

# Особенности распределения электромагнитных и гидродинамических полей при кондукционной электротоковой обработке расплавов параллельными электродами

А. В. Иванов

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [Ivanov.A.V@nas.gov.ua](mailto:Ivanov.A.V@nas.gov.ua)*

Поступила 06.09.2018

После доработки 12.07.2019

Принята к публикации 18.07.2019

Методами численного эксперимента определены особенности распределения электромагнитных и гидродинамических полей при кондукционной электротоковой обработке расплавов параллельными электродами. Показано, что путем изоляции боковых стенок и варьированием глубиной погружения электродов можно создавать локальные концентрации электромагнитного поля, избегать стекания тока через стенки электродов и увеличивать интенсивность обработки. Использование разнозаглубленных электродов с изолированной боковой поверхностью позволяет (без дополнительных финансовых и энергетических затрат) интенсифицировать воздействие на расплав при кондукционной электротоковой обработке.

*Ключевые слова:* расплав, кондукционная электротоковая обработка, электромагнитное поле, гидродинамическое поле, параллельные электроды.

УДК 537.528:669.017.16

DOI: 10.5281/zenodo.3522270

## ВВЕДЕНИЕ

Кондукционная электротоковая обработка (КЭТО) жидких и кристаллизующихся металлов и сплавов является эффективным современным методом формирования благоприятной структуры и свойств литого металла. Это подтверждается множественными публикациями, особенно за последнее десятилетие [1–8]. В частности, было показано, что электротоковая обработка влияет на все уровни структуры расплава, процессы образования зародышей кристаллизации, процессы агрегации микро- и макровключений, перемешивания расплава, дегазацию и его флотацию. Установлено влияние режима тока, конфигурации электромагнитных, тепловых и гидродинамических полей, сопутствующих протеканию тока через расплав, на сам процесс обработки и ее результат.

Важным обстоятельством является то, что ряд работ последнего времени, посвященных КЭТО, подтверждает гипотезу о том, что основным интегральным параметром, определяющим положительное влияние такой обработки, является электромагнитное поле, возникающее в расплаве при прохождении тока [7]. Именно генерируемое в расплаве первичное электромагнитное поле, а не плотность или сила тока, как считалось ранее, определяет зону (сферу)

влияния на расплав, время обработки и степень воздействия возникающих при этом эффектов на результат обработки. Под зоной (сферой) влияния подразумевают области, в которых поле, которое даже при обработке постоянным током существенно неоднородно в объеме обрабатываемого расплава, позволяет реализовывать эффективное влияние на него путем достижения необходимых градиентов давления, скорости, температуры и т.д. Такой подход в рамках теории поля при оценке эффективности воздействия на металл, с одной стороны, позволяет более полно понять и описать процессы в расплаве при прохождении через него тока, наиболее точно выбрать параметры воздействия. С другой стороны, он требует учета большого числа нелинейных кооперативных факторов, влияющих на конечный результат обработки.

Данный факт затрудняет формализацию и разработку общих рекомендаций к технологии КЭТО расплавов. Поэтому исследования, направленные на получение новых теоретических и экспериментальных данных о КЭТО-расплавов, аспектов формализации и систематизации подходов к разработке научно обоснованных рекомендаций и технологических приложений в современном литейном производстве представляются актуальной научно-практической задачей.

Одним из ключевых технологических факторов КЭТО является система электродов, посредством которых ток подводится в расплав, поскольку именно электродная система определяет пространственную конфигурацию электромагнитного поля в обрабатываемом металле. Наиболее часто употребляемые типы электродных систем – это системы с осевой симметрией электродов или с их параллельным расположением относительно оси формы с расплавом. Но система с двумя параллельными электродами является наиболее простой и технологичной. Однако и ее можно реализовать различными вариантами, отличающимися степенью заглупления в расплав каждого из электродов.

Цель работы: методами математического моделирования определить функциональные возможности системы параллельных разнозаглупленных электродов при кондукционной электроплавной обработке расплавов.

#### ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В данной работе рассматриваются варианты систем с параллельными электродами одинаковой толщины и из одинакового материала, представленные на рис. 1.

