

# Трехмерное моделирование особенностей распределения электрического и теплового полей при кондукционной электропотоковой обработке расплавов

А. В. Иванов

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [dpta@iipt.com.ua](mailto:dpta@iipt.com.ua)*

Поступила в редакцию 05.10.2020

После доработки 14.06.2021

Принята к публикации 17.06.2021

Методами математического трехмерного моделирования установлены особенности распределения электрических и тепловых полей в объеме расплава сплава литейного доэвтектического силумина А356 при обработке его электрическим током параллельными электродами. Установлено, что при обработке постоянным током геометрия электродной системы качественно и количественно определяет эффект электротермического воздействия на расплав. Показано, что глубина заглупления электродов с неизолированной боковой поверхностью не оказывает активного влияния на температурные процессы при кондукционной электропотоковой обработке. Полученные качественные и количественные данные для систем с неизолированными электродами соответствуют результатам экспериментальных исследований. Показано, что изменение пространственной геометрии расположения электродов с изолированной боковой поверхностью существенно влияет на пространственное распределение электрических и тепловых полей и количественное, более чем в три раза, изменение характеристик этих полей в объеме расплава. Способ управления процессами кондукционной электропотоковой обработки расплавов, основанный на пространственном изменении типа электродной системы, не нуждается в дополнительных затратах и может осуществляться непосредственно в ходе самой обработки.

*Ключевые слова:* силумин, расплав, трехмерное моделирование, электрический ток, параллельные электроды, электрическое поле, тепловое поле

УДК 537.528:669.017.16

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.21>

## ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальная проблема литейного производства – обеспечение требуемого качества литой металлопродукции – решается комплексом технологических мероприятий в системе «шихта-расплав-отливка». При этом обработку расплава производят различными способами, методы которых можно классифицировать как реагентные, энергетические и комплексные. Основное отличие первых двух заключается в том, что реагенты, вводимые в расплав, действуют избирательно. Действие энергетических методов, при которых расплав обрабатывают физическими полями, многофункциональное и многоцелевое. Это существенно затрудняет оптимизацию параметров воздействия на расплав поля при их сопоставлении с характеристиками объекта обработки. Конечно же, такую многопараметрическую задачу логично решать в рамках системного подхода с помощью методов системного анализа [1–4]. Структурирование такой системы пока еще затруднено из-за недостатка экспериментальной информации прежде всего о процессах в

расплаве, описывающих как закономерности преобразования энергии первичного поля, вводимого в расплав, в другие виды энергии, так и функциональные возможности энергетической обработки улучшать кристаллизационную способность расплава, дегазировать его и удалять неметаллические включения. В этом случае используются подходы, пока еще фрагментарно изучающие такие проблемные ситуации [4]. В упрощенных подходах сопоставляются параметры воздействия на расплав и их результат *post factum* методами металлографии и механических испытаний, и такой метод черного ящика дает свой результат. Но, к сожалению, он не может быть подтвержден как оптимальный. Таким образом, актуальными являются задачи, решения которых позволят получать научные данные для представления и понимания механизмов энергетической обработки расплава.

## СОСТОЯНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из энергетических методов обработки расплава является кондукционная электро-

токовая обработка (КЭТО) [5–9]. Воздействие на расплав осуществляется электрическим полем, которое является первичной сферой влияния. Его энергия изменяет внутреннюю энергию системы, дополняя количество теплоты и совершая над жидкометаллической системой работу. Таким образом, здесь уместно определить КЭТО как термосиловое воздействие. Эти два фактора являются взаимообусловленными, а проблема их анализа может быть классифицирована как мультифизическая. Особенностью кондукционной электротоковой обработки расплавов является то, что она встраивается в уже имеющиеся технологические процессы и, не нарушая их, должна обеспечить повышенное качество литых изделий. Это значит, например, что температура объекта обработки не может выходить за рамки, ограниченные ранее определенным технологическим процессом, должны соблюдаться нормы по химическому составу и др., но при этом и обеспечиваться улучшенные показатели структуры литого металла, повышенные показатели механических и вообще необходимых эксплуатационных свойств получаемых изделий. Поэтому поиск обобщенных закономерностей, критериев, научно обоснованных рекомендаций по выбору диапазонов наиболее целесообразных электротехнологических параметров КЭТО для условий конкретного литейного производства, с учетом минимизации финансовых и материальных затрат, является актуальной научно-технической задачей.

В ранних работах [10–13] показано, что функциональные возможности тока определяются не только его параметрами, но и типом электродной системы. Изменяя ее типы, можно без дополнительных затрат качественно и количественно изменить параметры и характеристики как первичного поля, так и вторичных. Методами численного эксперимента показано неоднородное распределение полей в объеме расплава независимо от режима тока. Это обстоятельство затрудняет как истолкование опытных данных о результате КЭТО, так и возможные варианты прогнозирования такой обработки. Моделирование в большинстве случаев проводилось в двумерной постановке, так как, во-первых, это проще, а, во-вторых, для осесимметричных цилиндрических и коаксиальных систем этого вполне достаточно. Однако при моделировании, например, систем с параллельными электродами моделируемой проекции, проходящей через оси электродов, зачастую недостаточно для наиболее адекватного описания происходящих процессов. Поэтому в таком случае необходимо трехмерное моделиро-

вание, однако решение такой задачи в общем виде численно, а тем более аналитически, как подчеркнуто во введении, затруднено. Поэтому в статье рассмотрено в трехмерной постановке электротермическое преобразование энергии в объеме расплава, как составляющая часть комплекса генерируемых при КЭТО процессов.

*Цель работы* – методами математического моделирования в трехмерной постановке установить особенности распределения электрических и тепловых полей в объеме расплава сплава литейного доэвтектического силумина при обработке его электрическим током параллельными электродами.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе исследовались только системы с параллельным расположением электродов, как наиболее технологичные для применения в литейном производстве [12]. Рассмотрим цилиндрическую емкость (рис. 1) с расплавом высотой ( $H_{расп}$ ), диаметром ( $D_{расп}$ ), с погруженными в расплав и параллельно расположенными электродами 1 и 2. Расстояние от оси симметрии емкости с расплавом до центров электродов ( $L_э/2$ ). На электроды подается разность потенциалов ( $U$ ), соответственно через электроды и расплав проходит ток ( $I$ ). В работе рассматривается режим постоянного по величине и направлению тока, вернее, величина разности потенциалов ( $U$ ) и силы тока ( $I$ ) – const. В данной постановке задачи разность потенциалов подводится к сечениям  $\Gamma_1$  – потенциал (+) и  $\Gamma_2$  – потенциал (0), то есть через них проходит ток в направлении от  $\Gamma_1$  до  $\Gamma_2$ . В качестве объекта воздействия рассматривался наиболее распространенный в литейном производстве сплав А356 в жидком состоянии, материал электродов – титан. Электроды диаметром ( $d_{эл}$ ) погружены в расплав на глубину ( $h_{погр}$ ). Боковая поверхность электродов может быть электроизолированной с внешним диаметром изоляции ( $d_{из}$ ).

