

УДК 621.365.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-77-86

Выбор методики расчета и исследование электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим тиглем

М.А. Федин, А.Б. Кувалдин, А.О. Кулешов

Проведены обзор и сравнение известных методик расчета индукционных тигельных печей с проводящим тиглем. Показано, что расчет и теоретическое исследование электрических и энергетических характеристик печей данного типа могут быть эффективно выполнены с использованием компьютерного моделирования, основанного на методе конечных элементов и реализованного в универсальном пакете ELCUT.

Приведено сравнение результатов электрического расчета разными методами лабораторной печи с графитовым тиглем с загрузкой из алюминиевого сплава, которое подтвердило эффективность применения пакета ELCUT.

Создан лабораторный электротехнологический комплекс, включающий индукционную тигельную печь с проводящим тиглем, источник питания (высокочастотный регулируемый транзисторный инвертор), микропроцессорную систему управления и систему сбора данных. Дано описание способов измерения электрических величин на высокой частоте, реализованных в лабораторном стенде.

Моделирование проведено на экспериментальном стенде, оснащённом необходимым измерительным оборудованием. Результаты расчета сопоставлены с данными физического эксперимента, экспериментально подтверждена адекватность результатов теоретических исследований.

Проведен расчет лабораторной печи с графитовым тиглем для плавки меди массой 1 кг при нагреве до 1100 °С с использованием частоты тока около 22 кГц. Исследовано проникновение электромагнитной волны в загрузку печи, представляющую двухслойное проводящее тело (внешний слой – проводящий тигель, внутренний слой – расплавляемый металл). Исследовано влияние наличия внутреннего слоя загрузки на электрические и энергетические характеристики печи. Изучены зависимости электрических и энергетических характеристик от частоты, тока индуктора и температуры, а также распределение по радиусу напряженности магнитного поля и выделяющиеся удельные объемные мощности в тигле и загрузке для пустого тигля и тигля с жидкой медью. Результаты расчетов также сравнивались с данными экспериментов.

Проведенные исследования создают базу для проектирования индукционных тигельных печей с проводящим тиглем, а также для построения системы управления.

Ключевые слова: индукционная тигельная печь, проводящий тигель, методы расчета, математическое и физическое моделирование, электрические характеристики.

Для цитирования: 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. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-77-86.

Selecting the Calculation Procedure and Studying the Electrical Characteristics of Induction Crucible Furnaces with a Conductive Crucible

М.А. Fedin, А.В. Kuvaldin, А.О. Kuleshov

The known procedures for calculating induction crucible furnaces with a conductive crucible are reviewed and compared with one another. It is shown that the electric and power performance characteristics of furnaces of this type can be efficiently calculated and theoretically studied by computer simulation based on the finite element method and implemented in the ELCUT universal software package.

The results from electric calculation of a laboratory furnace with a graphite crucible and with aluminum alloy charge carried out using different methods are compared with one another, and the effectiveness of using the ELCUT software package has been demonstrated from that comparison.

A laboratory electrical processing facility comprising an induction crucible furnace with a conductive crucible, an adjustable high-frequency transistor inverter serving as a power supply, a microprocessor control system, and a data acquisition system has been set up. The techniques for measuring electrical quantities at high frequency that have been implemented in the laboratory setup are described.

The modelling has been carried out at the experimental setup fitted with the necessary instrumentation. The calculation results are compared with the physical experiment data, and adequacy of the theoretical investigation has been confirmed by experiment.

The laboratory furnace equipped with a graphite crucible intended for melting 1 kg of copper by heating it to 1100 °C using a current frequency of around 22 kHz has been calculated. The electromagnetic wave penetration into the furnace charge presenting a double-layer conductive body (with the conductive crucible forming the external layer and the metal being melted forming the inner layer) has been investigated. The effect the presence of the charge inner layer on the furnace electrical and power performance characteristics has been investigated. The dependences of electric and power performance characteristics on the frequency, inductor current and temperature, as well as the distribution of magnetic field intensity over the radius and specific volumetric power release in the crucible and charge for the empty crucible and the crucible with liquid copper have been studied. The calculation results were also compared with the experimental data.

The performed investigations form the basis for designing induction crucible furnaces with a conductive crucible and also for constructing the control system.

Key words: induction crucible furnace, conductive crucible, calculation methods, mathematical and physical modeling, electrical characteristics.

For citation: Fedin M.A., Kuvaldin A.B., Kuleshov A.O. Selecting the Calculation Procedure and Studying the Electrical Characteristics of Induction Crucible Furnaces with a Conductive Crucible. MPEI Vestnik. 2017; 3:77—86. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-77-86.

Введение

Индукционные тигельные печи (ИТП) широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов и сплавов, требующих особой чистоты, однородности и точности химического состава. В зависимости от электрических свойств материала тигля различают ИТП с непроводящим и проводящим тиглями.

В ИТП с непроводящим керамическим тиглем металл (загрузка) нагревается за счет электромагнитного поля, созданного током индуктора, а тигель из-за большого значения удельного электрического сопротивления практически эквивалентен воздушному зазору. В ИТП с проводящим тиглем (ПТ): стальным, графитовым или графито-шамотным, в электромагнитном поле нагреваются и тигель, и загрузка (рис. 1). ИТП с ПТ используются для плавки медных и магниевых сплавов, урана, золота, а также непроводящих материалов [1—4].