Моделирование электромагнитных процессов в жидком металле при макроскопическом подходе выполним путем решения уравнений Максвелла с определенными граничными условиями, записанными в дифференциальной форме. Это позволит нам использовать для решения численные конечно-разностные методы [4, 9–11]. При моделировании примем безындукционное приближение, то есть электромагнитное поле и гидродинамические процессы будут рассматриваться независимо друг от друга.

В общем случае для квазистационарного электромагнитного поля система уравнений записывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times H &= J = \sigma(E + v \times B) + J_e, \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, \\ \nabla \cdot B &= 0, \\ \nabla \cdot D &= 0, \\ \nabla \cdot J &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\nabla$  – оператор набла;  $H$  – напряженность магнитного поля в расплаве, А/м;  $J$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость, См/м;  $E$  – напряженность электрического поля, А/м;  $v$  – скорость расплава, м/с;  $B$  – индукция магнитного поля в расплаве, Тл;  $J_e$  – плотность наведенных (сторонних) токов, А/м<sup>2</sup>;  $D$  – электрическая индукция, Кл/м.

Возникающая при этом объемная электромагнитная сила определяется из выражения:

$$\vec{F}_{ЭМ} = \vec{J} \times \vec{B}. \quad (2)$$

Примем, что движение жидкого металла возникает только под влиянием объемной электромагнитной силы, тогда гидродинамические процессы в жидком металлическом проводнике рассмотрим путем численного решения уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости при  $\nabla \vec{v} = 0$  [9, 11]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -(v \times \nabla)v + \gamma \Delta P + \frac{\vec{F}_{ЭМ}}{\rho}, \quad (3)$$

где  $\vec{F}_{ЭМ}$  – объемная электромагнитная сила, Н/м<sup>3</sup>;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\gamma$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $P$  – давление, Па.

Примем, что плотность сторонних токов  $J_e = 0$  и напряженность магнитного поля на оси  $Z$  равны 0. Начальные условия приняты нулевыми:  $H_z|_{t=0} = 0$ ;  $I|_{t=0} = 0$ ;  $v|_{t=0} = 0$ .

Проанализируем поставленную задачу для режима постоянного тока  $I(t) = I_0 = \text{const}$ .

Для понимания характеристик процессов рассмотрим сечение в такой системе, которое проходит через оси электродов, как показано на рис. 2.

В данном случае у магнитного поля будет одна составляющая,  $H_z$ .

Начальные условия:  $H_z|_{t=0} = 0$ ;  $I|_{t=0} = 0$ ;  $v|_{t=0} = 0$ .

Граничные условия, исходя из учета взаимодействия проходящих через электроды токов, сформулируем в соответствии с рис. 2:

$$\text{область 2:} \quad H_z = \frac{I_0 \cdot (d - x)}{2 \cdot \pi \cdot r_3^2};$$

$$\text{область 3:} \quad H_z = \frac{I_0 \cdot (x - d)}{2 \cdot \pi \cdot r_3^2};$$

области 4, 5:

$$H_z = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot (x - d)} + \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot ((D - d) - x)};$$

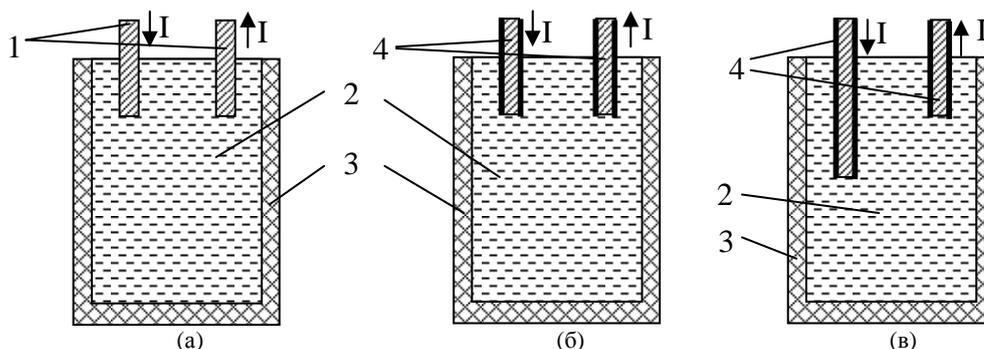
$$\text{область 6:} \quad H_z = \frac{I_0 \cdot ((D - d) - x)}{2 \cdot \pi \cdot r_3^2};$$

$$\text{область 7:} \quad H_z = \frac{I_0 \cdot (x - (D - d))}{2 \cdot \pi \cdot r_3^2};$$