Не снижая общности задачи, выполним расчеты при следующих геометрических параметрах:

$$H_{эл} = 90 \text{ мм}; D_{эл} = 80 \text{ мм}; L_э/2 = 20 \text{ мм}; d_{эл} = 4 \text{ мм}; d_{из} = 5 \text{ мм}.$$

Величина  $h_{погр}$  варьировалась от 5 до 85 мм для каждого электрода.

Рассматривалось семь типов электродных систем, которые, по мнению автора, позволяют практически полностью описать и решить поставленную задачу:

*a* – система с электродами с неизолированной боковой поверхностью, заглубленными одинаково на 5 мм;

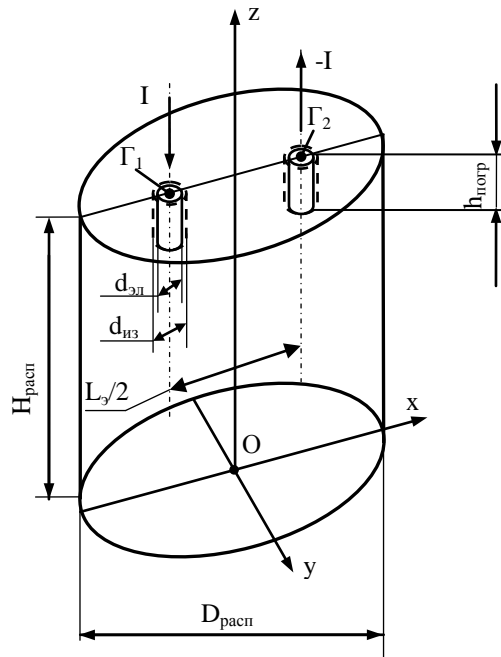


Рис. 1. Цилиндрическая емкость с расплавом и параллельными электродами.

*b* – система с электродами с неизолированной боковой поверхностью, заглубленными одинаково на 85 мм;

*c* – система с электродами с электроизолированной боковой поверхностью, заглубленными одинаково на 5 мм;

*d* – система с электродами с электроизолированной боковой поверхностью, заглубленными одинаково на 45 мм;

*e* – система с электродами с электроизолированной боковой поверхностью, заглубленными одинаково на 85 мм;

*f* – система с электродами с электроизолированной боковой поверхностью, заглубленными одинаково на разную глубину (электрод «+» на 85 мм, электрод «-» на 45 мм);

*g* – система с электродами с электроизолированной боковой поверхностью, заглубленными одинаково на разную глубину (электрод «+» на 85 мм, электрод «-» на 5 мм).

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ходе работы рассчитывались: распределение в объеме расплава электрического потенциала и плотности тока, напряженности электрического поля, удельной мощности тепловыделения. Также решалась задача нестационарной теплопередачи для определения температурных полей в объеме расплава. Данные задачи решались для трехмерного случая в декартовой системе координат.

Для решения электрической задачи использовались уравнения [14, 15]:

для определения скалярного электрического потенциала ( $\varphi$ ):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость материала, См/м;

для определения напряженности электрического поля ( $E$ ):

$$\vec{E} = -grad\varphi, \quad (2)$$

для определения плотности тока ( $J$ ):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (3)$$

Удельную мощность тепловыделения ( $q$ ) определяем выражением:

$$q = |\vec{J}|^2 / \sigma, \quad (4)$$

где  $|\vec{J}| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2 + J_z^2}$  – модуль

вектора плотности тока;  $J_x = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ ,

$J_y = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial y}$ ,  $J_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}$  – компоненты вектора

плотности тока соответственно.

Так как рассматривалась задача о воздействии на расплав постоянного тока, то начальным условием для электротехнической задачи будет заданная разность потенциалов на электродах  $\Delta\varphi|_{t=0} = \text{const}$ . Граничные условия: на границе  $\Gamma_1$  потенциал  $\varphi_1$  равен 0,1 В или 0,5 В; на  $\Gamma_2$  потенциал  $\varphi_2 = 0$  (см. рис. 1). На всех остальных внешних границах задавалось условие электрической изоляции  $\vec{n} \times \vec{J} = 0$ , на внутренних границах – условие непрерывности  $\vec{n} \times \vec{J}_1 = \vec{n} \times \vec{J}_2$ .

**Таблица 1.** Физические характеристики материалов

Материал	Физические характеристики			
	$\sigma$ , См/м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , Дж/(кг·К)	$k$ , Вт/(м·К)
Расплав сплава А356	$0,9 \times 10^6$	2200	1200	175
Материал электродов (Ti)	$0,596 \times 10^6$	4506	522	22
Электроизоляция электродов (кварцевое стекло)	$10^{-14}$	2600	820	3

**Таблица 2.** Интегральные параметры электротермического воздействия на расплав для электродных систем  $a$  и  $b$ 

Тип электродной системы	Интегральные параметры					
	Интегральная температура по объему, м <sup>3</sup> ·К		Интегральная величина теплового потока, Вт·м		Интегральная величина теплового градиента, м <sup>2</sup> ·К	
	через 10 с	через 300 с	через 10 с	через 300 с	через 10 с	через 300 с
$a$	0,4853	0,4856	0,086	0,164	0,0004927	0,000935
$b$	0,4853	0,4856	0,086	0,164	0,0004927	0,000937

**Таблица 3.** Интегральные параметры электротермического воздействия на расплав для электродных систем  $c$ – $g$ 

Тип электродной системы	Интегральные параметры					
	Интегральная температура по объему, м <sup>3</sup> ·К		Интегральная величина теплового потока, Вт·м		Интегральная величина теплового градиента, м <sup>2</sup> ·К	
	через 10 с	через 300 с	через 10 с	через 300 с	через 10 с	через 300 с
$c$	0,4853	0,4859	0,209	0,317	0,001197	0,001817
$d$	0,4835	0,4836	0,210	0,273	0,000124	0,000156
$e$	0,481	0,482	0,011	0,116	0,00007	0,00007
$f$	0,483	0,484	0,0144	0,158	0,000082	0,0001
$g$	0,484	0,484	0,0231	0,267	0,000132	0,000153

Для расчета теплового поля использовалось уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho C_p \partial T / \partial t + \nabla \times (-k \nabla T) = Q_i - \rho C_p \vec{u} \times \nabla T, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $k$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $Q_i$  – источник тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $u$  – скорость, м/с.

