (ЭМВ) практически полностью затухает в стенке тигля, магний в тигле находится в виде кусковой шихты, обладающей высоким электрическим сопротивлением и практически не подверженной индукционному нагреву. В переходном режиме работы печи и  $\delta_r/\Delta_{2r} \leq (2 - 3)$ , где  $\Delta_{2r}$  — глубина проникновения электромагнитной волны в стенку тигля толщиной  $\delta_r$ , загрузку можно считать двухслойным проводящим телом. В горячем режиме из-за потери стальным проводящим тиглем ферромагнитных свойств глубина проникновения тока в материал тигля существенно возрастает, и эффект индукционного нагрева двухслойного проводящего тела выражен ярко. При этом из-за жидкого расплава, удельное электросопротивление которого существенно ниже, чем у тигля, появляется обратная электромагнитная волна, отраженная от границы соприкосновения тигля с расплавом, приводящая к изменению пара-

метров электромагнитного поля в стенке тигля. В результате мощность тепловыделения в тигле, активное сопротивление и индуктивность системы «индуктор — нагрузка» существенно снижаются [11].

Аналитическое решение задачи электрического расчета индукционной тигельной печи с ферромагнитным проводящим тиглем во всех режимах работы довольно сложно, поэтому стоит использовать численные методы.

Основными проблемами в области автоматизации печи являются: контроль температуры расплава металла, поддержание заданной мощности во время плавки, ограничение выходного тока источника питания, автоматическое согласование параметров индуктора и преобразователя частоты с высоким быстродействием и точностью без применения обмоточных элементов и усложнения конструкции индуктора. Для их решения требуется применение современных методов проектирования, которые, в свою очередь, нуждаются в разработке соответствующих электротепловых моделей индукционной тигельной печи.

**Методика расчета электрических и тепловых характеристик индукционной тигельной печи с ферромагнитным проводящим тиглем**

Электротепловая задача расчета электрических и тепловых характеристик, алгоритм решения которой в общем виде представлен на рис. 2, является связанной. Результаты расчета магнитного поля переменных токов служат исходными данными для решения задачи нестационарной теплопередачи.

В алгоритм в случае расчета холодного и переходного режимов входят следующие нелинейности: удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , относительная магнитная проницаемость  $\mu$ , зависимость индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$  в электрической задаче, теплопроводность  $\lambda$ , удельная теплоемкость  $c$  (при решении тепловой задачи). Соответственно, алгоритм на рис. 2 содержит двукратный итерационный цикл.

В случае расчета горячего режима, когда тигель немагнитный, а металл жидкий, внутренний цикл в алгоритме не требуется, поскольку электрическая задача линейна.

Для решения электротепловой задачи разработана математическая модель с использованием метода конечных элементов в пакете ELCUT. На рисунке 3 показана расчетная область, поделенная на конечные элементы. Модель позволяет, меняя свойства блоков, проводить расчеты для всех режимов работы печи. На оси симметрии (Гр. 1 Э, рис. 3) задается граничное условие Неймана  $dH/dr = 0$  (отсутствие тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля), на внешних границах (Гр. 2, 3, 4 Э) — нулевое граничное условие Дирихле  $A = 0$  (полагается равным нулю значение магнитного потенциала, т. е. поле локализовано в пределах расчетной области).

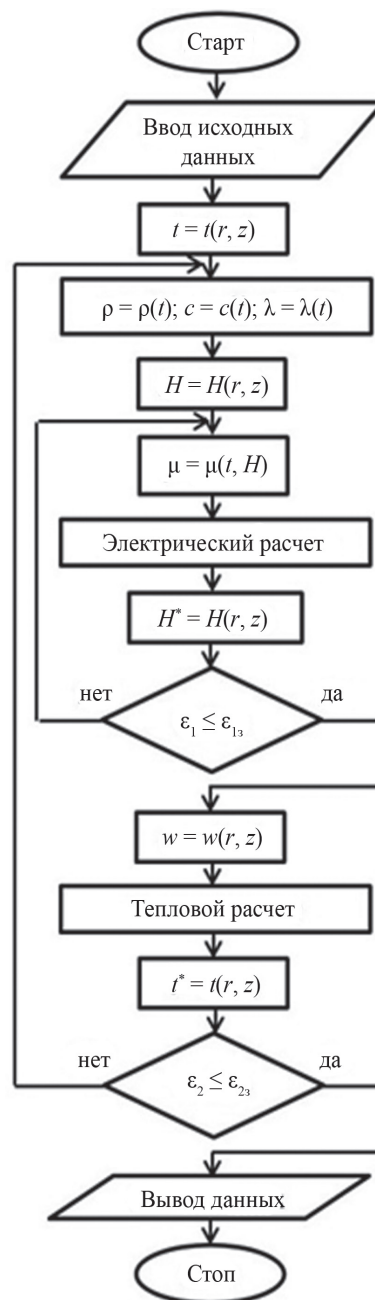


Рис. 2. Алгоритм решения электротепловой задачи

Допущения и ограничения электрической задачи:

- расчетная область ограничена тремя радиусами системы «индуктор — нагрузка» по оси  $r$  и двумя радиусами системы «индуктор — нагрузка» по оси  $z$ ;
- при расчете холодного режима не учитывалось наличие кусковой загрузки в тигле, т. е. принималось, что тигель полностью непрозрачен для ЭМВ [9];
- система «индуктор — нагрузка» цилиндрическая и осесимметрична;
- магнитная проницаемость  $\mu$  меняется скачком при температуре точки Кюри (в действительности она изменяется плавно — примерно с 650 °С уже начинает снижаться).

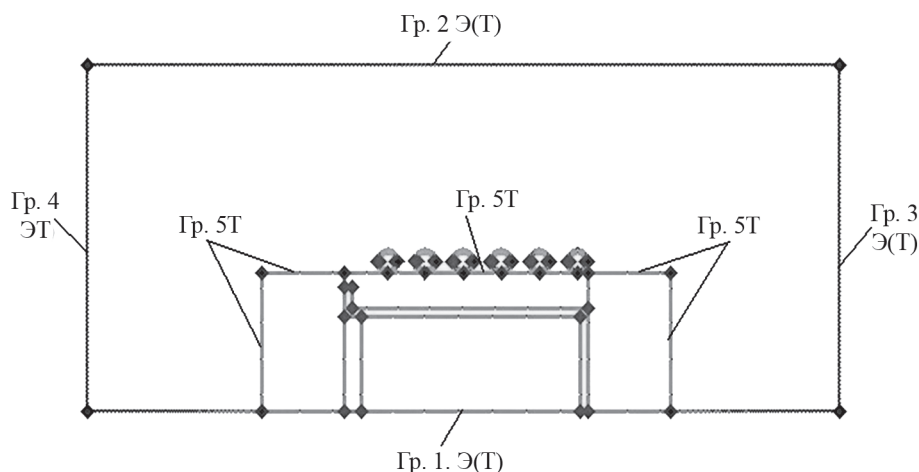


Рис. 3. Геометрическая модель в пакете ELCUT для расчета магнитного поля переменных токов (электрическая задача) и нестационарной теплопередачи (тепловая задача)

Допущения и ограничения тепловой задачи:

— расчетная область ограничена тремя радиусами системы «индуктор — загрузка» по оси  $r$  и двумя радиусами системы «индуктор — загрузка» по оси  $z$ ;

— при решении тепловой задачи не учитывается излучение внутри печи.

Анализ магнитного поля переменных токов состоит в расчете электрического и магнитного полей, возбужденных приложенными синусоидально изменяющимися во времени токами или внешним полем.

Изменение поля во времени предполагается синусоидальным, все компоненты и электрические токи меняются как:

$$z = z_0 \cos(\omega t + \varphi_z),$$

где  $z_0$  — амплитудное (максимальное) значение  $z$ ;  $\varphi_z$  — фазовый угол;  $\omega$  — угловая частота.

Полный ток в проводнике может рассматриваться как сумма стороннего тока, вызванного приложенным извне напряжением, и вихревого тока, индуцированного переменным магнитным полем:

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_{\text{стор}} + \mathbf{j}_{\text{вихр}}.$$

Сформулируем задачу как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции).

Вектор магнитной индукции лежит в плоскости модели ( $xz$  или  $zr$ ), в то время как вектор плотности электрического тока  $\mathbf{j}$  и векторный магнитный потенциал  $\mathbf{A}$  ортогональны к нему:

$$\mathbf{B}_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mathbf{A}; \quad \mathbf{B}_r = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z}.$$

Запишем уравнение для осесимметричного случая:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r \mu_r} \frac{\partial}{\partial r} r \mathbf{A} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_z} \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{A} \right) - i \omega \gamma \mathbf{A} = -j_{\text{стор}}.$$

Решение нелинейной электрической задачи для холодного и переходного режимов плавки в ELCUT осуществляется методом Ньютона–Рафсона, известным

как метод касательных. Это итерационный численный способ нахождения корня (нуля) заданной функции. Поиск решения происходит путем построения последовательных приближений и основан на принципах простой итерации. Метод обладает квадратичной сходимостью. Линейная электрическая задача для горячего режима решается с использованием итерационного метода сопряженных градиентов с предобуславливанием матрицы по методу декомпозиции области. Ускорение процесса вычисления достигается за счет согласования необходимой точности решения линейной задачи с предварительной оценкой точности, которая может быть достигнута с использованием указанного метода [12].