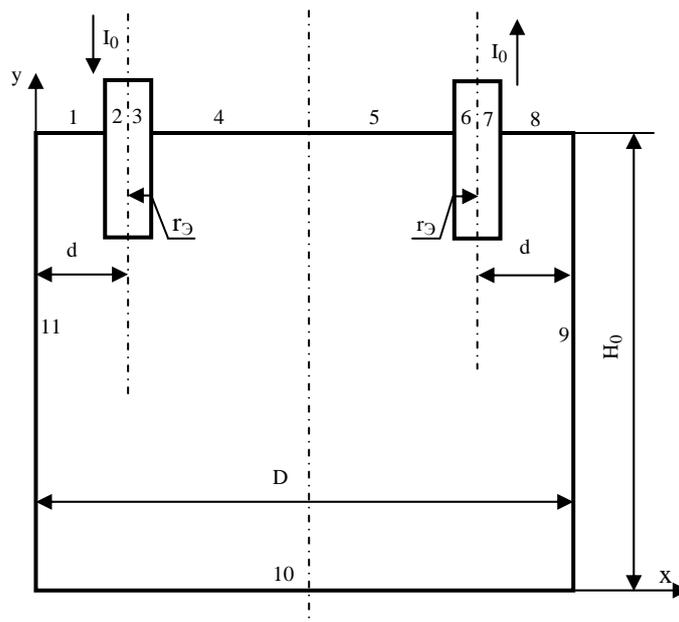
области 1, 8, 9, 10, 11:  $H_z \rightarrow 0$ .

Для гидродинамической задачи согласно рис. 2 на границах 1, 4, 5, 8 задавалось условие нормального давления. На остальных границах задавалось условие прилипания.

Для расчета примем следующие геометрические размеры, мм:  $H_0 = 90$ ;  $r_3 = 2$ ;  $D = 90$ ;  $d = 12$ . В случае электродов с изолированными стенками толщина изоляции принималась равной



**Рис. 1.** Электродные системы для КЭТО: (а) с неизолированными равнозаглубленными электродами; (б) с изолированными равнозаглубленными электродами; (в) с изолированными разнозаглубленными электродами: 1 – неизолированные электроды; 2 – расплав; 3 – неэлектропроводная емкость с расплавом; 4 – электроды с изолированной боковой поверхностью.



**Рис. 2.** Расчетная схема.

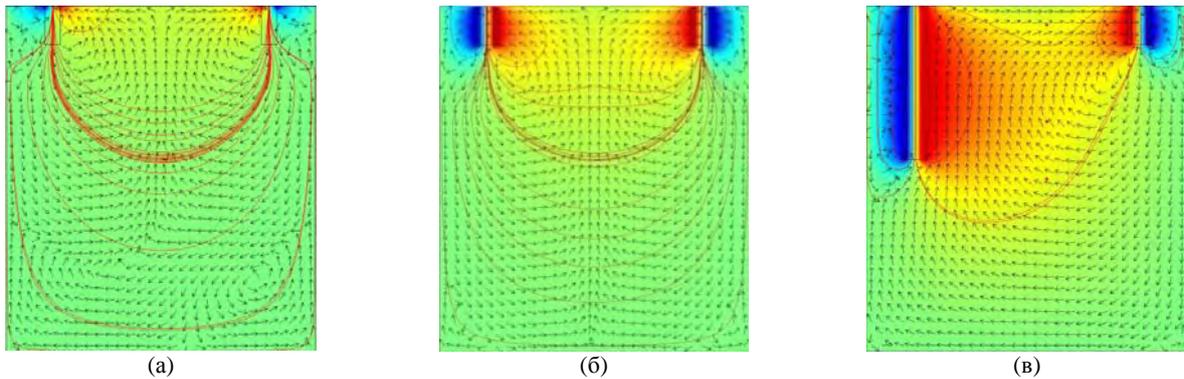
0,5 мм, материал – керамика. Материал электродов – титан. Температура проводника 700°C, проводимость алюминия при этой температуре  $\sigma_{Al} = 3,8 \cdot 10^6$  См/м, проводимость титана  $\sigma_{Ti} = 6,6 \cdot 10^5$  См/м. Для режима постоянного тока  $I_0$  бралось 1 и 10 А, время всего процесса численного моделирования составляло 300 с. Такое время обработки и геометрические размеры емкости с металлом были выбраны из литературных источников и являются достаточными для дальнейшей экспериментальной проверки, которая позволит учесть существенную неравномерность электромагнитных полей в объеме расплава и обеспечит необходимые термодинамические условия кристаллизации, что в дальнейшем должно облегчить масштабируемость полученных результатов с помощью критериев подобия.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