В рассматриваемом нами случае положим  $u = 0$ , тогда уравнение (5) примет вид:

$$\rho C_p \partial T / \partial t + \nabla \times (-k \nabla T) = Q_i. \quad (6)$$

Уравнения (1–6) решали методом конечных элементов с соответствующими граничными и начальными условиями.

Пусть расплав находится в плавильной печи с одинаковой и равномерно распределенной температурой в объеме, тогда начальные условия будут иметь вид: температура в объеме расплава, температура электродов и изоляции электродов  $T_0 = 1073,15$  °К, температура окружающего воздуха  $T_{inf} = 1073,15$  °К.

Граничные условия: на внешних границах, кроме поверхностей электродов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  и их изоляции, а также дна емкости с расплавом, задавалось условие теплового потока, которое описывается уравнением:

$$-\vec{n} \times (-k \nabla T) = q_0 + h_t \times (T_{inf} - T), \quad (7)$$

где  $q_0$  – внешний тепловой поток, Вт/м;  $h_t$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

В расчетах принималось  $q_0 = 0$ ,  $h_t = 0,025$  [Вт/(м<sup>2</sup>·К)].

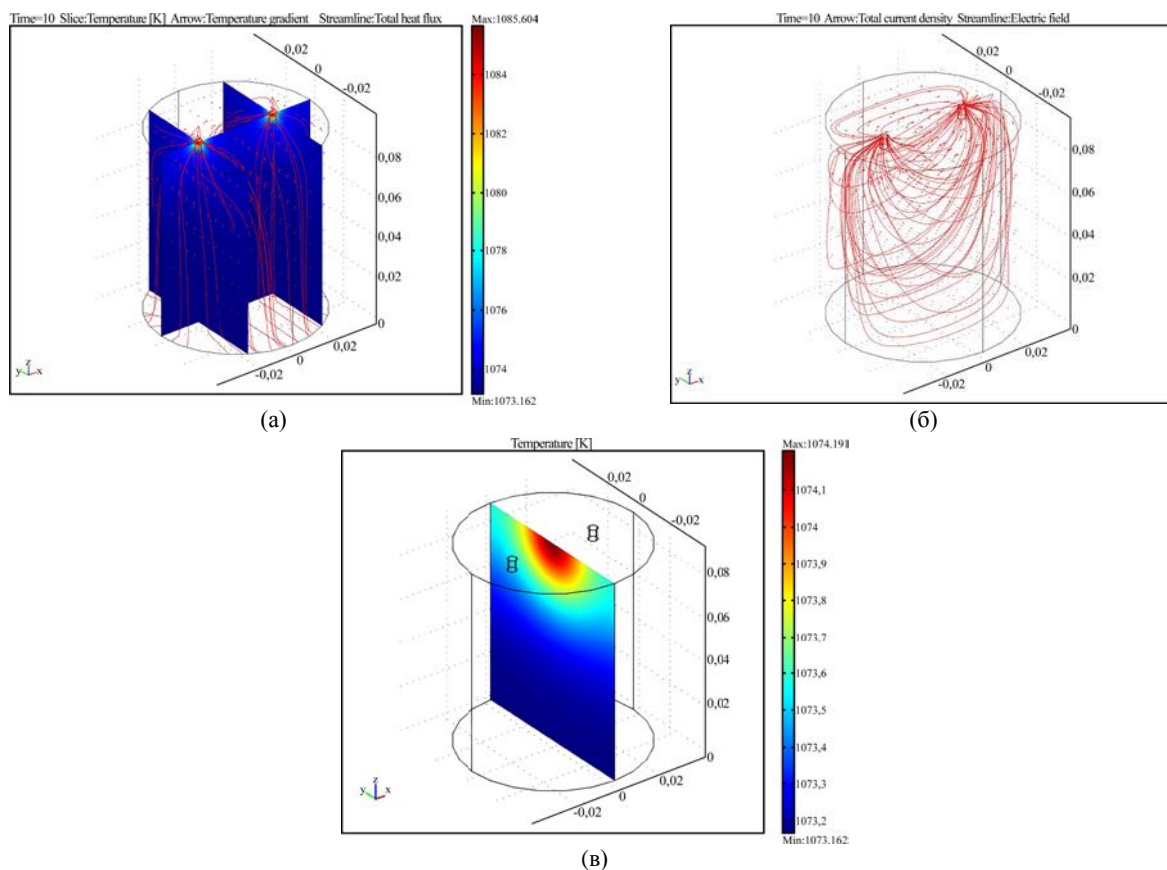
На дне ковша, поверхностях электродов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  и их изоляции задавалось условие термоизоляции:  $-\vec{n} \times (-k \nabla T) = 0$ .

Физические характеристики материалов приведены в табл. 1.

