

Имитационное моделирование характеристик первичного электрического поля на границах жидкометаллического объекта, обрабатываемого пропусканием электрического тока

Н. В. Честных*, А. В. Иванов

*Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, *e-mail: mykola.chestnykh@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.06.2023

После доработки 22.01.2024

Принята к публикации 29.01.2024

Предлагается использовать метод разбиения массивных проводников на элементарные ячейки для моделирования распределения характеристик первичного электрического поля на границах жидкометаллического объекта, обрабатываемого пропусканием электрического тока. Проведено имитационное моделирование характеристик электрического поля в расплаве при его обработке постоянным током из одного источника тока или одновременно двух с использованием двухэлектродной и четырехэлектродной систем соответственно. Показано, что распределение потенциалов и токов на границах емкости с расплавом в зависимости от типа электродной системы имеет качественные и количественные отличия, что определяет их многовариантность и позволяет находить благоприятные условия термосилового нагружения объекта обработки.

Ключевые слова: металлический расплав, электротоксовая обработка, имитационное моделирование, матричная формализация, граничные условия

УДК 621.745.56:621.74.02

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.098>

ВВЕДЕНИЕ

Научные исследования выполняют с помощью двух методов: физического эксперимента и формализации изучаемых явлений и процессов математическими методами. Исследования в области литейного производства в основном основывались на физическом эксперименте. Но в последние годы с развитием принципов компьютерного моделирования методы численного анализа позволили существенно расширить научно обоснованные представления о поиске эффективных методов обработки расплава, в частности, электрическим током [1–5]. При этом физическому эксперименту в основном отводится роль определения зависимости конечного результата металлургической переработки от параметров нагрузки объекта обработки. Но все же при применении математического моделирования исследователи сталкиваются с некоторыми аспектами адекватного выбора параметров формализации, например, определение граничных условий задачи, избрание для анализа известных математических моделей или их корректировка с учетом особенностей изучаемых процессов.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ

Определенное научное наследие получено при исследовании эффектов, генерируемых в

металлическом расплаве при его кондукционной электротоксовой обработке (КЭТО) [1, 6]. Для этого использовали один тип тока (переменный, постоянный или импульсный) и, конечно же, – пару электродов. Важно отметить, что каждый тип тока имеет свои функциональные возможности. Так, при обработке расплава постоянным током преобладают электротепловые процессы в объеме расплава, возникают тепловая конвекция, электроперенос, изменение термодинамических параметров на границе раздела фаз, а также химические превращения. Использование переменного тока отличается наличием колебаний и пульсаций, а при значительных частотах – возникновением скин-слоя, то есть более выраженным электросиловым нагружением. Воздействие импульсного тока схоже с переменным, но отличается наличием паузы тока и имеет широкий спектр амплитудно-частотных характеристик. Для повышения эффективности КЭТО инновационную привлекательность может иметь метод обработки расплава сразу несколькими токами, которые можно вводить в расплав автономными электродами или парой обособных. В этом случае математическое моделирование некоторым образом усложняется. В первую очередь при определении граничных условий задачи.

При имитационном моделировании распределения физических полей в расплаве при КЭТО,

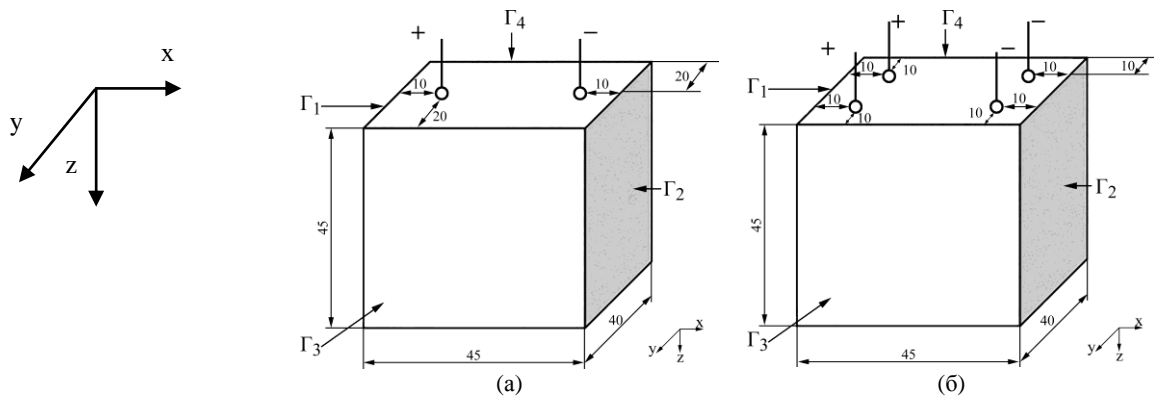


Рис. 1. Геометрические модели задачи с использованием двухэлектродной (а) и четырехэлектродной (б) систем.