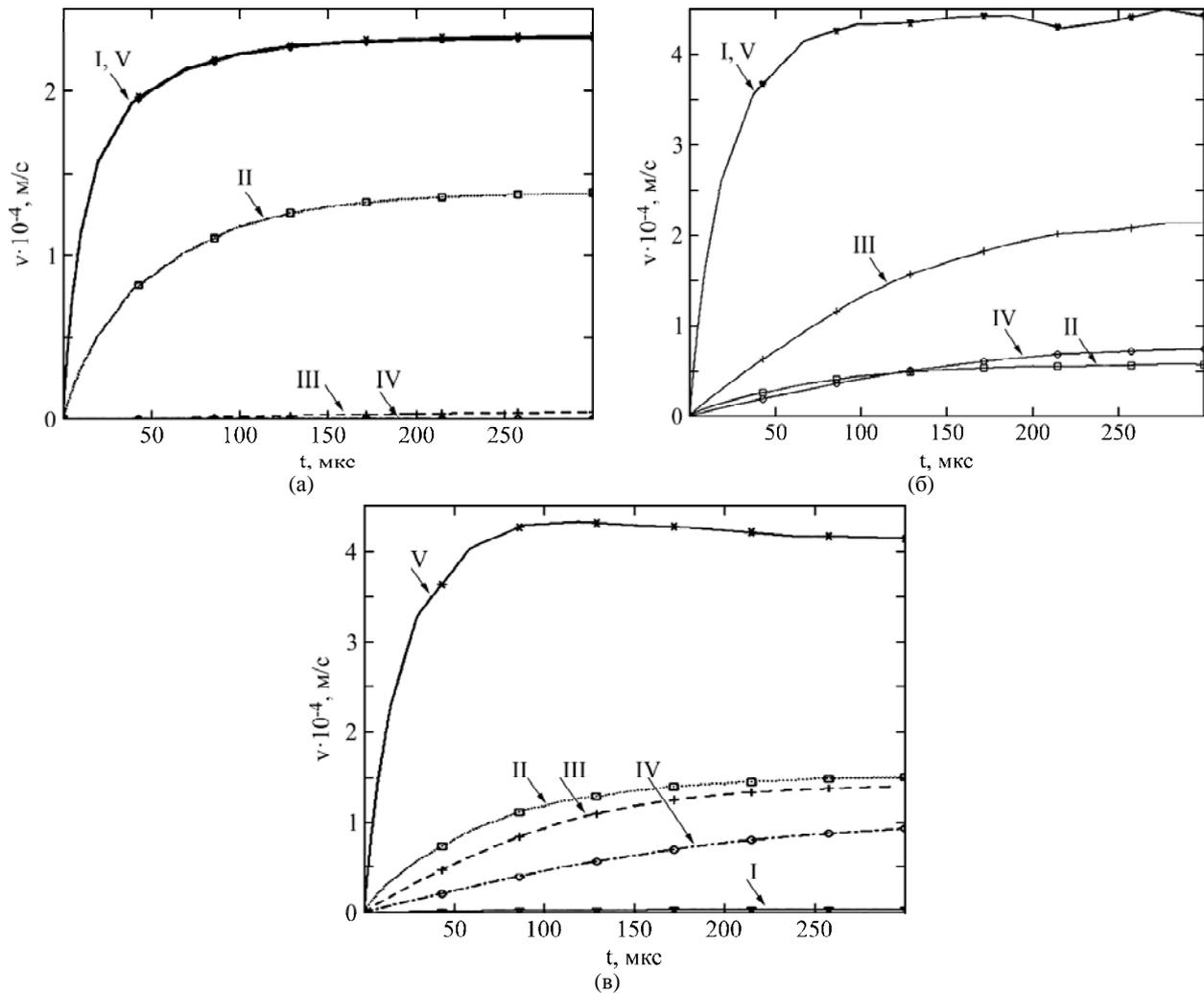
При обработке током  $I_0 = 1$  А распределение магнитного, гидродинамического полей и