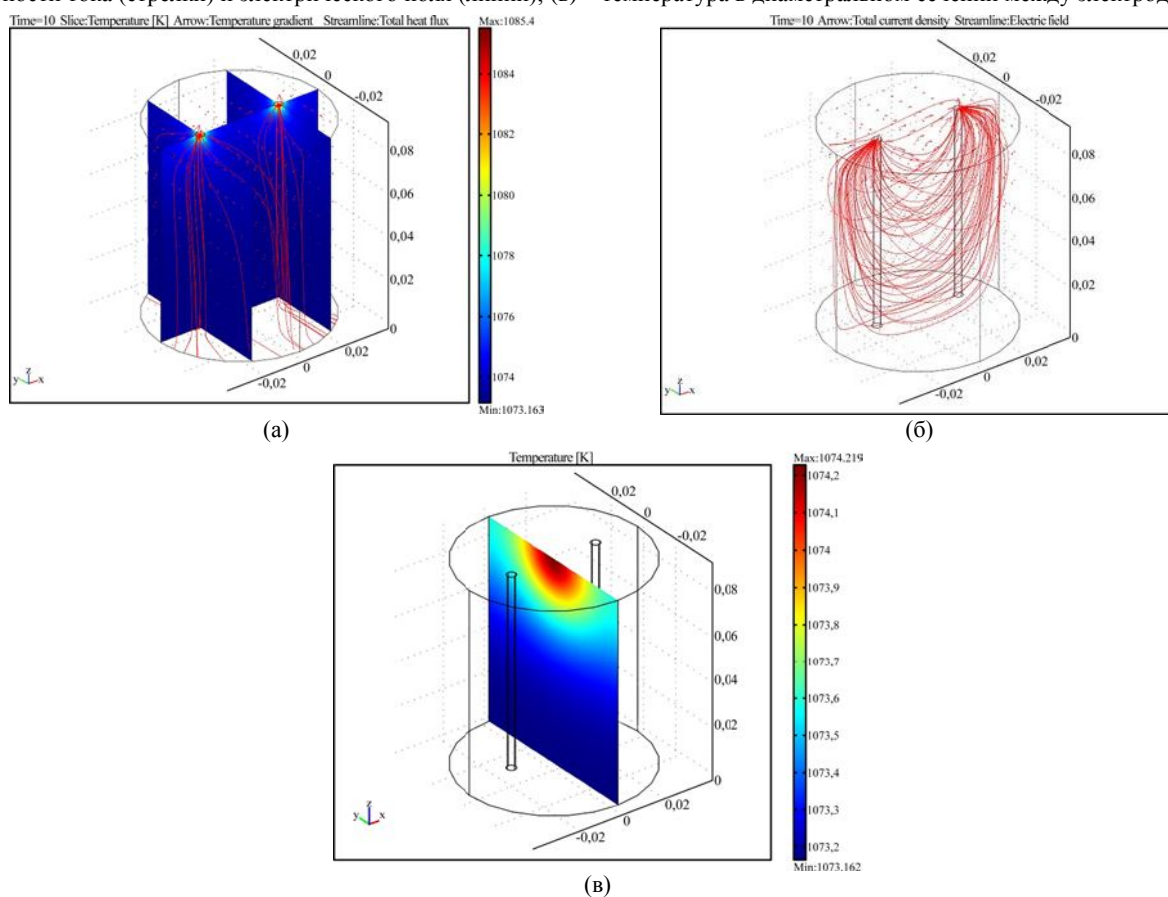
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполнения работы варьировались разность потенциалов на электродах 0,1 и 0,5 В, время пропускания тока через расплав (от 0 до 300 с). Результаты расчета для электродных систем с неизолированными электродами приведены на рис. 2 и 3, которые показывают, что концентрация силовых линий электрического поля, тока, линий теплового потока, температуры сконцентрирована в верхней части объема расплава и практически не распространяется в глубь жидкого металла даже через 300 с. Это объясняется стеканием тока с боковых поверхностей электродов, так как сопротивление расплава меньше, чем сопротивление электродов. Интегральные параметры электротермического воздействия на расплав для электродных систем  $a$  и  $b$  в объеме расплава через 10 и 300 с приведены в табл. 2.

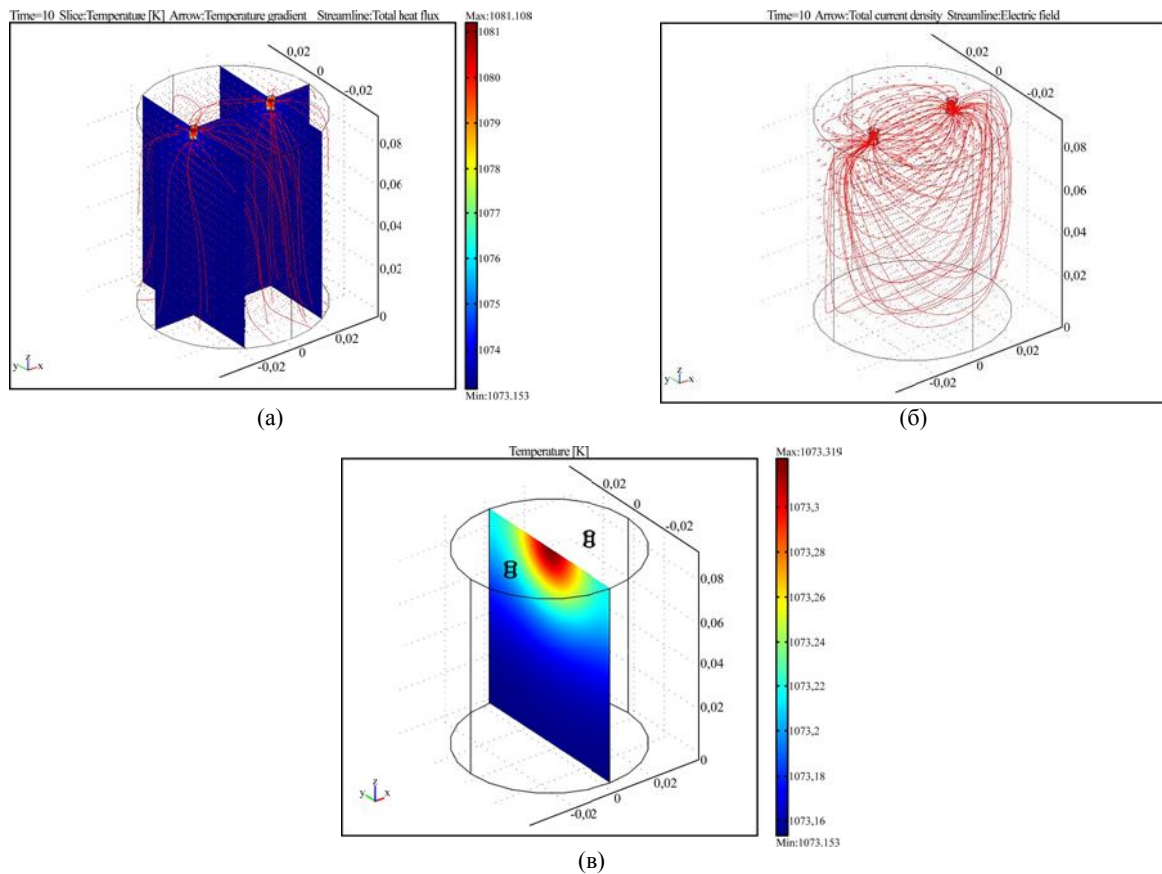
В качестве показательных характеристик электрического поля для электродных систем  $a$  и