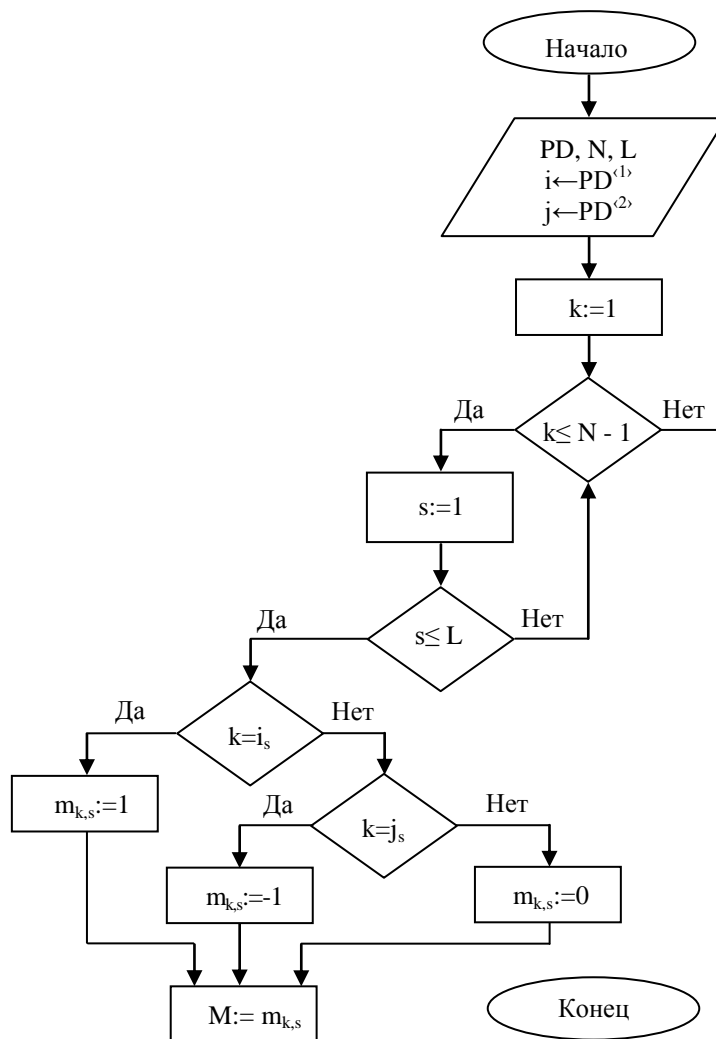


Рис. 2. Блок-схема алгоритма: PD – матрица соединений узлов; N – количество узлов; L – количество ветвей схемы замещения.

например методом конечных элементов (МКЭ), возникает проблема определения граничных условий (ГУ) для первичного (базового) электрического поля. Корректно определенные ГУ в совокупности с начальными условиями позволяют выполнить необходимое условие корректности постановки задачи. Применяемый подход использует когнитивный принцип, когда интуитивно подбираются характеристики потенциалов

и токов на границах, которые являются логичными в качественном плане и физически обоснованы по количественным показателям [6]. В этом случае полученные решения дифференциальных уравнений можно считать подлинными реальными явлениями только с некоторым предположением.

Поэтому актуальной является задача корректного определения граничных условий с

помощью известного метода, результативность которого подтверждена при решении других задач. На наш взгляд, это может быть метод, в основу которого положен принцип разбиения объекта исследований на окончательное количество ячеек. В зависимости от того, какими уравнениями описывается исследуемое поле, выбирается электрическая схема замещения для ячейки. Весь исследуемый объект моделируется как конечное число таких ячеек [7, 8]. По существу, любая полевая задача, решаемая любым численным методом (конечных элементов, контрольного объема или конечных разностей) может быть представлена в виде эквивалентной электрической цепи высокого порядка, число узлов и ветвей которой соответствует числу конечных элементов, выбранных в расчетной области [9].