плотности тока в объеме расплава приведены на рис. 3. Численные значения скоростей течений даны на рис. 4 в точках с координатами I(0,02; 0,085), II(0,04; 0,085), III(0,04; 0,06), IV(0,04; 0,045), V(0,06; 0,085) (см. рис. 2).

При пропускании тока амплитудой 1 А в расплаве генерируются электромагнитные поля и поля течений, которые имеют устойчивую конфигурацию на протяжении всего процесса моделирования, время которого составляло 300 с. Однако, как можно видеть из рис. 3, при изоляции электродов и различной глубине их заглубления, в связи с перераспределением сферы влияния генерируемого в расплаве электромагнитного поля, качественная картина течений существенно меняется. Различия в количественных значениях скоростей (рис. 4б,в) не существенны. Однако в системе с одинаково заглубленными электродами в точках I, V вблизи электродов скорости максимальны и равны в силу симметрии, чего в электродной системе с разнозаглубленными электродами не наблюдается. Таким образом, уже на данном этапе



**Рис. 3.** Распределение магнитного поля (градиенты оттенков цвета), плотности тока (линии векторного потока) и векторов скорости движения расплава (в виде стрелок) в случае электродной системы: (а) с неизолированными равнозаглубленными электродами; (б) с изолированными равнозаглубленными электродами; (в) с изолированными разнозаглубленными электродами.



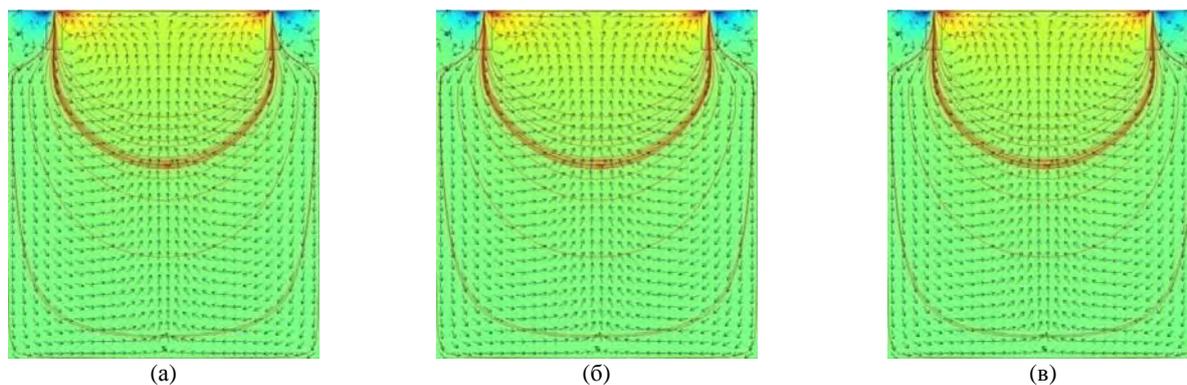
**Рис. 4.** Значения скоростей в точках I, II, III, IV, V (постоянный ток амплитудой 1 А).

