МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.187.2 EDN: LZWXXS

Кухарев А. Л.
Донбасский государственный технический университет
E-mail: alex.kuharev@mail.ru

О ЗАВИХРЕННОСТИ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ РАСПЛАВА

Представлены результаты численного исследования полей завихренности при электровихревых течениях расплава в полусферической ванне установки с осесимметричными электродами. Выявлены и проанализированы механизм формирования ядра завихренности вблизи погруженного в расплав электрода, характер изменения вихревых структур по глубине ванны, а также особенности влияния эволюции электровихревых течений и турбулентности на изменение поля завихренности.

Ключевые слова: *расплав, электровихревое течение, закрутка струи, завихренность.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Современное развитие ряда металлургических технологий связано с применением различных электромагнитных воздействий на расплав для его рафинирования, а также интенсификации процессов температурной и химической гомогенизации [1, 2].

Протекающий через расплав электрический ток, взаимодействуя с собственным магнитным полем, способствует формированию в расплаве электровихревых течений (ЭВТ), которые характеризуются азимутальной закруткой, т. е. вращательным движением струи вокруг оси симметрии. При этом магнитное поле Земли и внешние магнитные поля усиливают интенсивность закрутки [3, 4].

Для исследования особенностей закручивания ЭВТ в работе [5] нами использовался анализ полей азимутальной компоненты вектора скорости в различные моменты времени. В дополнение к этому анализу для идентификации и исследования топологии вихревых структур целесообразно использовать переменную завихренности, характеризующую интенсивность вращательного движения жидкости в данной точке потока [6].

Некоторые исследования завихренности ЭВТ проведены в работе [4] для условий воздействия внешних магнитных полей. Для данного вида течений остались недостаточно изученными особенности распределения завихренности при отсутствии внешних магнитных полей, а также влияние эволюции ЭВТ на изменение поля завихренности.

Постановка задачи. Данная статья является продолжением работы [5], в которой нами численно исследована эволюция азимутальных возмущений ЭВТ расплава в полусферической ванне установки с осесимметричными электродами во временном диапазоне t [0, 100] с. В ранее опубликованных наших работах приведены особенности конструкции данной установки, методика моделирования и верификация численных результатов.

Целью настоящей работы является анализ полей завихренности при эволюции ЭВТ.

Объект исследования — токопроводящие расплавы в технологических установках.

Предмет исследования — нестационарные электровихревые течения в расплаве.

Задачи исследования:

– математическая постановка задачи анализа завихренности;

– анализ полей завихренности в сечениях ванны в различные моменты времени;

– выявление закономерностей влияния эволюции ЭВТ на распределение завихренности в расплаве.

Методика исследования. Нестационарные гидродинамические процессы ис-

следовались в полусферической ванне диаметром 188 мм, заполненной эвтектическим сплавом: индий — галлий — олово при токе в электродах 250 А.

Одной из основных особенностей работы данной установки является погружение верхнего электрода (медный стержень диаметром 5 мм с полусферическим торцом [3]) в расплав на глубину своего радиуса (2,5 мм), что также учтено нами при моделировании.

Изложение материала. Плотность завихренности является псевдовекторной величиной и определяется как ротор скорости [7]:

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v}, \qquad (1)$$

где $\vec{v}$ — вектор скорости, м/с.

В общем случае применение операции ротора $\nabla\times$ к уравнению Навье — Стокса позволяет получить уравнение для завихренности [7]. Для наших условий моделирования это уравнение может быть записано в виде

$$\frac{\partial\vec{\omega}}{\partial t} + (\vec{v}\cdot\nabla)\vec{\omega} - (\vec{\omega}\cdot\nabla)\vec{v} = \\ = \frac{\eta_{эф}\nabla^2\vec{\omega}}{\rho} + \nabla\times\left(\frac{\vec{F}_{эм}}{\rho}\right), \qquad (2)$$

где ρ — плотность, кг/м^3, $\eta_{эф}$ — эффективный коэффициент динамической вязкости, Па·с; $\vec{F}_{эм}$ — электромагнитная сила, Н/м^3.