Физические параметры электрической задачи, описываемые функциональными зависимостями, задаются в виде таблиц. Для представления удельного электрического сопротивления  $\rho$  используется его обратная величина — удельная проводимость  $\gamma = 1/\rho$ . Поскольку электропроводность используемых материалов зависит от температуры  $\gamma = \gamma(T)$ , то вводится в таком случае таблично и автоматически аппроксимируется сплайном. Для задания магнитной проницаемости  $\mu$  следует задать кривую намагничивания вместо постоянной магнитной проницаемости, так как материал тигля нелинеен и меняет свои магнитные свойства при колебании температуры. Кривая намагничивания задается в виде табличной зависимости индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ .

При решении нестационарной тепловой задачи используется уравнение теплопроводности:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t},$$

где  $T$  — температура;  $t$  — время;  $\lambda(T)$  — теплопроводность, как функция температуры, представленная кубическим сплайном;  $q$ ,  $c(T)$  — удельные мощность тепловыделения и теплоемкость, задаваемые кубическим сплайном функции температуры;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление.

На внешних границах расчетной области (Гр.2 — 4 Т, рис. 3) вводится известное значение температуры  $T_0$ , т. е. граничное условие первого рода, а на плоскости симметрии — граничное условие второго рода (Гр.1 Т, рис. 3):

$$F_n = -q_s,$$

где  $F_n$  — нормальная компонента вектора плотности теплового потока;  $q_s$  — тепловой поток через границу.

На внешних границах пода, свода и боковой стенки (теплоизоляции тигля) задается граничное условие конвекции, которое называют граничным условием третьего рода (Гр. 5 Т), описывающее конвективный теплообмен:

$$F_n = \alpha(T - T_0),$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $T_0$  — температура окружающей среды.

Физические параметры тепловой задачи задаются так же, как и для электрической — таблично. Теплопроводность, как функция температуры, описывается кривой  $\lambda = \lambda(T)$ . Для переходных процессов вводят теплоемкость в виде температурной зависимости  $c = c(T)$  и плотность материала, как постоянную величину.

**Примеры расчета индукционной тигельной печи повышенной частоты**

С использованием разработанной методики выполнен расчет для лабораторной печи для плавки магния мощностью 2,5 кВт со следующими размерами: диаметр и высота тигля  $d_2 = 64$  мм,  $h_2 = 90$  мм; толщина стенки  $\delta_\tau = 3$  мм; высота индуктора  $h_1 = 78$  мм. Емкость

тигля — 0,5 кг, материал — ферромагнитная сталь 20. На рис. 4 изображен график зависимости  $B(H)$  для стали 20, по которому в пакете ELCUT формируется таблица для дальнейших вычислений.

С использованием разработанной методики расчета в качестве примера на рис. 5 показаны зависимости активного сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$  системы «индуктор — нагрузка» от  $t$  при разных частотах  $f$ , полученные в пакете ELCUT при токе индуктора  $I_1 = 50$  А и среднем значении  $H$  на внешней поверхности тигля  $H = 7,7$  кА/м.

В ходе теоретического исследования установлено, что в горячем режиме после достижения точки Кюри, когда тигель теряет свои магнитные свойства и резко снижает

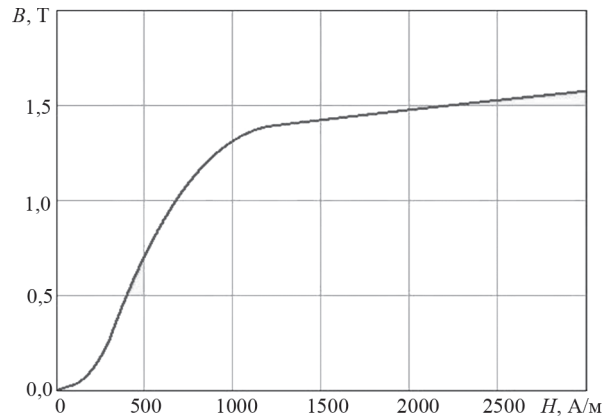


Рис. 4. Зависимость индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$  для стали 20