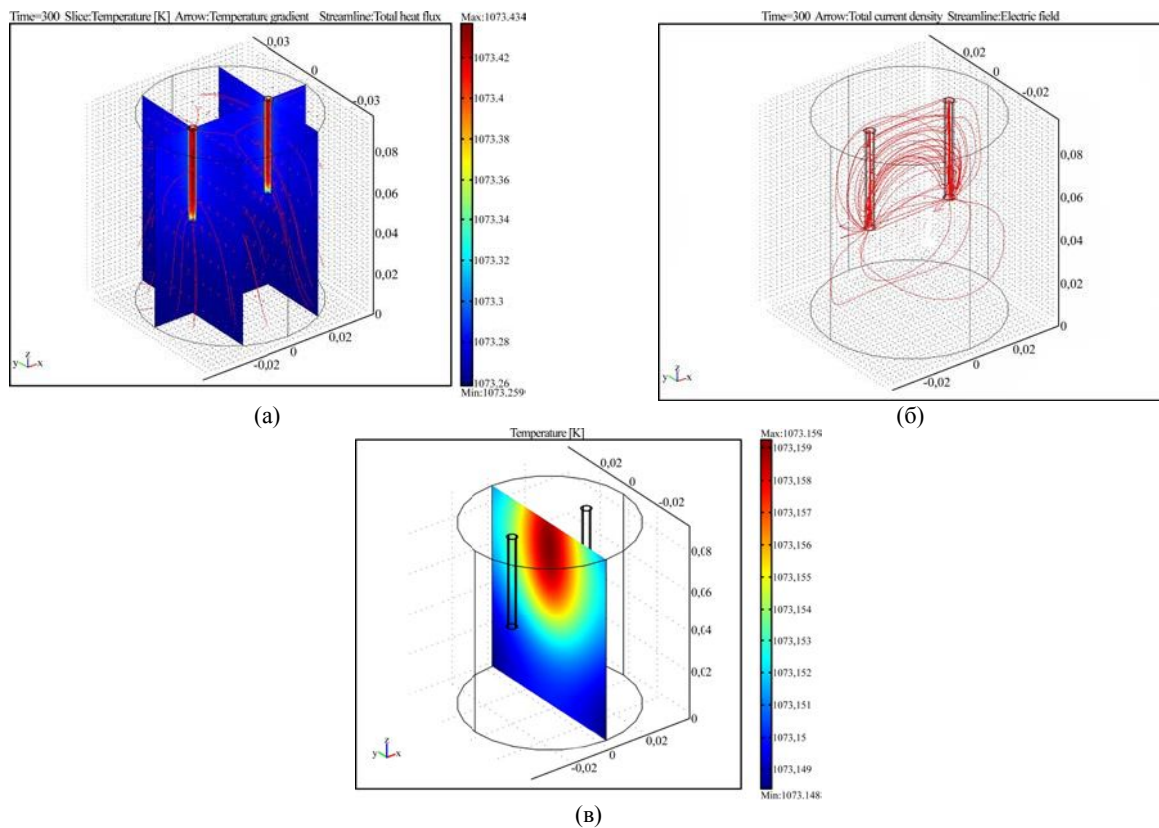
**Рис. 2.** Электродная система с двумя электродами с неизолированной боковой поверхностью (глубина 5 мм): (а) – температура в объеме расплава (цветовая гамма), тепловой поток (линии), градиент температуры (стрелки); (б) – поток вектора плотности тока (стрелки) и электрического поля (линии); (в) – температура в диаметральной сечении между электродами.



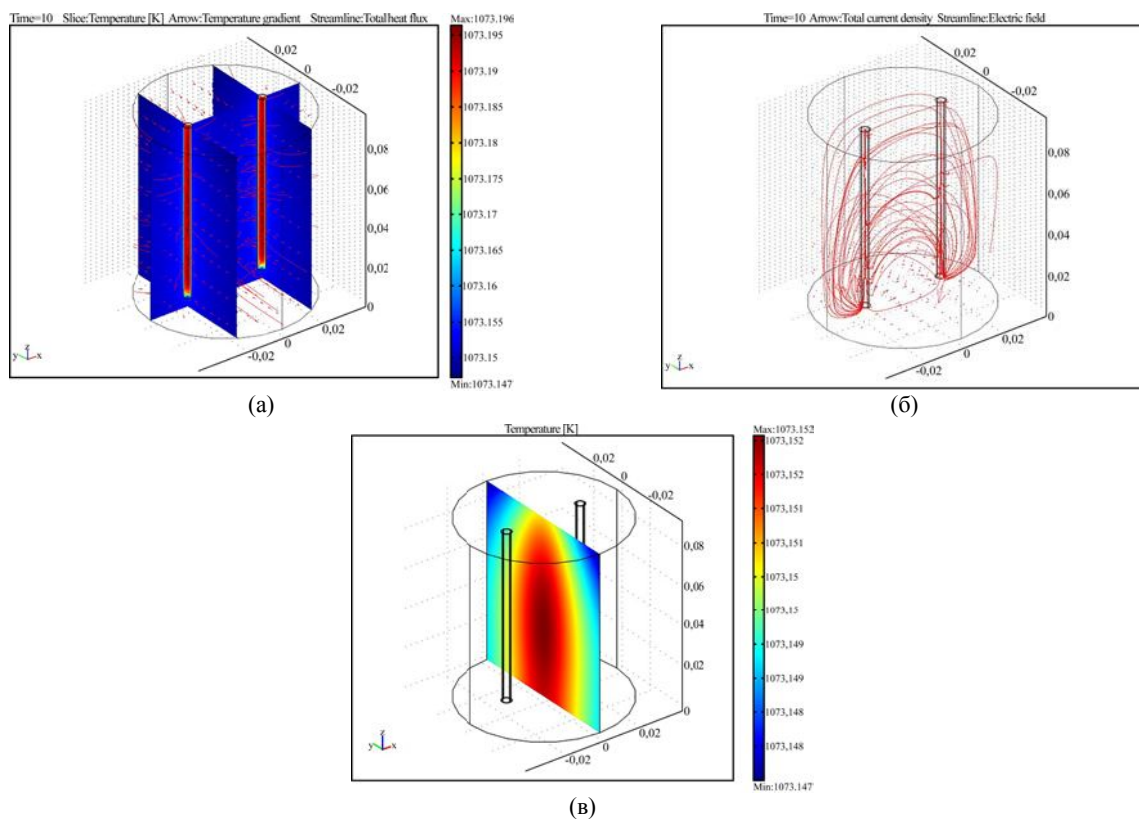
**Рис. 3.** Электродная система с двумя электродами с неизолированной боковой поверхностью (глубина погружения электродов 85 мм): (а) – температура в объеме расплава (цветовая гамма), тепловой поток (линии), градиент температуры (стрелки); (б) – поток вектора плотности тока (стрелки) и электрического поля (линии); (в) – температура в диаметральной сечении между электродами.