Цель работы – с помощью метода разбиения массивных проводников на элементарные ячейки определить особенности распределения базового электрического поля на границах металлического расплава при его обработке одним или одновременно двумя источниками электрического тока.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При моделировании использовался метод разбиения массивных проводников на элементарные ячейки. В этом случае расчет характеристик электрического поля на границах металлического расплава производился по следующему алгоритму [10]:

1. Определяем геометрические параметры емкости с расплавом.
2. Выбираем тип электродной системы, тип тока и его параметры.
3. В зависимости от цели анализа выбираем размер и расположение элементарных ячеек.
4. В соответствии с разбиением на элементарные ячейки строим электрическую схему замещения.
5. В соответствии с электрической схемой замещения формируем матрицу инцидентности.
6. Выбираем параметры объекта обработки.
7. Проводим расчет с использованием метода узловых потенциалов в матричной форме.
8. Результат выводится в графическом виде для анализа распределения токов и потенциалов базового первичного поля.

Для анализа выбраны два варианта электродных систем: двухэлектродная и четырехэлектродная (рис. 1).

Расплав алюминия при температуре, не превышающей интервал 100 °С над температурой ликвидуса, находится в емкости,

имеющей форму прямого параллелепипеда с непроводящими стенками размером 45×40×45 мм. Выберем электрический ток (I_s), который подводится либо одним источником постоянного по амплитуде тока в случае двухэлектродной системы (ток амплитудой 100 А), либо одновременно двумя источниками постоянных по амплитуде токов амплитудой 50 А каждый с использованием четырехэлектродной системы. В данной задаче торцы электродов расположены практически под поверхностью расплава.

Объем расплава разбивался на 648 ячеек размерами 5×5×5 мм. Соответствующая электрическая схема замещения имела 900 узловых точек и 2420 ветвей. Матрица инцидентности формировалась с помощью алгоритма, блок-схема которого приведена на рис. 2.

Исследуемые грани на рис. 1 обозначены соответственно Г1, Г2, Г3, Г4.

Применим способ узловых потенциалов. Для однородных ячеек вдоль осей x , y , z принималось, что их удельное сопротивление ρ равно удельному сопротивлению алюминия при температуре ликвидуса (933,61 °К) $\rho_{Al} = 24,77 \times 10^{-8}$ Ом·м [11]. Сопротивление ячеек вдоль x , y , z определяется как:

$$R_x = \rho_{Al} \times \frac{a}{b \times \delta}; \quad R_y = \rho_{Al} \times \frac{b}{a \times \delta};$$

$$R_z = \rho_{Al} \times \frac{\delta}{a \times b},$$

где a , b , δ – размеры ячейки, м.

Далее формируется диагональная матрица сопротивлений R_{diag} . На ее основе формируем диагональную матрицу проводимостей (G): $G = 1/R_{diag}$. Тогда потенциалы всех узлов определяем по отношению к заземляющемуся базовому узлу:

$$\varphi = (M \times G \times M^T)^{-1} \times (I_s), \quad (1)$$

где I_s – величина тока, создаваемая источником тока, А; M – матрица соединений узлов, составленная по первому закону Кирхгофа; M^T – транспонированная матрица соединений узлов.

Напряжение U на всех ветвях электрической цепи определяем как:

$$U = \varphi \times M^T. \quad (2)$$

В свою очередь токи I в ветвях определяем как:

$$I = G \times U. \quad (3)$$

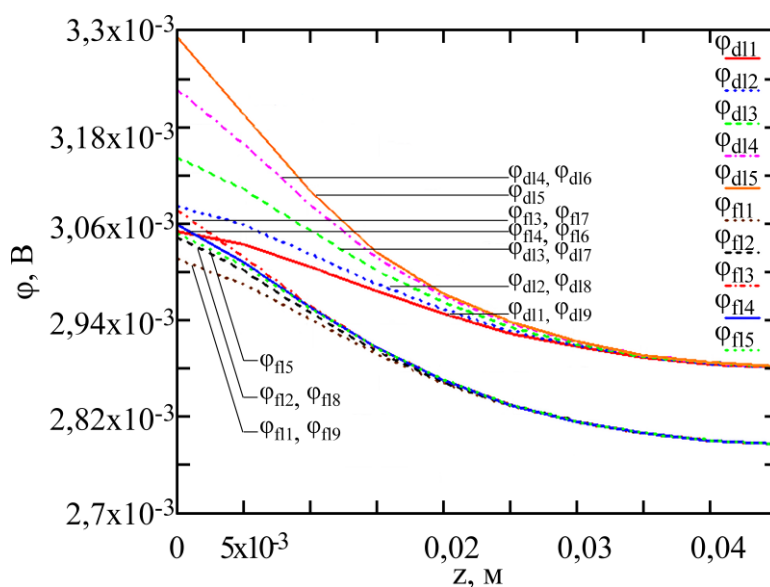


Рис. 3. Распределение потенциалов на границе (Γ_1) вдоль оси z (φ_{dl1} – φ_{dl9} – для двухэлектродной системы, φ_{fl1} – φ_{fl9} – для четырехэлектродной системы).