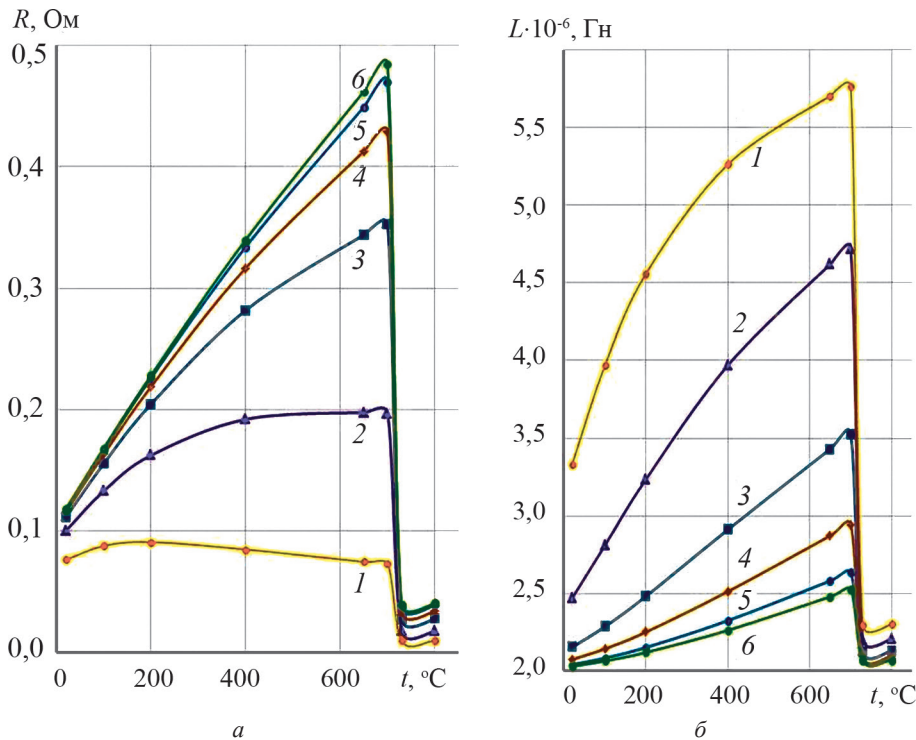


Рис. 5. Графики зависимостей активного сопротивления  $R$  (а) и индуктивности  $L$  (б) от температуры  $t$  при токе  $I = 50$  А для следующих частот  $f$ :

1 — 10 кГц; 2 — 22 кГц; 3 — 44 кГц; 4 — 66 кГц; 5 — 88 кГц; 6 — 100 кГц

ется активное сопротивление системы «индуктор — нагрузка», происходит значительное падение мощности тепловыделения в тигле при одинаковых токе индуктора и частоте. Это объясняется тем, что после точки Кюри глубина проникновения в тигель существенно увеличивается, и нагрузка становится двухслойной. Например, глубина проникновения ЭМВ в стенку тигля толщиной 3 мм на частоте тока индуктора 22 кГц составляет около 3,2 мм, поэтому появляется обратная ЭМВ [9].

Полученные зависимости  $R$  и  $L$  можно использовать для построения структурной модели индукционной установки повышенной частоты.

На рисунке 6 даны зависимости  $R$  и  $L$  от  $f$  и  $T$  для тока  $I = 50$  А в виде поверхностей, построенных с помощью блока Lookup Table n-D в среде Simulink/Matlab.

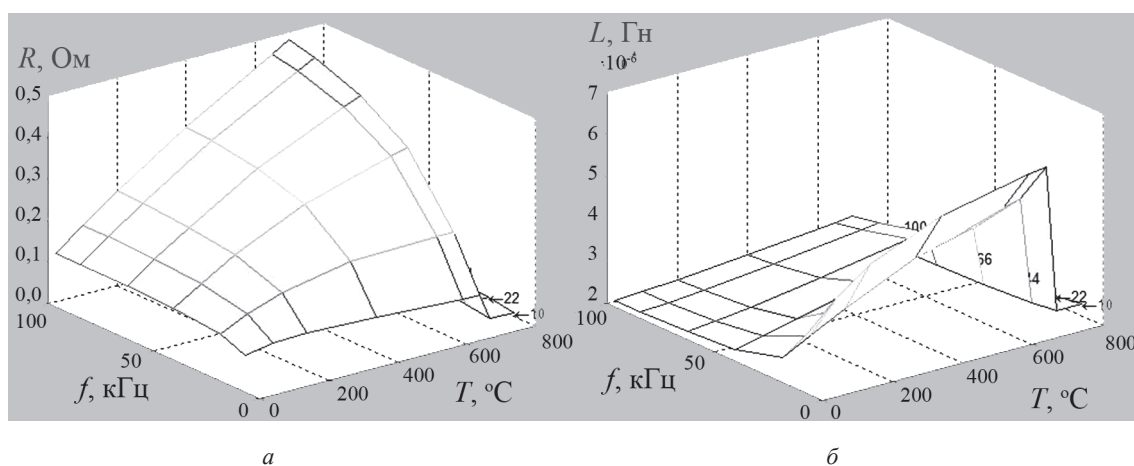


Рис. 6. Графики зависимостей активного сопротивления  $R$  (а) и индуктивности  $L$  (б) от температуры  $T$  и частоты  $f$  при токе  $I = 50$  А