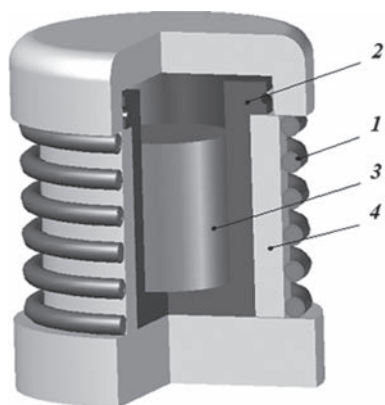


Рис. 1. ИТП с проводящим тиглем:

1 — индуктор; 2 — проводящий тигель; 3 — загрузка; 4 — теплоизоляция

Если толщина стенки тигля более чем в 2 — 3 раза превышает глубину проникновения тока в материал тигля, то можно считать, что индуцированный ток со-

средоточен в стенке тигля, загрузка же прогревается только путем теплопередачи и может не обладать электропроводностью. При меньшей толщине стенки тигля электромагнитное поле проникает в загрузку и энергия выделяется также и в ней. В этом случае можно говорить об индукционном нагреве двухслойного тела, которое образуют тигель и загрузка. При этом каждый слой имеет свои значения удельного электрического сопротивления и относительной магнитной проницаемости, что влияет на распределение выделяющейся энергии. Тот факт, что при определенных условиях загрузка ИТП с ПТ представляет собой двухслойное тело, является существенным отличием для расчета характеристик ИТП с ПТ от расчета обычных ИТП с непроводящим тиглем. При этом расчет электрических и энергетических характеристик ИТП с ПТ существенно усложняется, так как приходится учитывать, что при нагреве изменяются электрофизические параметры материалов тигля и загрузки, зависящие от температуры и напряженности магнитного поля.

Наиболее широко в России и за рубежом применяют ИТП с проводящими тиглями, выполненными из ферромагнитной стали для плавки магния емкостью 0,3...8 т и мощностью 120...1200 кВт и из графита для плавки меди емкостью до 6 т и мощностью до 1500 кВт [5—7].

Целью данной работы является выбор методики расчета электрических и энергетических характеристик ИТП с ПТ для плавки магния и меди. При этом решаются задачи выбора рабочей частоты тока индуктора и толщины стенки тигля, а также рассчитываются активная мощность в индукторе, тигле, загрузке, электрический КПД и коэффициент мощности ИТП в зависимости от частоты и тока индуктора, геометрических размеров печи и температуры.

Обзор литературы по расчету индукционных тигельных печей с проводящим тиглем

Для расчета ИТП с ПТ ранее применялись аналитические методы А.М. Вайнберга и А.Е. Слухоцкого, а также их модификации [1, 3].

Метод А.М. Вайнберга (или метод МЭИ) основан на декомпозиции расчетной области с последующим

расчетом активной и реактивной мощностей для каждой из подобластей (индуктор, загрузка, воздушный зазор между индуктором и загрузкой и др.). Достоинство метода заключается в возможности рассмотрения загрузки как двухслойного тела, слои которого обладают различными значениями удельного электрического сопротивления и относительной магнитной проницаемости. Но при этом расчет существенно усложняется, а специализированных программ, использующих метод Вайнберга для расчетов ИТП с ПТ, не существует. К недостаткам данного метода также относятся невозможность учета краевых эффектов и зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля в случае использования стального ферромагнитного тигля.

Метод А.Е. Слухоцкого основан на использовании электрической схемы замещения ИТП. При использовании данного метода ИТП рассматривают как короткую электромагнитную систему, пронизываемую общим магнитным потоком (рис. 2). Ее составляют загрузка высотой h_2 и пространство обратного замыкания магнитного потока, на котором может размещаться магнитопровод. При этом влиянием тигля, обладающего отличными от загрузки значениями электропроводности и относительной магнитной проницаемости, пренебрегается. Оба метода не учитывают наличия у тигля дна и воротника.

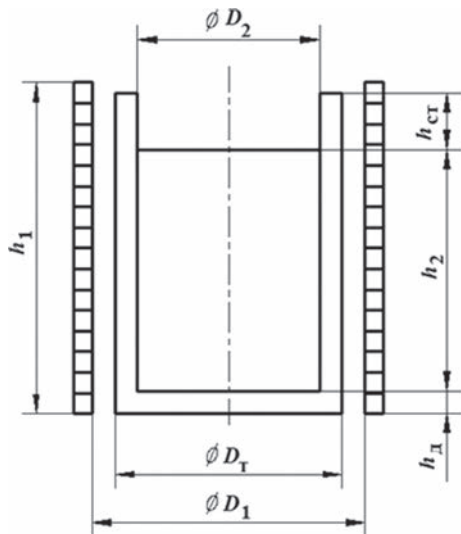


Рис. 2. Эскиз к методам А.Е. Слухоцкого и ВНИИЭТО

Модификацией метода А.Е. Слухоцкого является аналитическая методика инженерного расчета ИТП с немагнитным ПТ, предложенная А.В. Бамунэром и П.Г. Френкелем, работавшими во ВНИИ электротермического оборудования, которую назовем методикой ВНИИЭТО. Здесь электромагнитную систему ИТП с ПТ составляют четыре последовательных расчетных участка: дно тигля с расчетной высотой h_D , загрузка высотой h_2 , незаполненная часть стенки тигля высотой h_T и путь обратного замыкания магнитного потока (рис. 2).

Участки тигля, выступающие в осевом направлении за пределы индуктора, в расчете не учитываются [8].

Недостатками этой методики являются: пренебрежение реальным распределением плотности тока в пределах расчетных участков; невозможность расчета в случае использования магнитного тигля (стального тигля при плавке магния); отсутствие учета краевых эффектов.

Для расчета ИТП с ПТ также используется метод индуктивно-связанных контуров (ИСК) в двухмерной постановке, который позволяет учесть непостоянство плотности тока в индукторе и загрузке как в радиальном, так и в продольном направлениях [9, 10]. Он позволяет учесть наличие второго слоя, а также краевые эффекты, но не может использоваться для расчета печи с ферромагнитным ПТ. Кроме того, чтобы использовать данный метод необходима разработка собственного специализированного программного обеспечения.

Наиболее универсальным методом расчета ИТП в настоящее время является метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в ряде универсальных пакетов программ: ANSYS/Maxwell, COMSOL, ELCUT, FEMM и др. Поскольку задача расчета ИТП с ПТ осесимметрична и может быть сведена к двухмерной, то для расчета наиболее целесообразно использовать ELCUT или FEMM. По сравнению с Maxwell и COMSOL их использование сокращает время расчета, а большая эргономичность и доступность литературы серьезно упрощает моделирование. При этом многолетний опыт показывает, что решение двухмерных задач индукционного нагрева с использованием этих программ дает практически идентичные результаты.