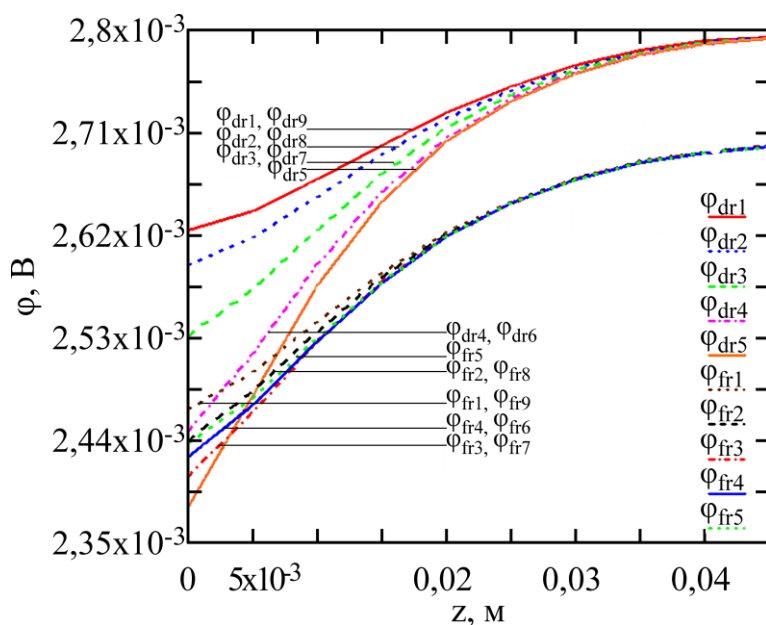


Рис. 4. Распределение потенциалов на границе (Γ_2) вдоль оси z (φ_{dr1} – φ_{dr9} – для двухэлектродной системы, φ_{fr1} – φ_{fr9} – для четырехэлектродной системы).

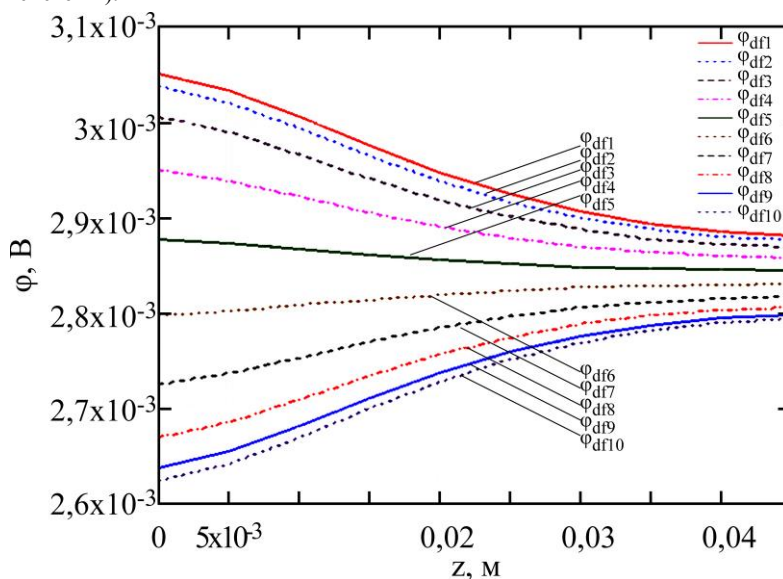


Рис. 5. Распределение потенциалов на границе (Γ_3) вдоль оси z (двухэлектродная система).

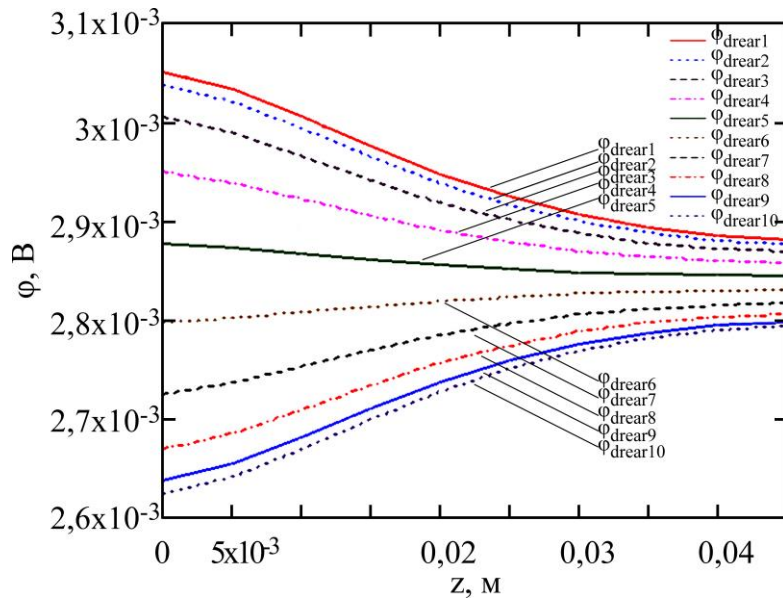


Рис. 6. Распределение потенциалов на границе (Γ_4) вдоль оси z (двухэлектродная система).