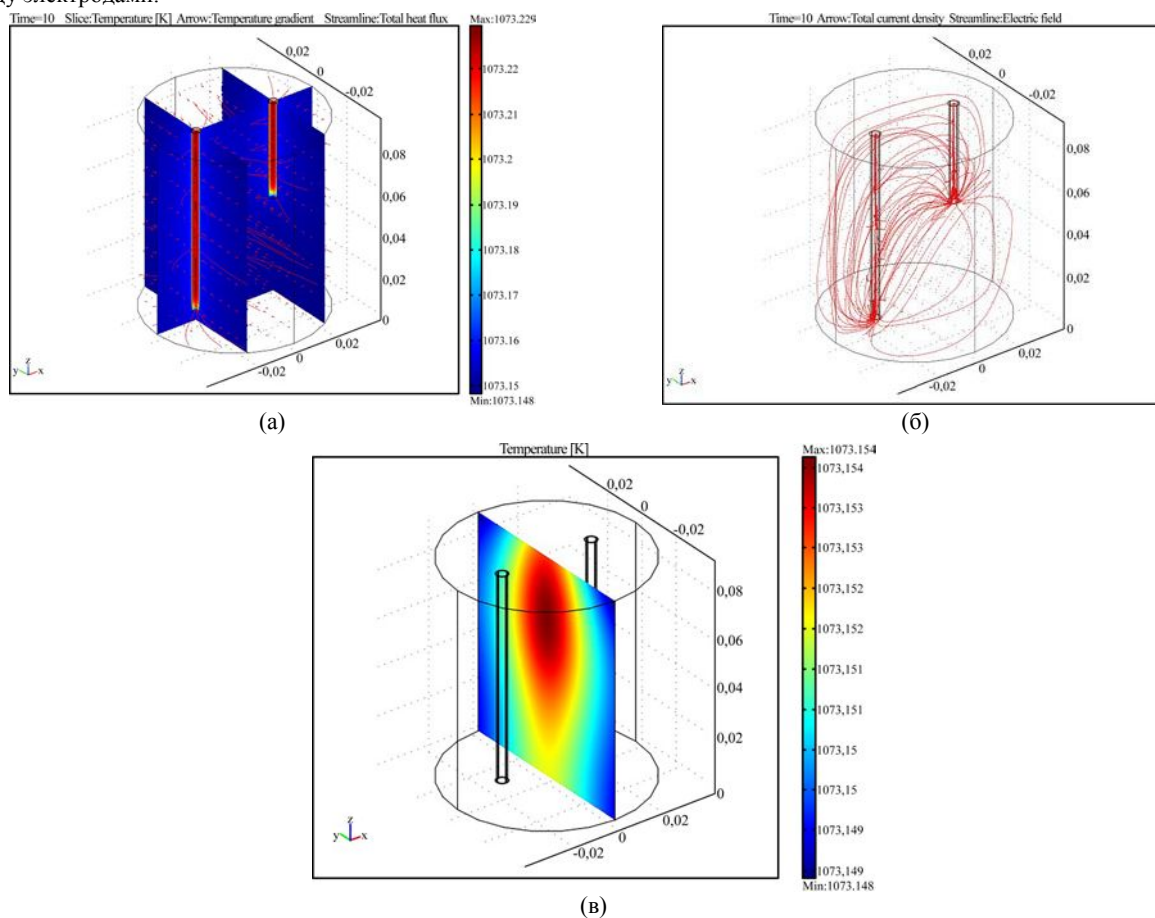
**Рис. 4.** Электродная система с двумя электродами с изолированной боковой поверхностью (глубина погружения электродов 5 мм): (а) – температура в объеме расплава (цветовая гамма), тепловой поток (линии), градиент температуры (стрелки); (б) – поток вектора плотности тока (стрелки) и электрического поля (линии); (в) – температура в диаметральном сечении между электродами.



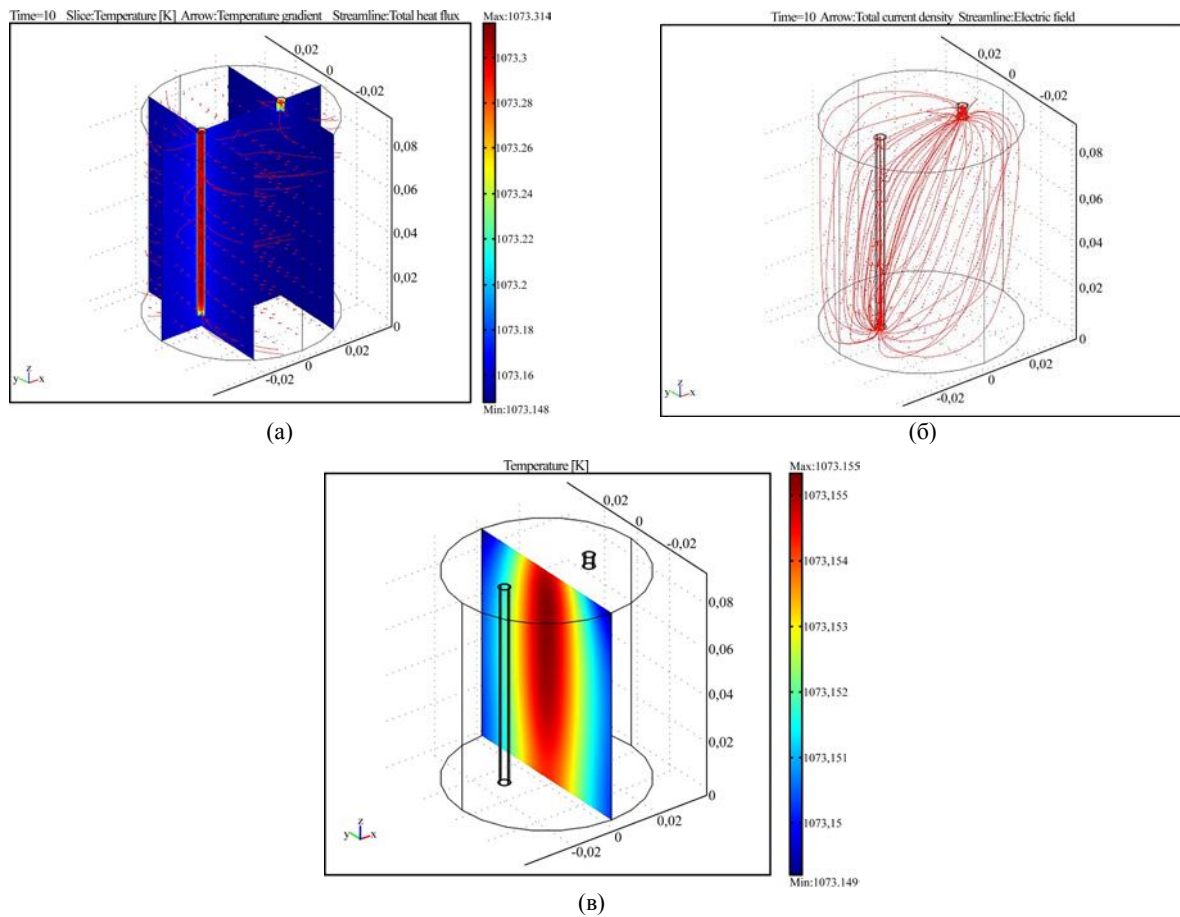
**Рис. 5.** Электродная система с двумя электродами с изолированной боковой поверхностью (глубина погружения электродов 45 мм): (а) – температура в объеме расплава (цветовая гамма), тепловой поток (линии), градиент температуры (стрелки); (б) – поток вектора плотности тока (стрелки) и электрического поля (линии); (в) – температура в диаметральном сечении между электродами.