В табл. 1, 2 приведено сравнение результатов электрического расчета разными методами лабораторной ИТП с графитовым ПТ, описанной в [8]. Размеры печи: $D_1 = 0,39$ м, $D_2 = 0,18$ м, $D_T = 0,26$ м, $h_D = 0,1$ м, общая высота боковой стенки тигля $h_T = 0,415$ м, $h_1 = 0,45$ м.

В качестве загрузки использовалась стопа дисков из алюминиевого сплава высотой $h_2 = 0,405$ м. Диаметр дисков $D = 0,15$ м был меньше внутреннего диаметра тигля, так что между загрузкой и тиглем имелся кольцевой зазор. Ток индуктора 238 А и частота тока 809 Гц приняты одинаковыми для всех вариантов расчета, поскольку в [8] для этих данных приводятся и результаты эксперимента: $U_1 = 49,01$ В, $P_\Sigma = 1665$ Вт, $Q = 11,8$ кВар, $\cos\varphi = 0,14$.

В табл. 1 приведены результаты расчета аналитическими методами без учета мощности тепловыделения P_{22} в самом металле при нагреве. Из табл. 1 видно, что результаты, полученные с использованием традиционных аналитических методик А.М. Вайнберга и А.Е. Слухоцкого, сильно отличаются от экспериментальных, поскольку не учитывают то, что загрузка представляет собой двухслойное проводящее тело. Погрешность расчетов по этим методикам доходит в данном случае до 65 %. Наиболее близкие к экспериментальным результатам дают методика ВНИИЭТО,

Таблица 1

Результаты расчета ИТП с ПТ (однослойная модель загрузки)

Метод расчета	U_1 , В	P_1 , Вт	$P_{22} = P_{21}$, Вт	P_Σ , Вт	Q , кВар	$\cos\phi$	η
Метод А. М. Вайнберга	35	276	1135	1411	5,97	0,23	0,80
Метод А.Е. Слухоцкого	35	344	1135	1479	6,26	0,23	0,77

Таблица 2

Результаты расчета ИТП с ПТ (двухслойная модель загрузки)

Метод расчета	U_1 , В	P_1 , Вт	P_{21} , Вт	P_{22} , Вт	$P_{2\Sigma}$, Вт	P_Σ , Вт	Q , кВар	$\cos\phi$	η
ВНИИЭТО	49	–	–	–	–	1550	11,8	0,13	–
ИСК	51,91	500,5	1262	46	1308	1808	12,2	0,146	0,723
МКЭ (ELCUT)	50,38	312	1170	57	1228	1540	11,93	0,128	0,797

Примечание: U_1 — напряжение индуктора; P_1 , P_{21} и P_{22} — мощности в индукторе, в тигле и в металле; $P_{2\Sigma}$ и P_Σ — суммарные мощности в нагрузке и в системе; Q — суммарная реактивная мощность; η — электрический КПД; $\cos\phi$ — коэффициент мощности.

метод ИСК и ELCUT, с использованием которых получены результаты, учитывающие двухслойность загрузки (табл. 2). Учитывая тот факт, что только ELCUT позволяет рассчитывать ИТП с ПТ, обладающим магнитными свойствами, учитывать краевые эффекты, наличие дна и воротника, а также его универсальность и возможность дальнейшего решения связанных задач (тепловая, расчет сил), делаем вывод, что наиболее подходящим для решения поставленных в статье задач является МКЭ, реализованный в ELCUT.

Исследование электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим тиглем в пакете ELCUT

В качестве примера произведен расчет ИТП с графитовым тиглем для плавки меди массой 1 кг. Печь питается от высокочастотного транзисторного преобразователя мощностью 2,5 кВт с рабочей частотой 22 кГц. На рис. 3 показан чертеж системы «индуктор –

загрузка» печи с геометрическими размерами. Тигель изготовлен из графита марки ГМЗ.

Электрический расчет печи проведен в универсальном конечно-элементном пакете программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия) путем решения задачи магнитного поля переменных токов.

Анализ магнитного поля переменных токов состоит в расчете электрического и магнитного поля, возбужденного приложенными переменными (синусоидально изменяющимися во времени) токами или внешним переменным полем. Изменение поля во времени предполагается синусоидальным.

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

$$j = j_{\text{стор}} + j_{\text{вихр.}}$$

Задача формулируется как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала A ($B = \text{rot}A$, B — вектор магнитной индукции). Вектор магнитной индукции предполагается лежащим в плоскости модели zr (рис. 4), в то время как вектор плотности электрического тока j и векторный магнитный потенциал A ортогональны к нему.

Уравнение для осесимметричной задачи запишем как

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

где удельная электропроводность γ и компоненты тензора магнитной проницаемости μ_z и μ_r постоянны в пределах каждого блока модели.

На рис. 4 показана расчетная область, поделенная на конечные элементы. Число узлов сетки — около 350 000. Неравномерности сетки можно добиться, за-

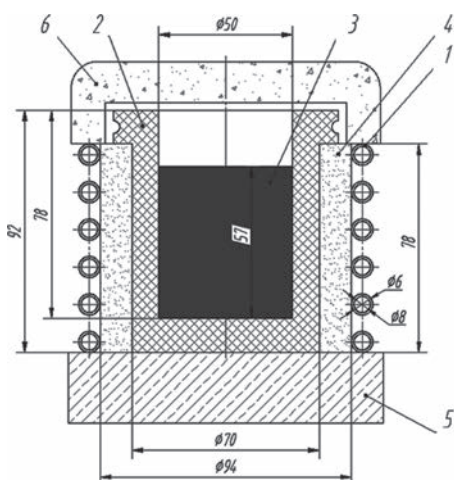


Рис. 3. Чертеж системы «индуктор – загрузка» печи с футеровкой:

1 — индуктор; 2 — тигель; 3 — металл; 4 — керамическая вставка; 5 — подина; 6 — крышка