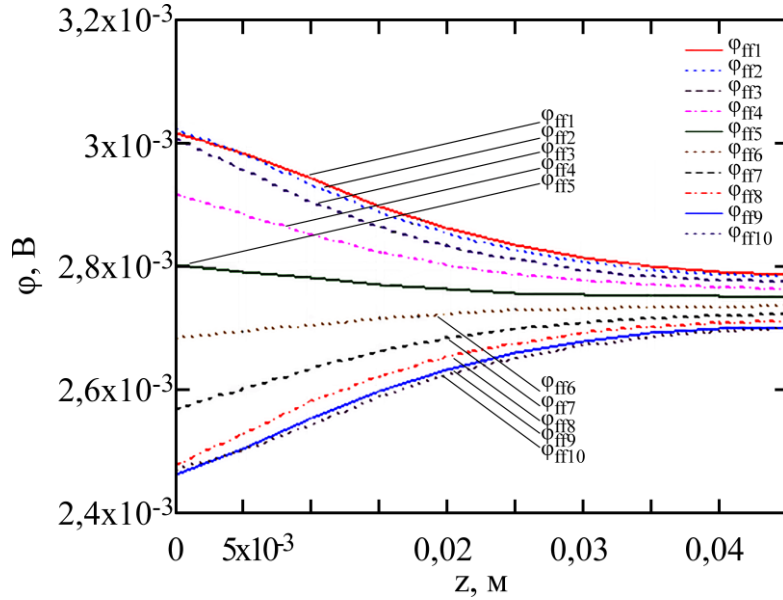


Рис. 7. Распределение потенциалов на границе (Γ_3) вдоль оси z (четырёхэлектродная система).

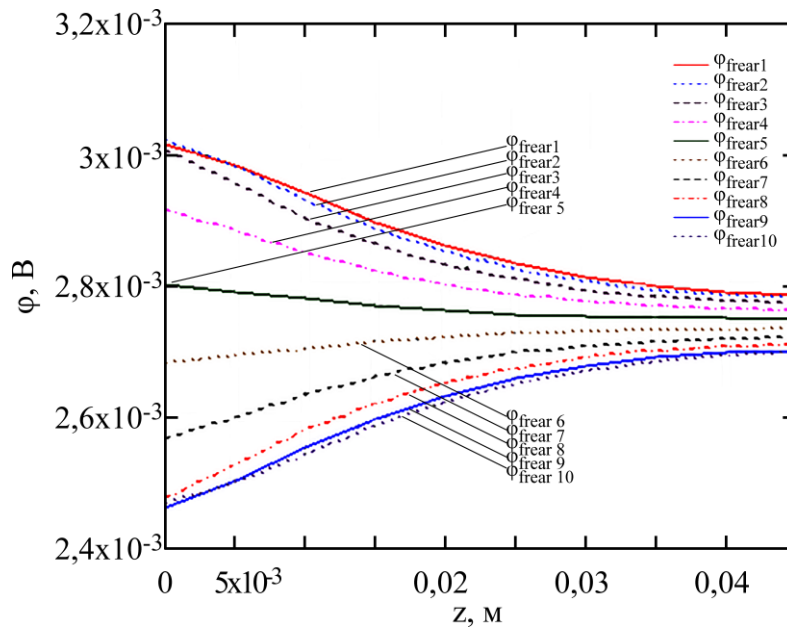


Рис. 8. Распределение потенциалов на границе (Γ_4) вдоль оси z (четырёхэлектродная система).