В левой части уравнения (2) первый член описывает изменение завихренности во времени, второй — конвективный член, характеризующий силы инерции, а третий член характеризует растяжение или наклон поля завихренности из-за градиентов скорости потока. В правой части уравнения (2) первый член характеризует диффузию завихренности из-за эффектов вязкости, а второй член — изменение завихренности, вызванное ротором силы Лоренца.

В данной работе нами также определялись интегральные значения завихренности в горизонтальных сечениях ванны:

$$\omega_S = \int_S \omega dS, \qquad (3)$$

где S — площадь соответствующего сечения ванны, м^2, перпендикулярного вертикальной оси Z, направленной вверх.

В начале рассмотрены графики распределения завихренности в горизонтальных сечениях ванны расплава в момент времени $t = 20$ с (рис. 1). К этому моменту времени ЭВТ уже полностью развито, но эффекты турбулентности еще незначительны [5].

Из рисунка 1, *а* видно, что вокруг оси ванны формируется ядро завихренности с максимальными значениями ~153 с$^{-1}$, при этом вне ядра завихренность близка к нулю. Отметим, что структура линий завихренности в ядре близка к спиральной, а диаметр ядра $D_я$ относительно диаметра ванны $D_в$ составляет $D_я \approx 0{,}05D_в$.

По мере движения вглубь ванны $D_я$ увеличивается, что также характерно для струйных течений [6]. Так, в сечениях при $Z = -30$ мм — $D_я \approx 0{,}08D_в$, при $Z = -60$ мм — $D_я \approx 0{,}13D_в$, а в сечении при $Z = -90$ мм — $D_я \approx 0{,}2D_в$.

Как видно из рисунков 1, *б* и *в*, максимальные значения завихренности в средней по глубине части ванны более чем в 2 раза меньше, чем на рисунке 1, *а*, область высокой завихренности образуется также вдоль боковых стенок ванны.

В придонной части ванны (рис. 1, *г*) наблюдается картина «размывания» завихренности, т. е. выравнивание ее значения по данному сечению. При этом поле завихренности имеет вид, близкий к концентрическим окружностям. Значения завихренности на оси ванны минимальны, а на ее периферии — максимальны.

В целом поля завихренности, показанные на рисунке 1, практически симметричны относительно оси ванны.

Отметим, что на основании анализа полей скорости нами выявлено, что причиной появления очагов завихренности вблизи боковых стенок ванны являются градиенты скорости (см. уравнение (2)). На рисунке 2

приведены графики векторных полей скорости с наложением на них скалярного поля модуля градиента скорости вблизи боковой стенки. Из рисунка видно, что в горизонтальном сечении при Z = –4 мм вблизи стенки вектора скорости направлены в основном по касательной к боковой поверхности ванны. В этой связи градиентов скорости вблизи стенки не возникает (рис. 2, *а*). В сечении при Z = –30 мм вблизи боковой стенки в картине течения выделяются особые точки типа «узел», в которых сходится множество линий тока (показаны белым цветом). [6]. Именно вблизи этих точек градиенты скорости достигают значений ~7 $с^{-1}$ (рис. 2, *б*), что также наблюдается и в картине завихренности (рис. 1, *б*).