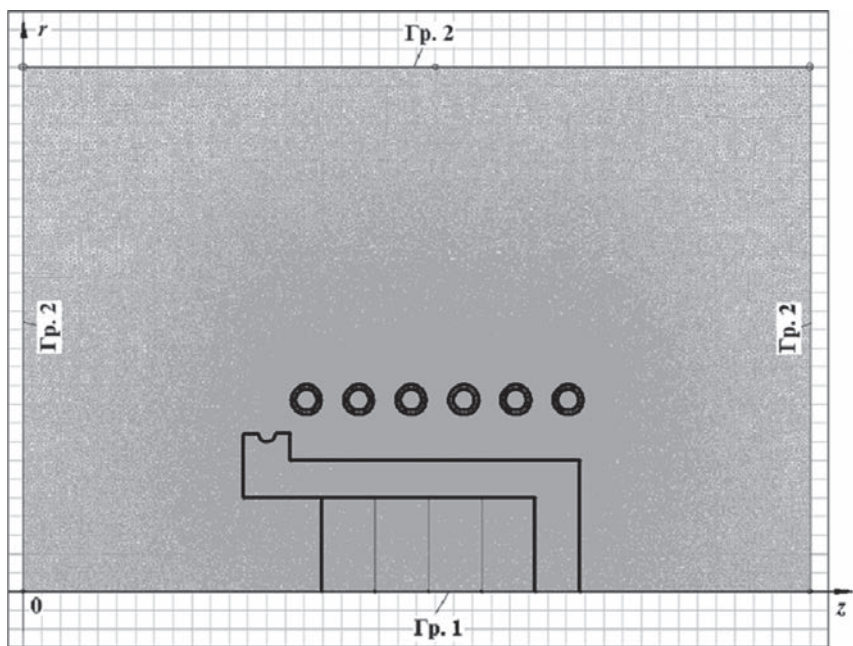


Рис. 4. Расчетная область в пакете ELCUT

давая различные значения шага дискретизации для разных подобластей расчетной области и непосредственно в узлах, отмеченных на рис. 4 точками. Модель позволяет, изменяя свойства блоков, проводить расчеты для случаев графитового тигля без металла и тигля с различным уровнем металла. На оси симметрии (граница 1 на рис. 4) задается граничное условие Неймана $dH/dr = 0$ (отсутствие тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля), на внешних границах (граница 2) — нулевое граничное условие Дирихле $A = 0$ (полагается равным нулю значение магнитного потенциала, т. е. поле локализовано в пределах расчетной области).

Практика показывает, что радиус расчетной области (расстояние по оси r на рис. 4) надо задавать в

2 ... 2,5 раза больше, чем внутренний радиус индуктора печи, а расстояние по оси z от дна тигля вправо до границы 2 и от воротника влево до границы 2 — примерно равным внутреннему радиусу индуктора.

В результате решения задачи магнитного поля переменных токов получены интегральные результаты, представленные в табл. 3, для случая графитового тигля без металла и тигля с медью (масса меди около 1 кг) при токе индуктора $I_1 = 180$ А и частоте $f = 22$ кГц. В табл. 3 для каждого из случаев значения в левой колонке (вариант 1) соответствуют реальному тиглю, в правой (вариант 2) — тиглю без дна и воротника.

Таким образом, результаты расчета показывают, что неучет влияния дна и воротника ПТ на электрические

Таблица 3

Основные результаты расчета ИТП с ПТ без металла и с медью

Параметр системы «индуктор – загрузка»	Тигель без металла		Тигель с медью	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
Напряжение индуктора U_1 , В	62,7	63,8	64,1	65,5
Мощность в индукторе P_1 , Вт	147	146	147	146
Мощность в тигле P_{21} , Вт	1278	1286	1040	997
Мощность в меди P_{22} , Вт	–		50	55
Суммарная мощность в загрузке $P_{2\sum}$, Вт	1278	1286	1090	1052
Суммарная активная мощность P_{\sum} , Вт	1425	1432	1237	1198
Полное сопротивление системы z , Ом	0,348	0,354	0,356	0,364
Активное сопротивление системы R , Ом	0,044	0,044	0,038	0,037
Индуктивное сопротивление системы x_L , Ом	0,345	0,351	0,354	0,362
Электрический КПД η	0,897	0,898	0,881	0,878
$\cos\phi$	0,126	0,125	0,107	0,102

и энергетические характеристики печи с ПТ вносит небольшую погрешность в расчет – не более 10%. На рис. 5 представлены рассчитанные распределения удельной объемной мощности тепловыделения для обоих этих случаев.

Из табл. 3 и рис. 5 видно, что наличие в графитовом тигле жидкой меди (в расчетах удельное сопротивление ρ меди принималось равным $2,15 \cdot 10^{-7}$ Ом·м) оказывает существенное влияние на параметры системы «индуктор – нагрузка». Так, мощность тепловыделения в графитовом тигле при наличии в нем меди снижается почти на 20% при одном и том же токе индуктора, при этом мощность тепловыделения в самой меди представляет незначительную величину — около 50 Вт.

Это объясняется тем, что глубина проникновения электромагнитной волны в стенку графитового тигля толщиной 10 мм на частоте тока индуктора 22 кГц составляет около 13 мм, а поэтому интегральное значение индуцированного тока в меди сопоставимо с суммарным током в тигле (около 400 и 780 А соответственно). Это приводит к тому, что появляется обратная электромагнитная волна, отраженная от границы раздела сред с различными значениями ρ , и распределение напряженности магнитного поля H по толщине стенки тигля изменяется (рис. 6, а) [1, 3, 11]. В связи с этим значения удельной объемной мощности тепловыделения ρV в каждой точке по толщине стенки тигля уменьшаются (рис. 6, б), что и приводит к существенному снижению мощности в тигле. При этом внутренние источники теплоты во внутреннем слое двухслойной загрузки вносят незначительный вклад в

суммарную активную мощность в нагрузке вследствие относительно небольших значений ρ для внутреннего слоя. На рис. 6 область, соответствующая стенке тигля, ограничена двумя вертикальными линиями.

В результате расчетов также установлено, что при этом значение ρ меди, находящейся в графитовом тигле, слабо влияет на параметры системы «индуктор – нагрузка» (значение ρ изменялось от значения, соответствующего жидкой меди при температуре 1100 °С, приведенного выше, до значения $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м при 20 °С), поскольку оно все равно остается существенно меньшим по сравнению со значением ρ графита, слабо изменяющимся при нагреве. Все это предъявляет особые специфические требования к работе источника питания — транзисторного инвертора напряжения [12–14].