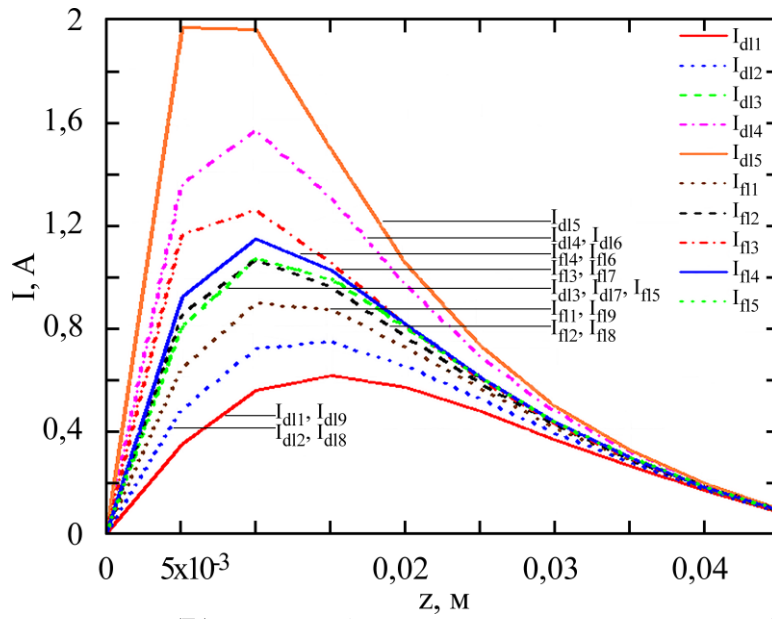


Рис. 9. Распределение токов на границе (Γ_1) вдоль оси z (I_{d11} – I_{d19} – для двухэлектродной системы, I_{n1} – I_{n9} – для четырехэлектродной системы).

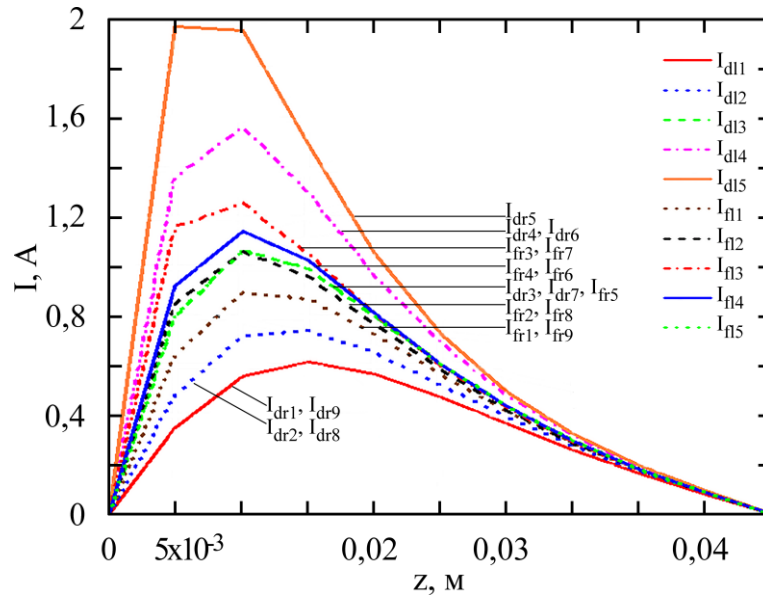


Рис. 10. Распределение токов на границе (Γ_2) вдоль оси z (I_{dr1} – I_{dr9} – для двухэлектродной системы, I_{fr1} – I_{fr9} – для четырехэлектродной системы).

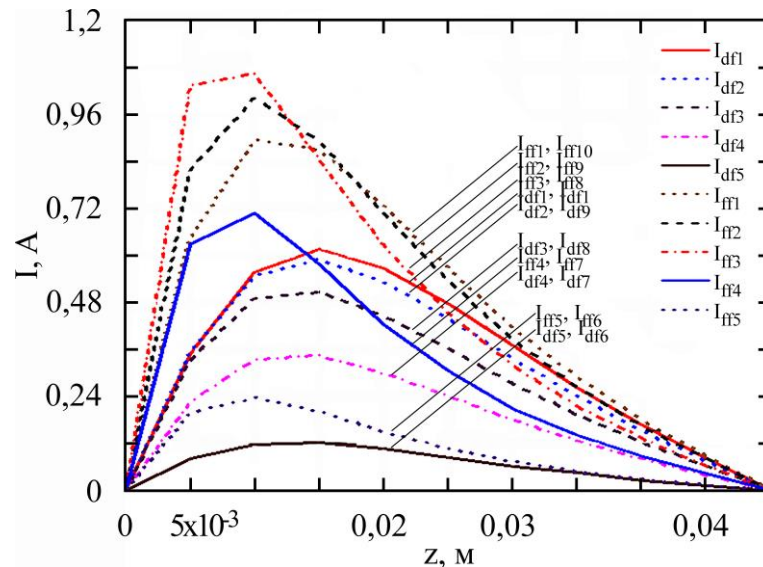


Рис. 11. Распределение токов на границе (Γ_3) вдоль оси z (I_{df1} – I_{df9} – для двухэлектродной системы, I_{ff1} – I_{ff9} – для четырехэлектродной системы).