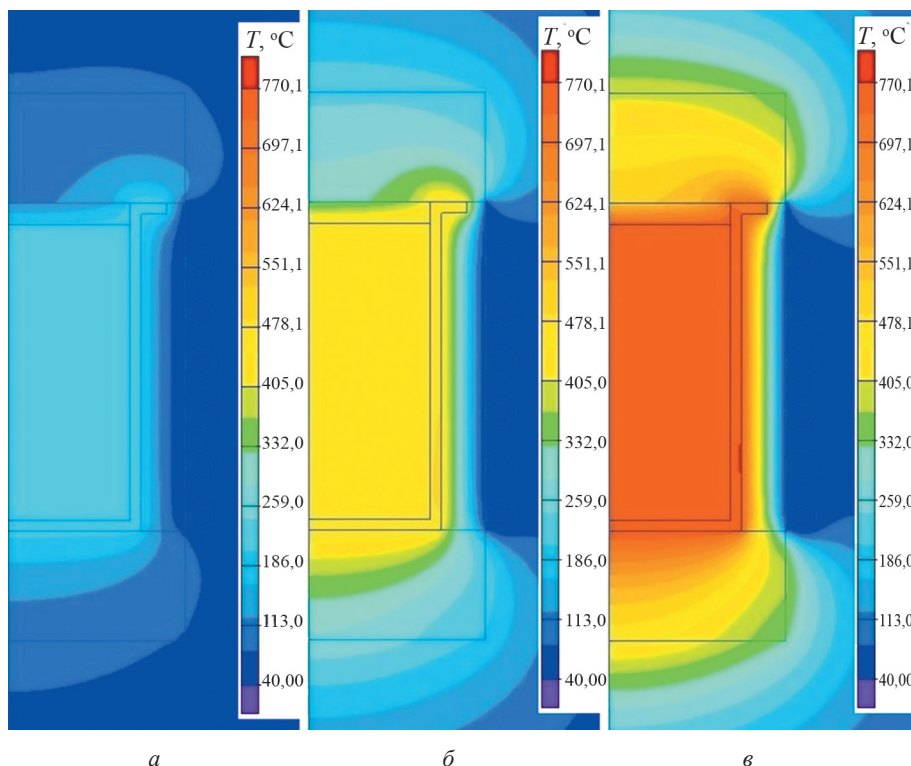


Рис. 7. Температурное поле в начале (а), середине (б) и конце (в) плавки (время — 200, 500 и 900 с)

На рисунке 7 изображены рассчитанные распределения температуры печи на разных стадиях плавки: в начале, когда магний твердый (холодный режим), в середине (переходный режим) и в конце плавки, когда магний полностью расплавлен (горячий режим).

### Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности полученной математической модели проведена экспериментальная верификация на лабораторно-промышленном стенде на базе индукционной тигельной печи с проводящим тиглем, имеющемся на кафедре электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ» (рис. 8). Для проведения экспериментальных исследо-

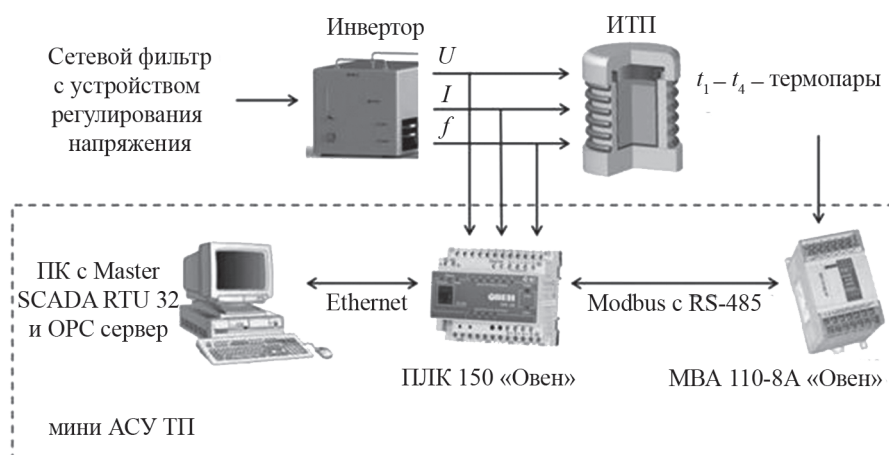


Рис. 8. Функциональная схема лабораторного стенда

ваний подготовлены стальной тигель из конструкционной стали и алюминиевые заготовки, имитирующие кусковую шихту в виде стержней (рис. 9, а). Четыре термопары установлены следующим образом:  $t_1, t_2$  — в теплоизоляции пода и свода печи;  $t_3$  — в центре тигля в загрузке (между алюминиевыми стержнями);  $t_4$  — на внешней стенке тигля. Поскольку магний на открытом воздухе окисляется и воспламеняется, принято решение заменить его схожим с ним по всем электрофизическим и теплофизическим свойствам металлом — алюминием. Геометрия тигля и загрузки полностью совпадают с геометрической моделью при математическом моделировании (рис. 9, б). В таблице 2 даны результаты проведенных электрических расчетов и эксперимента.

Из данных табл. 2 следует, что результаты расчета в программе ELCUT для алюминия отличаются от результатов для магния не более чем на 0,25%. При этом результаты эксперимента для алюминия хорошо совпадают с результатами расчета для магния, максимальное отклонение — не более 10%.