Поскольку на начальном этапе технологического процесса плавки металла в ИТП с ПТ нагрузка тигля представляет собой кусковую шихту, отдельные куски которой в электрическом отношении практически не связаны между собой, индуцированные токи замыкаются в основном в пределах каждого куска, а эквивалентное сопротивление такой кусковой нагрузки в несколько раз превосходит аналогичное значение у жидкой меди, на этом этапе наличием в тигле металлической (в частности, медной) шихты можно пренебречь и использовать результаты, полученные для тигля без металла. Это было подтверждено экспериментально [12].

При расчетах ρ графита принималось равным $7,14 \cdot 10^{-6}$ Ом·м при 20 °С, $7,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·м — при 1100 °С.

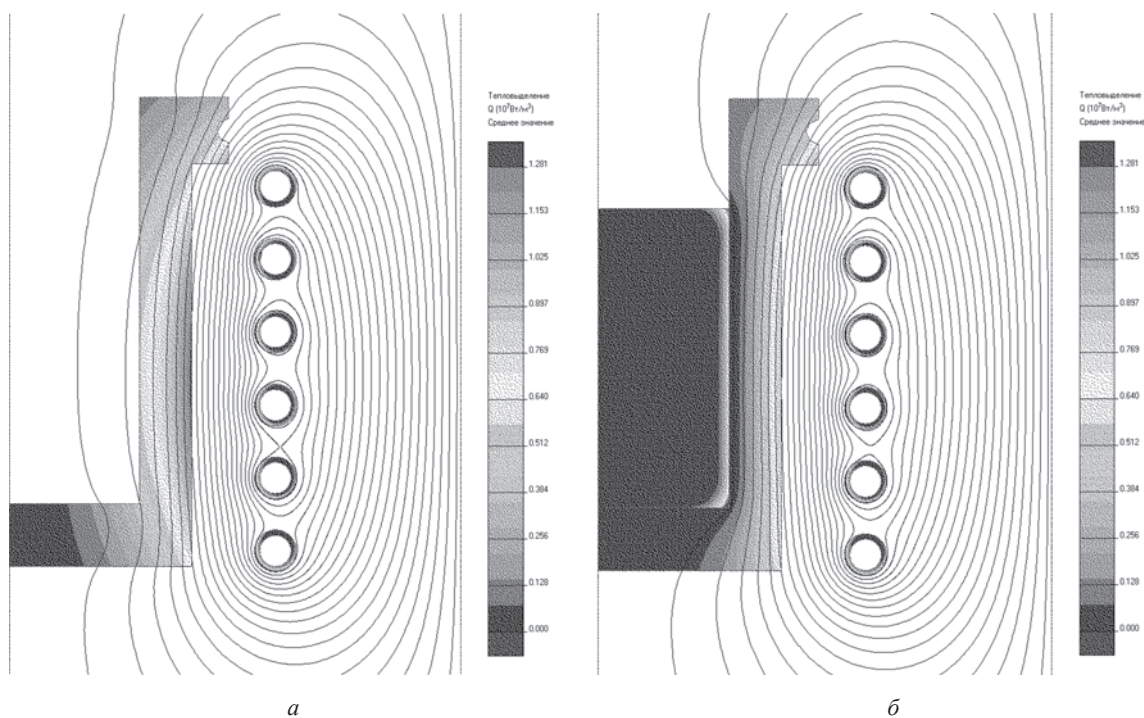


Рис. 5. Распределение удельной объемной мощности тепловыделения в индукторе и загрузке печи:

а — графитовый тигель без металла; б — графитовый тигель с медью

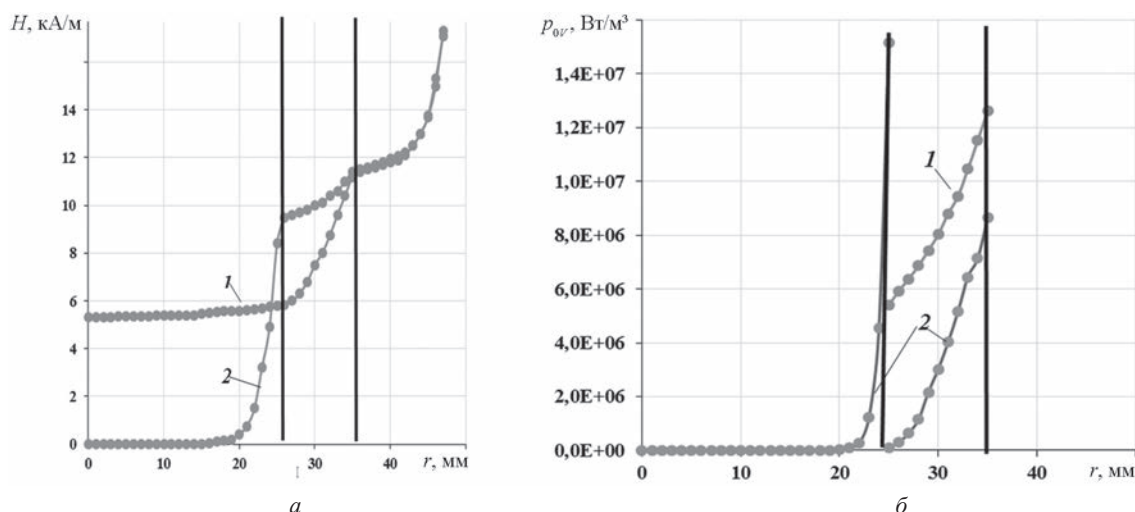


Рис. 6. Распределение напряженности магнитного поля H (а) и удельной объемной мощности p_0V (б) по радиусу r для пустого тигля (1) и тигля с жидкой медью (2) при токе индуктора $I_1 = 210$ А

На рис. 7 приведены рассчитанные зависимости электрического КПД η и $\cos \varphi$ системы «индуктор – нагрузка» ИТП с ПТ от частоты тока индуктора при двух режимах работы: 1 — холодный режим при температуре 20 °С, когда наличием в ПТ кусковой шихты можно пренебречь при расчете; 2 — горячий режим при температуре 1100 °С, когда в ПТ находится жидкая медь. Из рис. 7 видно, что пока в тигле находится кусковая