численных исследований подтверждается гипотеза о возможности целенаправленного качественного и количественного регулирования процессами КЭТО расплава путем использования изолированной поверхности электродов и глубины их погружения. Увеличение сферы влияния поля, генерируемого в расплаве, за счет изоляции электродов и изменения глубины их погружения также потенциально позволяет активизировать и управлять процессами перераспре-

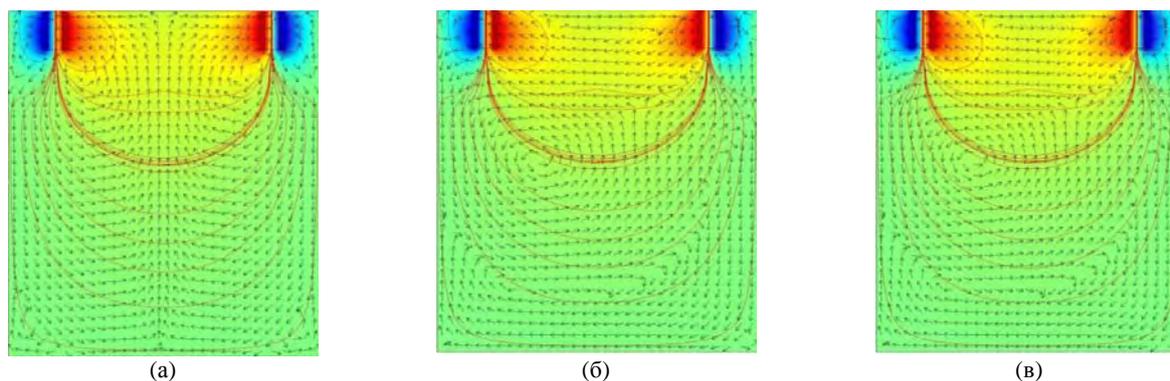
деления неметаллических частиц, активизировать диффузионные процессы перераспределения легирующих и модифицирующих элементов в объеме расплава.

Результаты моделирования при  $I_0 = 10$  А приведены на рис. 5–8.

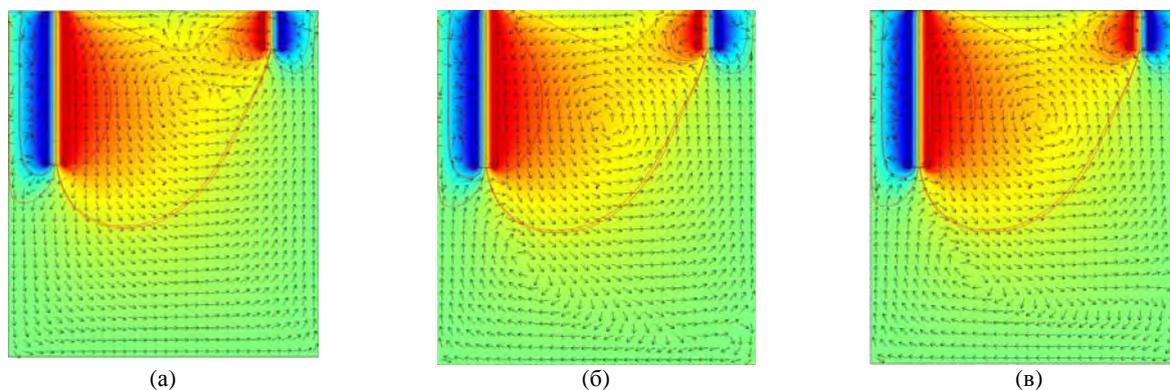
Из рис. 7, 8 видно, что повышение силы тока до 10 ампер приводит к существенному качественному и количественному изменению картины гидродинамических процессов при КЭТО с



**Рис. 5.** Распределение магнитного поля, плотности тока и векторов скорости движения расплава (сила тока 10 А) в случае электродной системы с неизолированными равнозаглубленными электродами: (а) – время 10 с; (б) – время 150 с; (в) – время 300 с.



**Рис. 6.** Распределение магнитного поля, плотности тока и векторов скорости движения расплава (сила тока 10 А) в случае электродной системы с изолированными равнозаглубленными электродами: (а) – время 10 с; (б) – время 150 с; (в) – время 300 с.



**Рис. 7.** Распределение магнитного поля, плотности тока и векторов скорости движения расплава (сила тока 10 А) в случае электродной системы с неизолированными разнозаглубленными электродами: (а) – время 10 с; (б) – время 150 с; (в) – время 300 с.