При сравнении экспериментальной и теоретической кривых нагрева (рис. 10) установлено, что максимальная разность кривых нагрева составляет не более 65 °С в середине плавки. Разница объясняется разли-

чием электрофизических свойств загрузки в расчете и эксперименте (использованы магний и алюминий), неучетом дискретности загрузки в расчете, а также погрешностью измерения температуры тигля и расплава.

**Заключение**

Установлено, что величина отношения  $\delta_t/\Delta_2$  является основным фактором, влияющим на величину активного сопротивления  $R$  и индуктивность  $L$  системы «индуктор — загрузка». В холодном и переходном ре-



Рис. 9. Материалы для эксперимента (а) и процесс плавки (б)

Таблица 2

**Сравнение результатов эксперимента и электрического расчета**

Параметры	Эксперимент (алюминий)			Расчет в ELCUT					
				Алюминий			Магний		
Температура $t$ , °С	27,3	400	700	27	400	700	27	400	700
Ток индуктора $I_1$ , А	73,9	71,0	68,8	73,9	71,0	68,8	73,9	71,0	68,8
Напряжение индуктора $U_1$ , В	22,5	25,2	25,4	26,1	38,4	42,0	26,1	38,5	42,1
Частота $f$ , кГц	21,34	19,25	18,73	21,34	19,25	18,73	21,34	19,25	18,73
Мощность в загрузке $P$ , Вт	581	902	857	542	870	764	542	871	765
cosφ	0,27	0,32	0,28	0,28	0,34	0,30	0,28	0,33	0,29

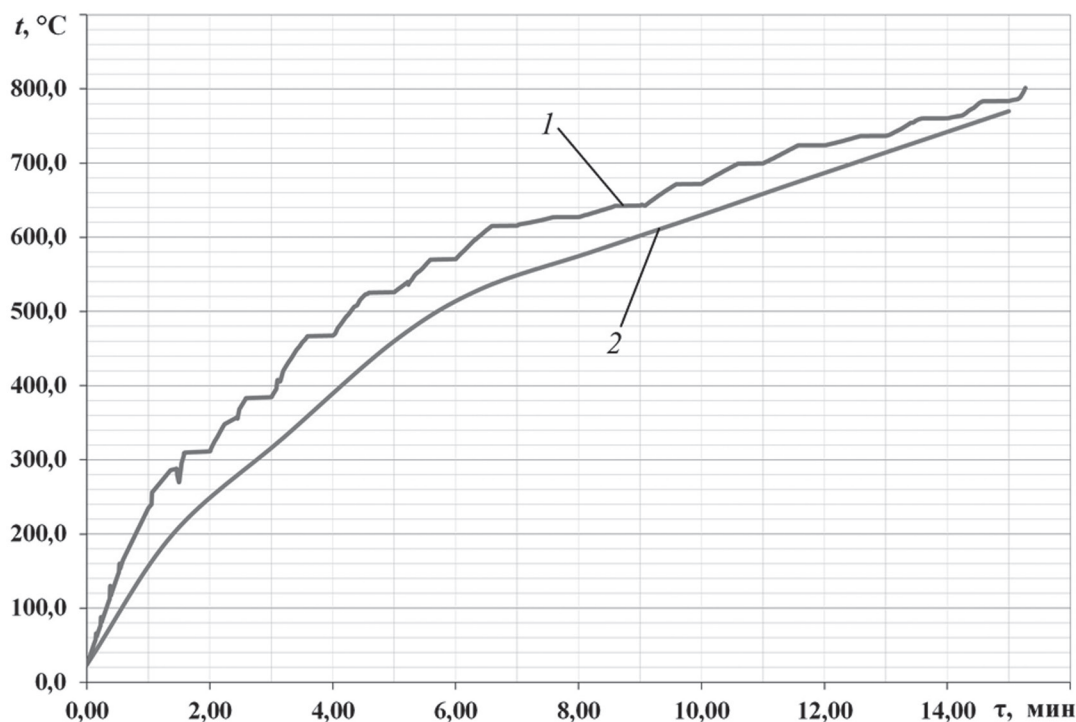


Рис. 10. Графики зависимости температуры  $t$  тигля лабораторной печи от времени плавки  $\tau$ :  
1 — эксперимент; 2 — теория

жимах работы исследуемой печи при частотах свыше 22 кГц нагрузка в электромагнитном отношении представляет собой соленоид, поскольку в этом случае поверхностный эффект ярко выражен, а  $\delta_T/\Delta_2 > 35$ , в связи с чем активное сопротивление системы «индуктор — нагрузка» практически не зависит от частоты. При этом индуктивность системы в тех же режимах работы печи практически не зависит от частоты уже при  $\delta_T/\Delta_2 > 55$ . При  $\delta_T/\Delta_2 < 3$  нагрузка в электромагнитном отношении представляет собой трубу, при этом чем больше значение  $\delta_T/\Delta_2$ , тем больше активное сопротивление и меньше индуктивность при одинаковой температуре. Из рисунка 6 видно, что в начале плавки в лабораторной печи, начиная с определенного значения частоты и выше, когда нагрузка в электромагнитном отношении представляет собой соленоид, активное сопротивление и индуктивность практически одинаковые, то есть частота не влияет на их величину.