шихта, зависимости η и $\cos \varphi$ соответствуют нагреву однослойной проводящей загрузки: с ростом частоты электрический КПД немного увеличивается, а $\cos \varphi$ снижается. Аналогично ведут себя зависимости η и $\cos \varphi$ при температуре 1100 °С, начиная с частоты тока около 32 кГц и до 88 кГц. При этих частотах электромагнитная волна полностью затухает в стенке ПТ и эффект двухслойного тела не проявляется. Сами значения η и $\cos \varphi$ несколько больше, чем при 20 °С, что объясняется увеличением удельного электрического сопротивления материала ПТ при нагреве. Наличие максимума и минимума кривой 1 (рис. 7, а) связано с различным характером изменения P_1 и P_{21} от f при данной температуре. До частоты около 32 ... 33 кГц загрузка печи проявляет себя как двухслойное проводящее тело. На этом участке значение электрического КПД с ростом частоты увеличивается значительно, поскольку тепловыделение в стенке тигля существенно растет, покрывая незначительное уменьшение тепловыделения в меди, а $\cos \varphi$ при этом возрастает.

На рис. 8 представлены зависимости суммарной мощности тепловыделения в загрузке ИТП с ПТ от значения тока индуктора при различной частоте тока: 10, 22, 44 и 88 кГц. Из рис. 8 видно, что при частотах 44 и 88 кГц свойства загрузки как двухслойного тела не проявляются, значения мощности в горячем режиме несколько превышают значения мощности в холодном режиме во всем диапазоне изменения тока индуктора. На частотах же 10 и 22 кГц загрузка при температуре 1100°С ведет себя как двухслойное тело, поэтому суммарная мощность тепловыделения в загрузке при этой температуре существенно меньше мощности тепловыделения в холодном режиме.

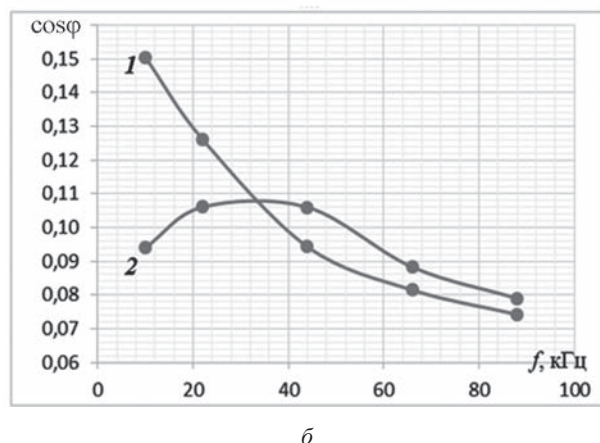
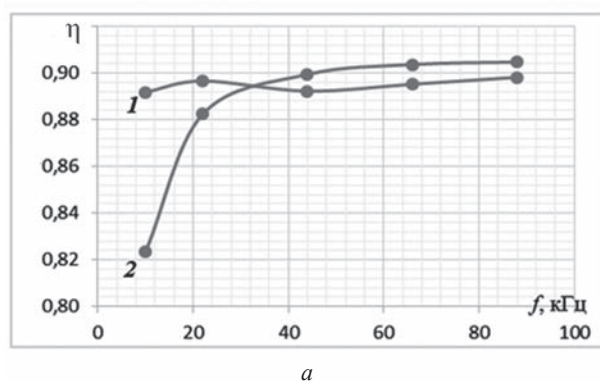


Рис. 7. Зависимости электрического КПД η (а) и $\cos \varphi$ (б) системы «индуктор – нагрузка» от частоты при температуре 20 (кривая 1) и 1100 °С (кривая 2)

Экспериментальные исследования

Для экспериментальных исследований в НИУ «МЭИ» создан лабораторно-промышленный стенд на базе

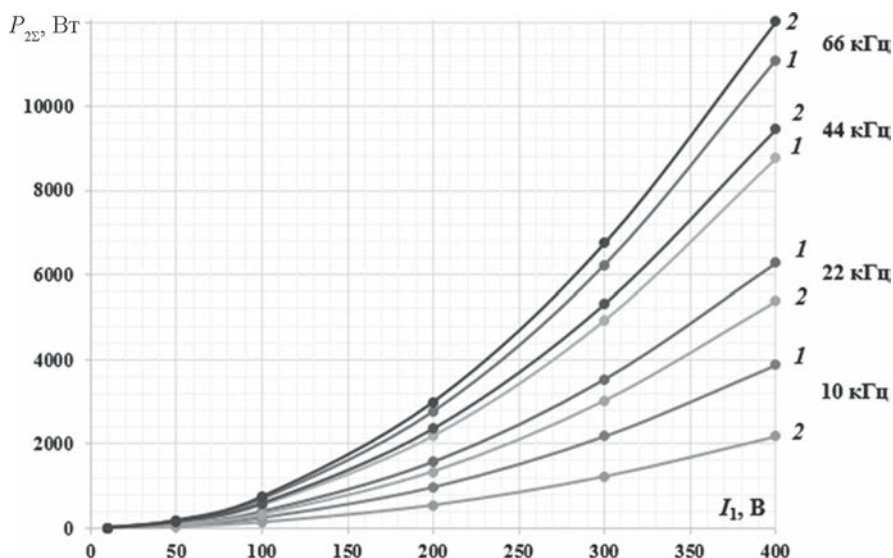


Рис. 8. Зависимости суммарной мощности тепловыделения в загрузке ИТП с ПТ от тока индуктора при различной частоте и температуре 20 (кривые 1) и 1100 °С (кривые 2)

ИТП с ПТ для плавки меди мощностью 2,5 кВт (см. рис. 3), питающаяся от транзисторного преобразователя высокой частоты. Фотография печи в процессе работы дана на рис. 9 и соответствует температуре тигля и шихты около 800 °С.