**Рис. 6.** Электродная система с двумя электродами с изолированной боковой поверхностью (глубина погружения электродов 85 мм): (а) – температура в объеме расплава (цветовая гамма), тепловой поток (линии), градиент температуры (стрелки); (б) – поток вектора плотности тока (стрелки) и электрического поля (линии); (в) – температура в диаметральном сечении между электродами.



**Рис. 7.** Электродная система с двумя электродами с изолированной боковой поверхностью (глубина погружения электродов с положительным потенциалом 85 мм, с нулевым 45 мм): (а) – температура в объеме расплава (цветовая гамма), тепловой поток (линии), градиент температуры (стрелки); (б) – поток вектора плотности тока (стрелки) и электрического поля (линии); (в) – температура в диаметральном сечении между электродами.



**Рис. 8.** Электродная система с двумя электродами с изолированной боковой поверхностью (глубина погружения электродов с положительным потенциалом 85 мм, с нулевым 5 мм): (а) – температура в объеме расплава (цветовая гамма), тепловой поток (линии), градиент температуры (стрелки); (б) – поток вектора плотности тока (стрелки) и электрического поля (линии); (в) – температура в диаметральном сечении между электродами.

*b* с неизолированной боковой поверхностью электродов приведены значения максимальной напряженности электрического поля, которая находится в зоне раздела поверхностей «воздух-электрод-расплав» ( $E_{max}$ ) и равна 56 В/м, а также усредненной этой характеристики по объему расплава ( $E_{cp}$ ), которая равна 22 В/м. Хотя следует отметить, что в системах *a* и *b*, независимо от места расположения электродов, на глубине более  $1/3H_{расп}$  напряженность электрического поля стремится к 0.

Поскольку, как отмечено выше, происходит стекание тока с поверхности электродов, результаты для разной глубины погружения электродов с неизолированной поверхностью практически равны. Линии теплового градиента направлены от дна практически вертикально вверх и искривляются, то есть идет изменение теплового потока и градиента лишь вблизи электродов, прогрев также осуществляется только в верхней части емкости с расплавом, там, где ток стекает в расплав. Таким образом, для температуры в объеме расплава в данном случае глубина заглупления электродов не принципиальна. Данный факт также подтверждается экспериментальными данными [16], полученными при

попытке реализовать термостатирование расплава за счет пропуска в нем постоянного электрического тока.

Для электродных систем (*c–g*) с электродами, у которых боковые поверхности изолированы, результаты представлены на рис. 4–8, интегральные параметры электротермического воздействия на расплав через 10 и 300 с приведены в табл. 3.

Из приведенных данных видно, что стекание электрического тока происходит только с торцов электродов, а вдоль изолированной боковой поверхности наблюдается локальное повышение напряженности электрического поля. Это, в свою очередь, служит причиной изменений как качественного, так и количественного пространственного распределения электрического и температурного полей и их градиентов в объеме расплава в зависимости от глубины погружения электродов. В случае одинаковой глубины погружения электродов концентрация сферы теплового воздействия хотя и наблюдается вблизи торцов электродов, но интенсивность и объем такого воздействия более чем в 2 раза выше (табл. 3, *c, d*), чем в системах (*a* и *b*) с электродами, у которых боковая поверхность не



изолирована. В случае неравномерного заглубления электродов, температурному воздействию подвергается практически весь объем расплава между электродами, температурное поле и градиенты направлены к электродам вдоль изолированной поверхности, и их пространственное распределение существенно зависит от геометрии электродов. При наиболее разнесенных по глубине торцах электродов (табл. 3, *g*) наблюдается наибольший объем сферы влияния теплового воздействия (см. рис. 8), а термические характеристики одни из самых высоких для рассматриваемых типов электродных систем. Отсюда логично вытекает вывод, что и пространственное распределение магнитного поля также будет изменяться в зависимости от степени заглубления электродов, а значит, должно реализовываться различное влияние на процесс формирования силовых воздействий в расплаве. Такой подход дает возможность гибкого и целенаправленного регулирования термосиловых процессов в расплаве при КЭТО. Следует отметить, что такое регулирование термосилового воздействия изменением типа электродной системы не требует дополнительных существенных материальных затрат и может быть осуществлено непосредственно в ходе обработки.

Также наблюдается то, что для электродных систем с изолированной боковой поверхностью (*c–g*) интегральные электрические характеристики выше, чем для систем *a* и *b* с неизолированной боковой поверхностью электродов. Так, значения максимальной напряженности электрического поля ( $E_{max}$ ) достигают 220 В/м, усредненная напряженность электрического поля по объему расплава ( $E_{cp}$ ) равна 63 В/м, что практически более чем в 3 раза выше в сравнении с электродными системами *a* и *b*. Повышенные значения как интегральных, так и локальных электрических характеристик обеспечиваются в системах *c–g* за счет развитой изолированной боковой поверхности по сравнению с системами *a–b*. При увеличении разности потенциалов от 0,1 В до 0,5 В качественные картины полей не меняются, изменение происходит лишь на количественном уровне.