С ростом температуры растут и активное сопротивление, и индуктивность до температуры точки Кюри, поскольку  $\delta_T/\Delta_2$  уменьшается. После прохождения точки Кюри в горячем режиме работы печи, когда  $\delta_T/\Delta_2$  становится существенно меньше 3, значения  $R$  и  $L$  резко снижаются вследствие эффекта индукционного нагрева двухслойной проводящей среды [9]. Чем меньше частота тока, тем при меньшем значении температуры это происходит.

В лабораторной печи для плавки магния мощностью 2,5 кВт при прохождении точки Кюри происходит резкое снижение сопротивления, например для  $f = 22$  кГц в 10 раз.

Для лабораторной печи установлено, что при изменении частоты  $f$  с 10 до 100 кГц при одинаковой температуре активное сопротивление системы «индуктор — нагрузка» растет (для  $t = 200$  °C на 0,14 Ом, т. е. в 2,5 раза).

Установлено, что при неизменной частоте  $f$  индуктивность  $L$  увеличивается с ростом температуры до точки Кюри. При этом частота влияет на скорость роста индуктивности (чем меньше частота, тем быстрее рост). При прохождении точки Кюри индуктивность резко снижается (в лабораторной печи для плавки магния мощностью 2,5 кВт при частоте 22 кГц — в 2,2 раза).

Ток незначительно влияет на индуктивность и особенно на активное сопротивление. При изменении тока индуктора лабораторной печи от 10 до 300 А активное сопротивление меняется не более чем на 4%, а индуктивность не более чем на 6%.

В результате решения тепловой задачи в пакете ELCUT доказано, что температура расплавляемого металла и тигля в средней его части составляет около 760 °C в конце плавки. Отличие температуры по высоте тигля — не более 60 °C. При сравнении теоретической и экспериментальной кривых нагрева максимальная разность — не более 65 °C (в середине плавки). Суммарные тепловые потери через боковую теплоизоляционную вставку, крышку и подину — 350 Вт.

Результаты расчета в ELCUT для алюминия отличаются от расчета для магния не более чем на 0,25%. Для алюминия результаты эксперимента совпадают с результатами расчета с погрешностью не более 10%.



Разработана методика эксперимента, и на физической модели полностью воспроизведен технологический процесс плавки магния. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования формируют

основу для построения структурной модели индукционной тигельной печи повышенной частоты емкостью от 0,3 т до 1,6 т в среде Simulink/Matlab с целью моделирования системы управления.

### Литература

1. **Вайнберг А.М.** Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967.
2. **Фарбман С.А., Колобнев И.Ф.** Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1968.
3. **Установки** индукционного нагрева / под ред. А.Е. Слухоцкого. Л.: Энергоиздат, 1981.
4. **Sassa Kensuke, Kuwabara Mamoru, Yasuda Tadayoshi, Asai Shigeo.** Experimental Measurements and Theoretical Analysis of Induction Heating by Use of a Conductive Crucible // *Tetsu-To-Hagane J. Iron and Steel Institute of Japan*. 1991. V. 77. Iss. 9. Pp. 1442—1449.
5. **Szkliniarz W., Szkliniarz A.** The Characteristics of TiAl-based Alloys Melted in Graphite Crucibles // *Materials Sci. and Techn.* 2017. No. 12. Pp. 1—9.
6. **Patidar B., Hussain M., Jha S., Sharma A., Tiwari A.** Analytical, Numerical and Experimental Analysis of Induction Heating of Graphite Crucible for Melting of Non-magnetic Materials // *IET Electric Power Appl.* 2017. V. 11. Iss. 3. Pp. 342—351.
7. **Кувалдин А.Б., Федин М.А., Кулешов А.О., Жмурко И.Е.** Разработка релейных систем управления мощностью и температурным режимом индукционных тигельных печей с использованием физического моделирования // *Форум научных материалов*. 2017. Вып. 906. С. 8—15.
8. **Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Генералов И.М.** Экспериментальное исследование физической модели индукционной тигельной печи и разработка системы управления // *XI Междунар. форум по стратегической технологии (IFOST): Сборник трудов*. Ч. 2. Новосибирск, 2016. С. 68—72.
9. **Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О.** Выбор методики расчета и исследование электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // *Вестник МЭИ*. 2017. № 3. С. 77—86.
10. **Кувалдин А.Б.** Индукционный нагрев ферромагнитной стали. М.: Энергоатомиздат, 1988.
11. **Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кулешов А.О., Жмурко И.Е., Ахметьянов С.В.** Расчет и исследование электрических характеристик индукционных тигельных печей с немагнитным проводящим тиглем // *Всеросс. науч.-практ. конф. по экологии и безопасности в техносфере: актуальные проблемы и решения*. 2018. Т. 115. Вып.1.
12. **Волков Е.А.** Численные методы. М.: Физматлит, 2003.