Для регулирования величины входного напряжения используется однофазный лабораторный автотрансформатор Fпex мощностью 3 кВА. Для регулирования температуры используется цифровой регулятор температуры OMRONE5CC. В экспериментальных исследованиях использовалось следующее измерительное оборудование: тепловизор FLIRT425 с диапазоном измерения температуры от –20 до 1200 °С, двухканальный цифровой осциллограф TektronixTDS 1012B, хромель-алюмелевые термопары (типа К), стрелочные вольтметр, амперметр, ваттметр, фазометр, цифровые вольтметры, цифровой мультиметр, цифровой трехканальный измеритель-регистратор температуры AktakomATE-9380, трансформаторы тока и напряжения.

В ходе эксперимента измерялись ток и напряжение индуктора, частота и суммарная активная мощность

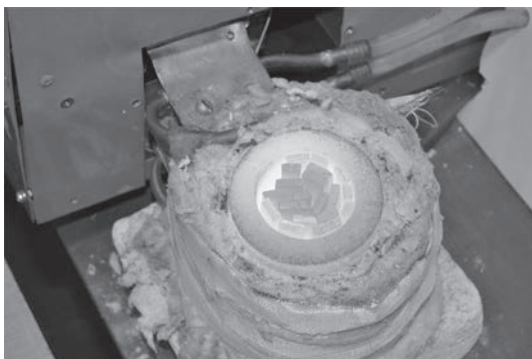


Рис. 9. Фотография печи в процессе работы

системы «индуктор – загрузка», а также температура. Остальные экспериментальные результаты рассчитывались по измеренным величинам.

Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 10.

Измерение температуры осуществлялось с использованием термопар и тепловизора. Действующее значение тока индуктора I_1 измерялось косвенно микропроцессором МП1 через среднее значение выпрямленного тока в первичной обмотке согласующего трансформатора транзисторного преобразователя частоты с последующим пересчетом по первой гармонике в действующее значение. Частота тока индуктора f измерялась как микропроцессором МП3, так и с использованием цифрового осциллографа. Действующее значение напряжения на индукторе U_1 измерялось также косвенно микропроцессором МП2, через среднее значение выпрямленного напряжения с последующим пересчетом по первой гармонике в действующее значение. Наконец суммарная активная мощность системы «индуктор – загрузка» P_Σ измерялась по входу инвертора преобразователя частоты. Сигнал напряжения, пропорциональный активной мощности на входе инвертора, вычислялся микропроцессором МП4 в результате измерений средних значений тока и напряжения на входе инвертора.

В табл. 4 приведено сравнение результатов расчета и эксперимента, проведенного при следующих условиях: ток индуктора $I_1 = 213$ А, частота $f = 21,95$ кГц, температура — 24 °С (тигель с шихтой) и $I_1 = 220$ А, частота $f = 21,98$ кГц, температура – 1100 °С (тигель с жидкой медью), геометрические размеры — в соответствии с рис. 3.

В результате измеренные значения активной мощности несколько превышают расчетные значения P_Σ , по-

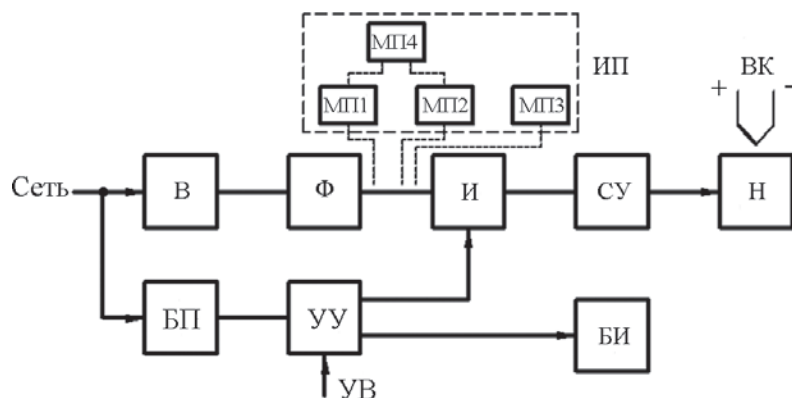


Рис. 10. Функциональная схема экспериментальной установки:

В — выпрямитель, Ф — фильтр, И — инвертор, СУ — согласующее устройство (согласующий трансформатор и компенсационная конденсаторная батарея), Н — нагрузка, БП — блок питания, УУ — управляющее устройство (система управления и защиты), БИ — блок индикации, УВ — управляющий вход, ИП — измерительные платы, ВК — датчик температуры (термопара), МП1 — МП4 — микропроцессоры для измерения электрических величин на высокой частоте

Таблица 4

Сравнение результатов расчета и эксперимента

Параметр системы «индуктор – нагрузка»	Тигель с шихтой		Тигель с расплавом	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Напряжение индуктора U , В	73,9	70,5	79,0	78,1
Суммарная активная мощность P_s , Вт	1990	2190	1840	2030
Полное сопротивление Z , Ом	0,347	0,331	0,359	0,355
Активное сопротивление R , Ом	0,044	0,048	0,038	0,042
Реактивное сопротивление X , Ом	0,344	0,299	0,357	0,301
$\cos \varphi$	0,126	0,146	0,106	0,118

сколько включают в себя также мощности потерь в самом инверторе и согласующем трансформаторе. Результаты расчетов и эксперимента, приведенные в табл. 4, отличаются не более чем на 10 %. Некоторые отличия объясняются допущениями, принятыми в математической модели, и экспериментальными погрешностями, связанными с электрическими измерениями на высокой частоте.

Заключение

Проведены обзор и сравнение методик расчета ИТП с ПТ. Показано, что наиболее подходящим для расчета электрических характеристик ИТП с ПТ является МКЭ, реализованный в ELCUT.

Разработана методика определения электрических характеристик ИТП с ПТ и проведены соответствующие исследования.

Установлено, что в случае, когда ПТ является частично прозрачным для электромагнитной волны, суммарная мощность тепловыделения в тигле с расплавленным металлом становится меньше, чем мощность тепловыделения в ПТ без металла при одинаковом токе индуктора и частоте.

Получены зависимости электрических и энергетических характеристик ИТП с графитовым ПТ при плавке меди от частоты и тока индуктора, а также в зависимости от стадии плавки.