течением времени. Скорости течений достигают значений единиц мм/с, течения существенно меняют свой характер в объеме расплава, возбуждаются вторичные течения, которые кардинально изменяют симметричную картину, такую, как на рис. 2а,б. Более наглядны и существенны эти изменения в системах с изолированными электродами. Это также подтверждается зависимостями скоростей течений, которые, как и предполагалось, выше (в 2 раза) и в системах с изолированными электродами имеют ярко выраженные неоднородности, максимумы и минимумы, причем характер этих

изменений зависит от степени разности заглубления электродов. Хотя стоит отметить, что система с изолированными электродами более «предсказуема», то есть процессы в ней более стабильны во времени и подобны при изменении силы тока, что упрощает выбор электротехнологических параметров при КЭТО, что, конечно же, хорошо. Однако для достижения необходимой интенсивности воздействия нужно повышать параметры источника тока. Объем сферы влияния в системе с неизолированными электродами также в разы меньше, что отражается на времени, которое необходимо для обработки

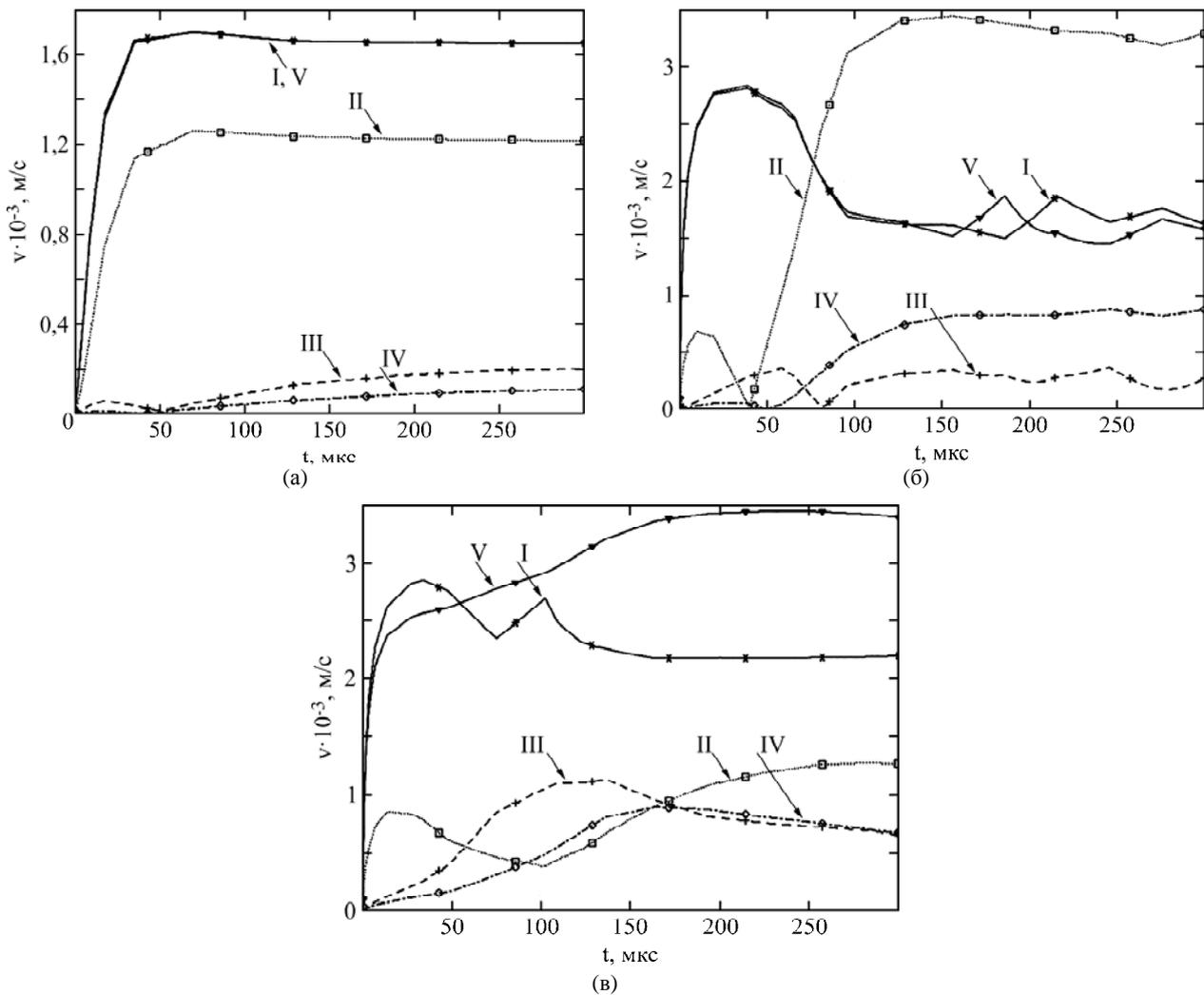


Рис. 8. Значения скоростей в точках I, II, III, IV, V (постоянный ток амплитудой 10 А).

всего объема расплава. Рассмотренные в работе варианты параллельных электродных систем, конечно же, не являются исчерпывающими. Поэтому представленные далее выводы по задаче могут быть в дальнейшем дополнены. Но в целом они показывают, что использование вариантов электродных систем с изолированной боковой поверхностью электродов при их различной степени заглубленности в жидкий металл позволяет, не повышая финансовых и энергетических затрат на обработку, качественно и количественно влиять на интенсивность и характеристики термосилового воздействия на обрабатываемый расплав.

#### ВЫВОДЫ

1. Методами математического моделирования определены функциональные возможности системы параллельных электродов по управлению интенсивностью воздействия за счет введения изоляции боковых поверхностей электродов и их заглубления в расплав.

2. Показано, что путем изоляции боковых стенок можно создавать локальные места

концентрации электромагнитного поля, избегать стекания тока через стенки электродов и за счет этого увеличивать интенсивность воздействия. Это выражается в повышении (более чем в 2 раза) скорости течений, а значит, более активном перемешивании всего объема расплава.