Таким образом, можно утверждать, что при КЭТО постоянным током пространственно-временные распределения электрического и теплового полей, а также ход процессов электротермического преобразования энергии при расчетах идентичны. На их пространственно-временное распределение влияют система токоподвода и физические свойства элементов технологической системы. Также можно с большой долей вероятности утверждать, что при

КЭТО алюминиевых (немагнитных) сплавов переменным током с частотой 50 Гц электротермические процессы не будут существенно отличаться от обработки постоянным током и должны хорошо масштабироваться с помощью критериев подобия для обработки постоянным током. В случае же быстропеременных или импульсных токов необходимы дополнительные исследования в связи с наличием сканирования электрического поля и возможного возникновения интенсивных вторичных вихревых токов в объеме массивного жидкометаллического проводника.

## ВЫВОДЫ

1. Методами математического моделирования установлены особенности распределения электрических и тепловых полей в объеме расплава при кондукционной электротокковой обработке расплавов параллельными электродами.

2. Полученные качественные и количественные данные для систем с неизолированными электродами соответствуют данным экспериментальных исследований. В частности, численно подтверждено, что глубина заглубления электродов с неизолированной боковой поверхностью не оказывает активного влияния на температурные процессы при КЭТО.

3. Установлено, что при использовании электродов с изолированной боковой поверхностью максимальная и усредненная по объему напряженности электрического поля увеличиваются более чем в три раза. Показано, что при изменении геометрии электродной системы интегральные значения величин теплового потока и температурного градиента по объему со временем меняются практически на порядок. Это дает потенциальную возможность целенаправленно влиять на эффект электротермического воздействия на расплав с помощью пространственного изменения геометрии электродной системы и изоляции боковой поверхности электродов. Причем такой способ управления электротермическими процессами при кондукционной обработке расплавов не нуждается в дополнительных финансовых затратах и может осуществляться непосредственно в ходе самой обработки.

4. Трехмерное моделирование дает возможность более полно анализировать процессы при КЭТО в объеме расплава для электродных систем с параллельными электродами не осесимметричной геометрии. Для осесимметричной геометрии в подавляющем большинстве случаев достаточно двумерной постановки задачи [7–11]. В случае систем с параллельными

электродами рассмотрение процессов при прохождении электрического тока через массивный жидкометаллический проводник в одной плоскости не позволяет установить адекватную картину полей, генерируемых в объеме расплава, а также получить конкретные количественные распределения значений пространственно-временных их характеристик.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цуркин, В.Н., Принципы системного подхода к выбору методов внепечной обработки расплава, *Металл и литьё Украины*, 2009, № 7–8, с. 12.
2. Цуркин, В.Н., Концепции управления качеством литого металла, *Металл и литьё Украины*, 2008, № 9, с. 25.
3. Кардашев, Г.А., *Физические методы интенсификации процессов химической технологии*. М.: Химия, 1990. 203 с.
4. Цуркин, В. Н., Проблемы и методы электротокковой обработки расплавов в технологиях литейного производства, *Процессы литья*, 2015, № 5, с. 3.
5. Tsurkin, V.N., Sinchuk, A.V. and Ivanov, A.V., Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 46, no. 5, с. 456.
6. Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V., Cherepovskii, S.S. and Vasyanovich, N.A., Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2016, vol. 52, no. 2, p. 56.
7. Борисов, Г.П., Цуркин, В.Н., Синчук, А.В., Иванов, А.В., О высоковольтной электроимпульсной обработке расплава, *Металлургия машиностроения*, 2010, № 5, с. 33.
8. Van, C.Y., Han, Y., Ba, Q.X. and Cui, J. Z., Influence of pulse electric current on solidification structures of Al-Sn alloy, *Materials Science Forum*, 2007, vols. 546–549, p. 723.
9. Yunhu Zhang, Chanjiang Song, Liang Zhu, Hongxing Zheng, et al., Influence of electric-current pulse treatment on the formation of regular eutectic morphology in an Al-Si eutectic alloy, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2011, vol. 42, no. 3, p. 604.
10. Ivanov, A.V., Sinchuk, A.V. and Bogoslavskaya, A.S., A study of the electromagnetic and hydrodynamic processes in a liquid-metal conductor exposed to current pulses, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, no. 1, p. 28.
11. Ivanov, A.V., Sinchuk, A.V. and Ruban, A.S., Effect of the technological parameters of the melt treatment by a electric pulse current on the mixing process, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 2, p. 180.
12. Ivanov, A.V. and Tsurkin, V.N., Peculiarities of distribution of electromagnetic and hydrodynamic fields for conductive electric current treatment of melts in different modes, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 55, no. 1, p. 53.
13. *Solidification processing of metallic alloys under external fields. Springer Series in Materials Science*, vol. 273, Dmitry G. Eskin, Jiawei Mi, eds, Springer, Cham, 2019. 328 p.
14. Подольцев, А.Д., Кучерявая, И.Н., *Элементы численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах*, Киев: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 1999. 363 с.
15. Tsurkin, V.N. and Ivanov, A.V. Peculiarities of redistribution of electric and thermal fields at the interface when passing the electric current through the melt, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 54, no. 6, p. 577.
16. Цуркин, В.Н., Череповский, С.С., Иванов, А.В., Электротокковое термостатирование расплава. *Материалы юбилейной X международной научно-практической конференции «Литье. Металлургия. 2014»*, Запорожье, 2014, с. 254. URL: <http://archive.kpi.kharkov.ua/files/40795>.

## Summary

By the methods of mathematical three-dimensional modeling, the features of the distribution of electric and thermal fields in the volume of the molten alloy of the foundry hypoeutectic silumin A356, when it is treated with an electric current by parallel electrodes, are established. It was found that the geometry of the electrode system qualitatively and quantitatively determines the effect of the electrothermal effect on the melt by the treatment of the direct current. It was demonstrated that the depth of the deepening of electrodes with a non-insulated lateral surface does not have an active influence on the temperature processes during the conduction electric current treatment. The obtained qualitative and quantitative data for the systems with non-insulated electrodes correspond to the experimental data. It is shown that a change in the spatial geometry of the arrangement of electrodes with an isolated lateral surface significantly affects the three-dimensional distribution of electric and thermal fields as well as the quantitative, more than thrice, change in the characteristics of these fields in the volume of the melt. The method of controlling of the conductive electric current treatment of melts, based on the spatial change of the type of electrode system, does not require additional financial costs and can be carried out directly during the treatment.

**Keywords:** silumin, melt, three-dimensional modeling, electric current, parallel electrodes, electric field, thermal field