Установлено, что для рассмотренной печи с ПТ нагрузка обладает свойствами двухслойного тела при частотах тока не выше 32...33 кГц, что соответствует отношению толщины стенки тигля к глубине проникновения, равному около 1,3 при 1100 °С.

Установлено, что в промышленных ИТП с ПТ емкостью до 8 т при значении отношения толщины стенки тигля к глубине проникновения электромагнитной волны в материал тигля меньшем 1,3, нагрузку можно считать двухслойным телом. При выполнении данного условия после расплавления металла значение электрического КПД и $\cos\varphi$ будет уменьшаться. Таким образом, при плавке в ИТП с ПТ система управления должна обеспечивать изменение частоты в процессе плавки таким образом, чтобы не допускать эффекта отраженной волны, вызванного двухслойностью загрузки. При значении отношения толщины стенки тигля к глубине проникновения, превышающем 1,3, нагрузка считается однослойной.

Создан лабораторно-промышленный стенд на базе ИТП мощностью 2,5 кВт, работающей на частоте 22 кГц, позволяющий проводить выплавку меди и сплавов, осуществляя разливку при заданной оператором температуре, выдерживать жидкий металл при определенной температуре. Для измерения электрических величин на высокой частоте разработана измерительная техника на микропроцессорной основе. Пока-

зано, что различие результатов, полученных расчетным путем и экспериментально, составляет не более 10 %.

Экспериментально подтверждено, что для расчета ИТП с ПТ в начальный период плавки, когда в ПТ находится кусковая шихта, можно использовать результаты расчета для пустого тигля.

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. **Иванова Л.И., Грובה Л.С., Сокунов Б.А., Сарапулов С.Ф.** Индукционные тигельные печи. Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2002.
5. **Сайт** компании РЭЛТЕК [Официальный сайт]. URL: <http://reltec.biz/> (дата обращения 01.03.2017)
6. **Сайт** компании Азиатские Промышленные Технологии [Официальный сайт]. URL: <http://aitcom.ru/> (дата обращения 02.03.2017)
7. **Сайт** компании ИнтерСЭЛТ [Официальный сайт]. URL: <http://interselt.ru/> (дата обращения 05.03.2017)
8. **Бамунэр А.В., Френкель П.Г.** Методика инженерного расчета индукционных печей с немагнитным проводящим тиглем // Исследование и разработка индукционных плавильных печей. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 27—33.
9. **Кувалдин А.Б.** Теория индукционного и диэлектрического нагрева. М.: Изд-во МЭИ, 1999.
10. **Кувалдин А.Б., Погребиский М.Я., Федин М.А.** Расчет тепловых и электрических характеристик индукционных тигельных миксеров // *Электromеталлургия*. 2007. № 12. С. 18—26.
11. **Немков В.С., Демидович В.Б.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
12. **Федин М.А.** Выбор принципа регулирования и разработка системы управления индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // *Индукционный нагрев*. 2014. № 1 (27). С. 24—28.
13. **Федин М.А., Кулешов А.О.** Расчет электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // *Наука. Техника. Технологии*. 2014. № 4. С. 87—90.
14. **Федин М.А., Кулешов А.О.** Разработка автоматизированной установки индукционной тигельной печи с проводящим тиглем для плавки металлов // *Проблемы разработки месторождения углеводородных и рудных полезных ископаемых*. 2014. № 1. С. 586—589.

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. **Ivanova L.I., Grobova L.S., Sokunov B.A., Sarapulov S.F.** Induktionnye Tigel'nye Pechi. Ekaterinburg: Izd-vo UGTU–UPI, 2002. (in Russian).

5. **Sayt kompanii RELTEK** [Ofits. sayt]. URL: <http://reltec.biz/> (data obrashcheniya 01.03.2017) (in Russian).

6. **Sayt kompanii Aziatskie Promyshlennye Tekhnologii** [Ofits. sayt]. URL: <http://aitcom.ru/> (data obrashcheniya 02.03.2017) (in Russian).

7. **Sayt kompanii InterSELT** [Ofits. sayt]. URL: <http://inter-selt.ru/> (data obrashcheniya 05.03.2017) (in Russian).

8. **Bamuner A.V., Frenkel' P.G.** Metodika Inzhenernogo Rascheta Induktionnykh Pechey s Nemagnitnym Provodyashchim Tiglem. Issledovanie i Razrabotka Induktionnykh Plavil'nykh Pechey. M.: Energoatomizdat, 1986:27—33. (in Russian).

9. **Kuvaldin A.B.** Teoriya Induktionnogo i Dielektricheskogo Nagreva. M.: Izd-vo MEI, 1999. (in Russian).

10. **Kuvaldin A.B., Pogrebisskiy M.Ya., Fedin M.A.** Raschet Teplovykh i Elektricheskikh Kharakteristik Induktionnykh Tigel'nykh Mikserov. *Elektrometallurgiya*. 2007;12:18—26. (in Russian).

11. **Nemkov V.S., Demidovich V.B.** Teoriya i Raschet Ustroystv Induktionnogo Nagreva. L.: Energoatomizdat, 1988. (in Russian).

12. **Fedin M.A.** Vybhor Printsipa Regulirovaniya i Razrabotka Sistemy Upravleniya Induktionnykh Tigel'nykh Pechey s Provodyashchim Tiglem. *Induktionnyy Nagrev*. 2014;1 (27):24—28. (in Russian).

13. **Fedin M.A., Kuleshov A.O.** Raschet Elektricheskikh Kharakteristik Induktionnykh Tigel'nykh Pechey s Provodyashchim Tiglem. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii*. 2014;4:87—90.

14. **Fedin M.A., Kuleshov A.O.** Razrabotka Avtomatizirovannoy Ustanovki Induktionnoy Tigel'noy Pechi s Provodyashchim Tiglem dlya Plavki Metallov. *Problemy Razrabotki Mestorozhdeniya Uglevodorodnykh i Rudnykh Poleznykh Iskopaemykh*. 2014;1:586—589.

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 — аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: aokuleschov@yandex.ru

Information about authors

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

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

Kuleshov Aleksey O. — Ph.D.-student of Power Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies Dept., NRU MPEI, e-mail: aokuleschov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11.11.2016