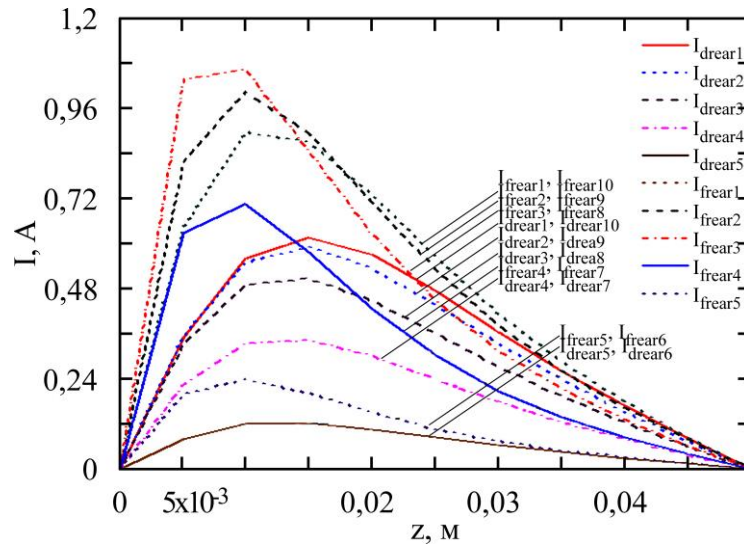


Рис. 12. Распределение токов на границе (Γ_4) вдоль оси z (I_{drear1} – I_{drear9} – для двухэлектродной системы, I_{frear1} – I_{frear9} – для четырехэлектродной системы).

Полученные распределения потенциалов и токов на границах вдоль оси z представлены на рис. 3–12. Где φ_{dl} , φ_{dr} , φ_{df} , φ_{frear} – потенциалы узлов на границах Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 , Γ_4 для двухэлектродной системы; φ_{fl} , φ_{fr} , φ_{ff} , φ_{frear} – потенциалы узлов на границах Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 , Γ_4 для четырехэлектродной системы; I_{dl} , I_{dr} , I_{df} , I_{drear} – токи на границах Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 , Γ_4 для двухэлектродной системы. Для четырехэлектродной системы соответствующие токи – I_{fl} , I_{fr} , I_{ff} , I_{frear} .

Для построения φ_{dl1} первое значение потенциала выбрано в верхней точке ребра, соединяющего Γ_1 и Γ_4 , второе – на 5 мм ниже вдоль оси z , третье – на 10 мм ниже вдоль оси z и т.д. Кривой φ_{dl2} соответствуют значения потенциалов в Γ_1 , находящиеся от φ_{dl1} на расстоянии 5 мм вдоль оси u . Сходным образом построены φ_{df} , φ_{frear} , первые значения для которых были выбраны в верхних точках ребер между Γ_1 и Γ_3 , а также Γ_1 и Γ_4 соответственно. Следующие значения потенциалов (φ_{df2} , φ_{frear2}) построены на расстоянии 5 и 10 мм вдоль оси x (φ_{df3} , φ_{frear3}) и т.д. Так же построены и кривые токов.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты показали разное качественное и количественное распределение потенциалов электрического тока и его значений для двухэлектродной и четырехэлектродной систем.

Так, на границах Γ_1 и Γ_2 (рис. 3 и 4) распределение потенциалов для четырех электродов более компактно, чем для двух электродов. На поверхности разброс их значений составляет $0,06 \times 10^{-3}$ В, что примерно составляет 2% амплитудного значения, как на Γ_1 , так и на Γ_2 . Для двух электродов на поверхности расплава разность потенциальных значений составляет $0,3 \times 10^{-3}$ В,

или 10%. Для выбранных электродов распределение потенциалов на Γ_1 и Γ_2 асимметрично. При этом у дна емкости они имеют фактически одинаковые значения, а их разница для двух и четырех электродов составляет $\approx 0,1 \times 10^{-3}$ В. Показательно, что распределение потенциалов в обоих случаях электродов симметрично относительно максимального значения.

На границах Γ_3 и Γ_4 (рис. 5 и 8) для четырех электродов распределение потенциалов более компактно, чем для двух электродов. Но у поверхности их плотность (в отличие от двух электродов) больше на 23%, а у дна – на 55%. В середине глубины – $\approx 46\%$.

Что касается распределения значений токов, то на Γ_1 и Γ_2 , независимо от типа электродов, как и для потенциалов, они формируются практически симметричными как качественно, так и количественно. Максимальные значения токов соответствуют интервалу углубления от 5×10^{-3} до 0,015 м.