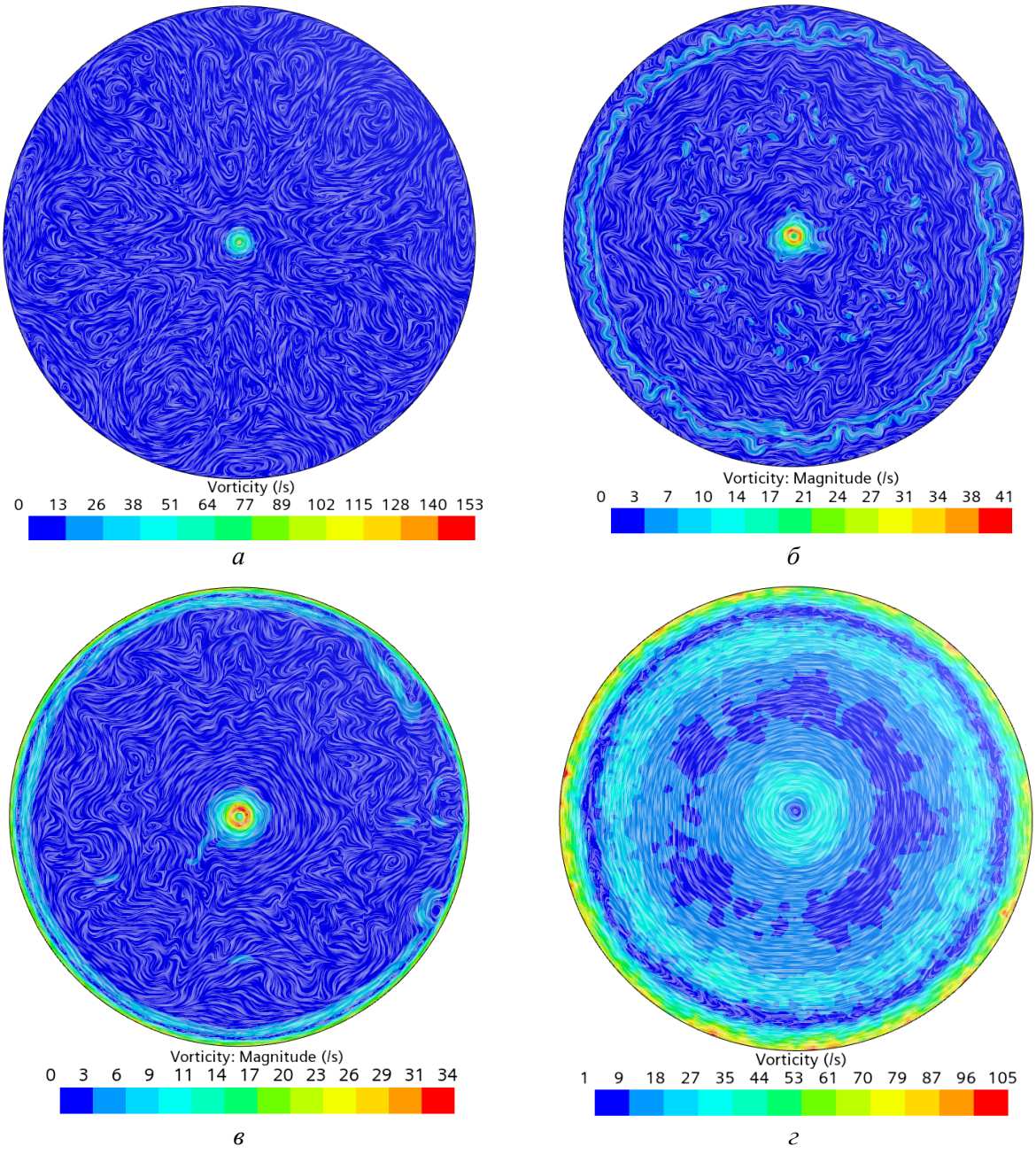
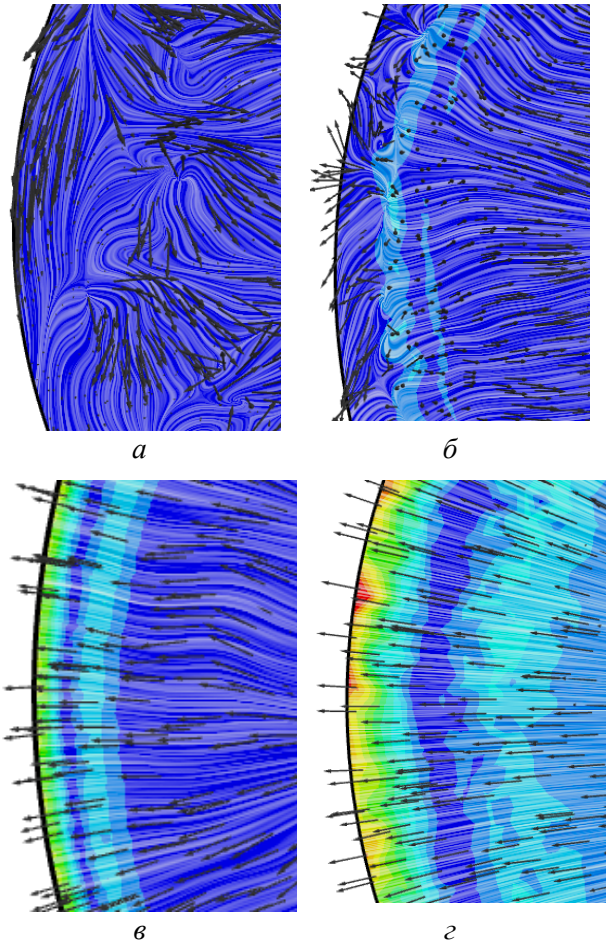