3. Установлено, что использование разнозаглубленных электродов с изолированной боковой поверхностью является дополнительным технологическим фактором, не требующим финансовых и энергетических затрат, и позволяет более активно влиять на характер и интенсивность термосилового воздействия на расплав при кондукционной электротокковой обработке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tsurkin V.N., Sinchuk A.V. and Ivanov A.V. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2011, **46**(5), 456–464.
2. Цуркин В.Н. *Процессы литья.* 2015, (5), 3–10.
3. Борисов Г.П., Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. *Металлургия машиностроения.* 2010, (5), 33–39.
4. Chunyan Ban, Han Yi, Qixian Ba, Jianzhong Cui. *Electromag Process Mater.* 2007, (8), 34–37.

5. Yunhu Zhang, Chanjiang Song, Liang Zhu, Hongxing Zheng. *Metall Mater Trans B*. 2011, **42**(3), 604–611.
6. Guangming Xu, Jiawei Zheng, Yong Liu, Jianzhong Cui. *China foundry*. 2005, **2**(3), 171–175.
7. Tsurkin V.N., Ivanov A.V., Cherepovskii S.S., Vasyanovich N.A. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2016, **52**(2), 181–185.
8. Nakada M., Shiohara Y., Flemings M.C. *ISIJ International*. 1990, **30**(1), 27–33.
9. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. *Элементы численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах*. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 1999. 363 с.
10. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Bogoslavskaya A.S. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(1), 28–34.
11. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Ruban A.S. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2012, **48**(2), 180–186.

### Summary

The work specifies the features of the distribution of electromagnetic and hydrodynamic fields in the conductive electric current treatment of melts by parallel electrodes via the methods of numerical experiments. It was shown that by isolating the side walls and varying the depth of immersion of the electrodes, it is possible to create local places of concentration of the electromagnetic field, to avoid the flow of current through the electrode walls, and, thereby, to increase the intensity of the treatment. It has been established that the use of electrodes with varying the depth of immersion and with an isolated lateral surface is an additional factor that does not require financial and energy costs, which allows more active influence on the intensity of the effect on the melt during conductive electric current treatment.

*Keywords:* melt, conductive electric current treatment, electromagnetic field, hydrodynamic field, parallel electrodes.