На границах Γ_3 и Γ_4 наблюдается аналогичное распределение токов. Важно отметить, что максимальные значения токов при двух электродах практически в 2 раза больше, чем при четырех. Кроме того, более компактно расположены токи на Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 и Γ_4 для двух электродов.

Разница в распределении потенциалов и токов на соответствующих плоскостях граней для двух и четырех электродов, которые углублены практически у поверхности расплава, на наш взгляд, определяется двумя обстоятельствами в постановке задачи. Для четырех электродов в поле токов образуются два канала проводимости. В этом варианте токи формируются при обоюдном воздействии соответствующих соседних электромагнитных полей. Кроме того, четыре электрода расположены на 50% ближе к граням Γ_3 и Γ_4 .

Эти два условия нуждаются в более тщательном исследовании. Например, если обработка происходит одновременно разными типами токов (постоянный, переменный и импульсный). Кроме того, электроды могут быть с изолированной боковой поверхностью и различно углублены [1, 2].

ВЫВОДЫ

1. Для корректного определения особенностей распределения базового электрического поля на границах металлического расплава при прохождении через него электрического тока был использован метод разбиения массивных проводников на элементарные ячейки. Его несомненным преимуществом является то, что полученные в работе наглядные результаты логически верифицированы с физической точки зрения.

2. Показано, что распределение потенциалов и токов на границах емкости с расплавом в зависимости от типа электродной системы имеет качественные и количественные отличия. Такие обстоятельства определяют их многовариантность. Это позволяет находить благоприятные условия термосиловой нагрузки объекта обработки.

3. Метод разбиения массивных проводников на элементарные ячейки зарекомендовал себя как имеющий разнообразные функциональные и потенциальные возможности для моделирования мультифизических и многомасштабных процессов, сопровождающих кондукционную электротокую обработку расплавов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zaporozhets, Yu.M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu.P. and Tsurkin, V.M., The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. In: *Advances in Engineering Research*, Petrova, V.M., Ed., vol. 44, 2021. New York: Nova Science Publishers Inc., p. 1.
2. Zhang, Y.H., Xu, Y.Y., Ye, C.Y., Sheng, C., et al., Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, art. ID 3242. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
3. Jee Seok Choi, Moonwoo La, DongEung Kim, Kyeong-Hwan Choe, et al., Effect of electric current

on the microstructural refinement of pure aluminum, *J. Mater. Res. Technol.*, 2021, vol. 12, p. 818.

4. Gui, Wang, Matthew, Dargusch, Mark, Easton and David, StJohn, Ch. Treatment by external fields, *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, Roger N. Lumley, Ed., Woodhead Publishing, 2018, p. 279.
5. *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. Eskin, D.G., Mi, J. (Eds), Springer Int. Publishing, 2018. 320 p.
6. Ivanov, A., Distribution features of electromagnetic and hydrodynamic fields in the conductive electric current treatment of melts using parallel electrodes, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 3, p. 327.
7. Чудаков, А.Д., *Электрические моделирующие сетки и их применение*. Москва: Энергия, 1968. 137 с.
8. Fukushima, K., Kabir, M., Kanda, K., Obara, N., et al., Simulation of electrical and thermal properties of granite under the application of electrical pulse using equivalent circuit models, *Materials*, 2022, vol. 15, art. ID 1039. <https://doi.org/10.3390/ma15031039>
9. Подольцев, А.Д., Кучерявая, И.Н., *Мультифизическое моделирование в электротехнике*. Монография. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
10. Честних, М.В., Цуркін, В.М., Іванов, А.В., Черно, О.О., Моделювання розподілу електричного поля в металевому розплаві методом розбиття провідника на елементарні комірки, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2021, т. 56, № 4, с. 35.
11. Зиновьев, В.И., *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах*. Москва: Металлургия, 1989. 384 с.

Summary

The paper proposes to use the method of dividing massive conductors into elementary cells to determine the distribution of the characteristics of the primary electric field at the boundaries of a liquid metal object processed by passing an electric current. Simulation modeling of the characteristics of the electric field in the melt during its treatment with a direct current by one current source or simultaneously by two using two-electrode and four-electrode systems, respectively, was carried out. It is shown that the distribution of potentials and currents at the boundaries of the container with the melt, depending on the type of the electrode system, has qualitative and quantitative differences, which determines their multivariance and makes it possible to find favorable conditions for the thermal force load of the processing object.

Keywords: metal melt, electric current treatment, simulation modeling, matrix formalization, boundary conditions