Рисунок 1 — Графики распределения завихренности в горизонтальных сечениях при *t* = 20 с (*а* — Z = –4 мм; *б* — Z = –30 мм; *в* — Z = –60 мм; *г* — Z = –90 мм)



а *б* *в* *г*

Рисунок 2 — Графики распределения модуля градиента скорости, наложенные на векторное поле скорости в горизонтальных сечениях при $t = 20$ с (*а* — Z = –4 мм; *б* — Z = –30 мм; *в* — Z = –60 мм; *г* — Z = –90 мм)

По мере движения вглубь ванны (рис. 2, *в* и *г*) направление векторов скорости у стенки становится преимущественно радиальным, т. е. перпендикулярным к стенке. Взаимодействие потоков расплава с твердой поверхностью стенок приводит к возникновению достаточно больших градиентов скорости, главным образом в направлении оси Z (~24 $с^{-1}$ — для рисунка 2, *в* и ~100 $с^{-1}$ — для рисунка 2, *г*). Соответственно, рисунки 1, *в* и *г* отображают эти эффекты в картинах завихренности.

Для детального анализа распределения завихренности по глубине ванны нами построен график зависимости значения интегральной завихренности ω_s (рис. 3). Видно, что наибольшие значения ω_s наблюдаются в сечении, расположенном вблизи поверхности расплава (~0,25 $м^2/с$). По мере движения вглубь ванны ω_s резко уменьшается и при $Z \approx -2$ мм составляет около 0,06 $м^2/с$. Затем при $Z < -80$ мм ω_s незначительно увеличивается, а при $Z < -92$ мм снова уменьшается.

Для определения причины появления максимальной завихренности вблизи поверхности расплава нами построен график ее распределения вблизи верхнего электрода (рис. 4). Из рисунка 4 видно, что максимальные значения завихренности формируются вдоль боковых стенок верхнего электрода и достигают ~$2{,}7 \cdot 10^3$ $с^{-1}$.

Также рассмотрен момент зарождения ЭВТ. На рисунке 5, *а* приведен график распределения скорости вблизи верхнего электрода при $t = 0{,}1$ с. Из рисунка видно, что начальный участок ЭВТ представляет собой полую струю, движущуюся вдоль поверхности электрода. Это приводит к значительным градиентам завихренности вокруг боковой поверхности электрода (рис. 5, *б*).

Таким образом, нами уточнен полученный в работе [5] вывод о первоначальной закрутке ЭВТ, возникающей вследствие обтекания струи полусферической поверхности погруженного в расплав электрода.

Далее приведены особенности изменения поля завихренности при эволюции ЭВТ.