### References

1. **Vaynberg A.M.** *Induktionnye Plavil'nye Pechi*. M.: Energiya, 1967. (in Russian).
2. **Farbman S.A., Kolobnev I.F.** *Induktionnye Pechi dlya Plavki Metallov i Splavov*. M.: Metallurgiya, 1968. (in Russian).
3. **Ustanovki** *Induktionnogo Nagreva*. Pod Red. A.E. Slukhotskogo. L.: Energoizdat, 1981. (in Russian).
4. **Sassa Kensuke, Kuwabara Mamoru, Yasuda Tadayoshi, Asai Shigeo.** *Experimental Measurements and Theoretical Analysis of Induction Heating by Use of a Conductive Crucible*. *Tetsu-To-Hagane J. Iron and Steel Institute of Japan*. 1991;77;9:1442—1449.
5. **Szkliniarz W., Szkliniarz A.** The Characteristics of TiAl-based Alloys Melted in Graphite Crucibles. *Materials Sci. and Techn.* 2017;12:1—9.
6. **Patidar B., Hussain M., Jha S., Sharma A., Tiwari A.** Analytical, Numerical and Experimental Analysis of Induction Heating of Graphite Crucible for Melting of Non-magnetic Materials. *IET Electric Power Appl.* 2017; 11;3:342—351.
7. **Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Kuleshov A.O., Zhmurko I.E.** *Razrabotka Releynykh Sistem Upravleniya Moshchnost'yu i Temperaturnym Rezhimom Induktionnykh Tigel'nykh Pechey s Ispol'zovaniem Fizicheskogo Modelirovaniya*. *Forum Nauchnykh Materialov*. 2017;906: 8—15. (in Russian).
8. **Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Kuleshov A.O., Generalov I.M.** *Eksperimental'noe Issledovanie Fizicheskoy Modeli Induktionnoy Tigel'noy Pechi i Razrabotka Sistemy Upravleniya*. *XI Mezhdunar. Forum po Strategicheskoy Tekhnologii (IFOST): Sbornik Trudov*. Ch. 2. Novosibirsk, 2016:68—72. (in Russian).
9. **Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Kuleshov A.O.** *Vybor Metodiki Rascheta i Issledovanie Elektricheskikh Kharakteristik Induktionnykh Tigel'nykh Pechey s Provodyashchim Tiglem*. *Vestnik MEI*. 2017;3:77—86. (in Russian).
10. **Kuvaldin A.B.** *Induktionnyy Nagrev Ferromagnitnoy Stali*. M.: Energoatomizdat, 1988. (in Russian).
11. **Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Kuleshov A.O., Zhmurko I.E., Akhmet'yanov S.V.** *Raschet i Issledovanie Elektricheskikh Kharakteristik Induktionnykh Tigel'nykh Pechey s Nemagnitnym Provodyashchim Tiglem*. *Vseross. Nauch.-prakt. Konf. po Ekologii i Bezopasnosti v Tekhnosfere: Aktual'nye Problemy i Resheniya*. 2018;115;1. (in Russian).
12. **Volkov E.A.** *Chislennyye Metody*. M.: Fizmatlit, 2003. (in Russian).

**Сведения об авторах:**

**Федин Максим Андреевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: FedinMA@mail.ru

**Кувалдин Александр Борисович** — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: KuvaldinAB@mpei.ru

**Кулешов Алексей Олегович** — кандидат технических наук, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: KuleshovAO@yandex.ru

**Ахметьянов Святослав Владимирович** — аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ahmetyanov91@yandex.ru

**Кондрашов Сергей Семенович** — ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: sskondrashov@yandex.ru

**Information about authors:**

**Fedin Maksim A.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: FedinMA@mail.ru

**Kuvaldin Aleksandr B.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: KuvaldinAB@mpei.ru

**Kuleshov Aleksey O.** — Ph.D. (Techn.), Assistant of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: KuleshovAO@yandex.ru

**Akhmet'yanov Svyatoslav V.** — Ph.D.-student of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ahmetyanov91@yandex.ru

**Kondrashov Sergey S.** — Leading Engineer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: sskondrashov@yandex.ru

**Работа выполнена при поддержке:** Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (инициативный научный проект № 8.9608.2017/БЧ)

**The work is executed at support:** Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Initiative Research Project No. 8.9608.2017/БЧ)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 26.03.2019

**The article received to the editor:** 26.03.2019