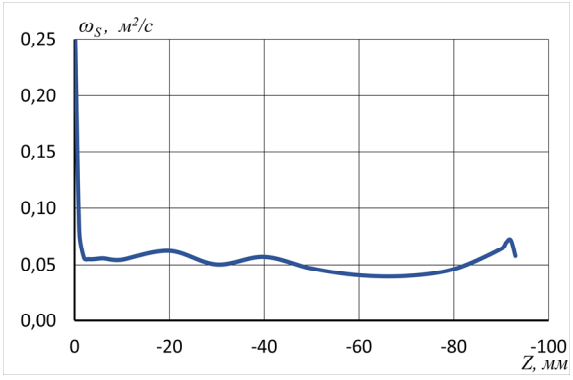


Рисунок 3 — График распределения интегральной завихренности ω_s по глубине ванны

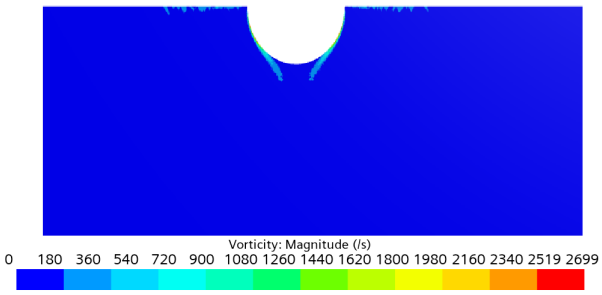
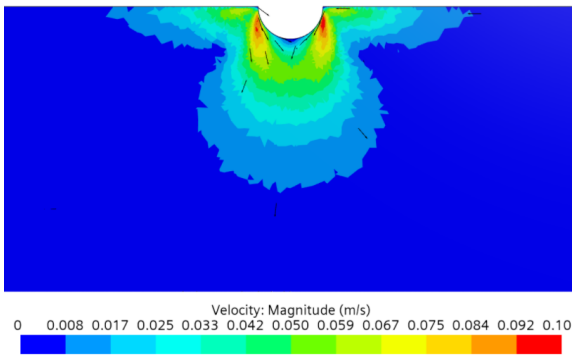
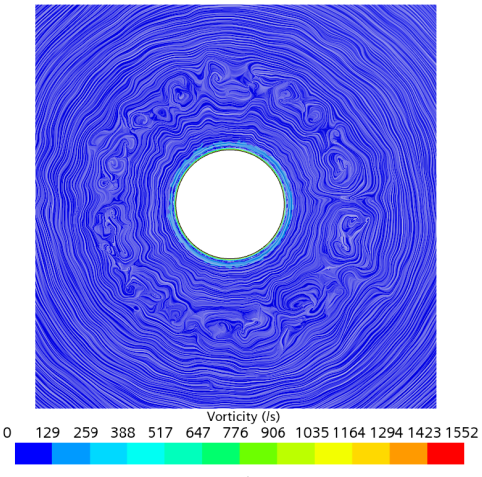


Рисунок 4 — График распределения завихренности вблизи верхнего электрода при $t = 20$ с



а



б

Рисунок 5 — График распределения скорости (*а*) и завихренности (*б*) вблизи верхнего электрода при $t = 0{,}1$ с

На рисунке 6 приведен график распределения завихренности для момента времени ($t = 1{,}5$ с), при котором зафиксирована интенсивная закрутка струи в придонной области ванны при взаимодействии формирующихся вторичных вихрей со встречно направленным полоидальным течением [5]. При этом $D_я \approx 0{,}21 D_в$, а максимальные значения завихренности ~41 $с^{-1}$. Исходя из данных, приведенных в работе [3], можно отметить, что причиной формирования вышеуказанных вторичных вихрей является азимутальная закрутка струи.

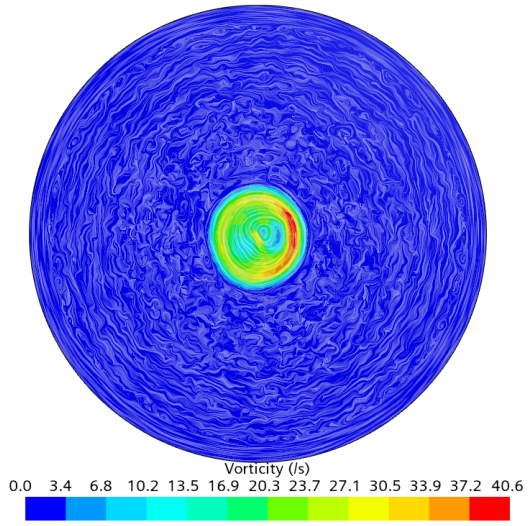


Рисунок 6 — График распределения завихренности в горизонтальном сечении $Z = -75$ мм при $t = 1{,}5$ с

На рисунке 7 приведен график распределения завихренности при $t = 6$ с. В этот момент времени хорошо проявляется механизм адвекции завихренности, при котором ядро «размывается», а вторичные вихри при $\omega \approx 1–18$ $с^{-1}$ сносятся полоидальным течением к боковым стенкам ванны. Далее эти вихри перемещаются вдоль боковых стенок ванны и вблизи поверхности расплава вновь устремляются вглубь ванны, поглощаясь полоидальным течением. С течением времени размеры этих вихрей и значения завихренности существенно уменьшаются (рис. 1, *б*).

Также рассмотрено влияние турбулентности на завихренность. В работе [5] нами было показано, что в придонной области ванны происходят сильные колебания кинетической энергии азимутальной компоненты течения за счет эффектов турбулентности. На рисунке 8 приведен график распределения завихренности в горизон-

тальном сечении ванны (Z = –90 мм) при $t = 70$ с. Сравнивая рисунок 8 и рисунок 1, *г*, можно отметить существенное нарушение осевой симметрии поля: смещение ядра завихренности относительно центра сечения, неравномерность поля завихренности в центре сечения и вдоль боковых стенок ванны. При этом линии завихренности сильно растягиваются и деформируются, и вихри вытягиваются, принимая форму, близкую к эллиптической.

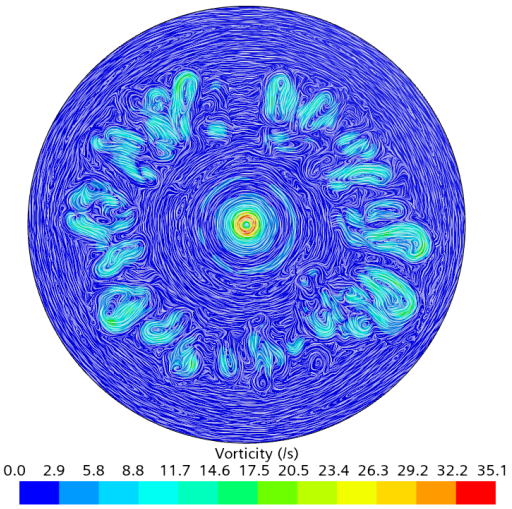


Рисунок 7 — График распределения завихренности в горизонтальном сечении Z = –60 мм при $t = 6$ с

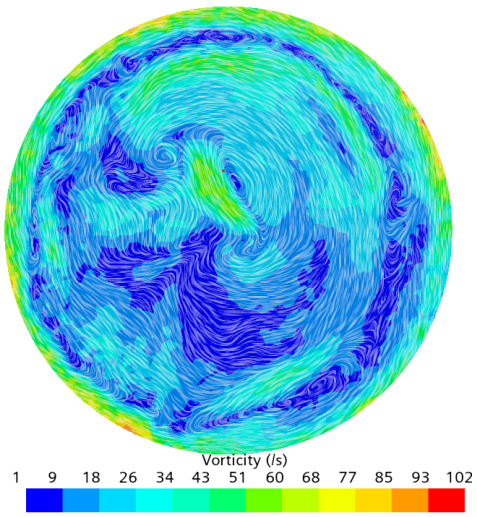


Рисунок 8 — График распределения завихренности в горизонтальном сечении Z = –90 мм при $t = 70$ с

Таким образом, использование переменной завихренности существенно дополняет методику идентификации вихревых структур и позволяет более детально исследовать механизмы их генерации, эволюции и распада.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Показано, что первоначальное формирование ядра завихренности происходит вблизи поверхности расплава практически сразу после подачи на электроды электрического тока и обусловлено следующими особенностями:

– начальный участок ЭВТ представляет собой полую струю, формирующуюся вокруг погруженного в расплав электрода;

– при движении вглубь ванны струя обтекает полусферическую поверхность электрода, при этом максимальные значения завихренности превышают 10^3 $с^{-1}$.

2. По мере движения вглубь ванны диаметр ядра завихренности увеличивается, а ее значения уменьшаются, что также характерно для струйных течений. В придонной части ванны ядро завихренности «размывается», при этом зоны максимальной завихренности (~100 $с^{-1}$) формируются вдоль боковых стенок ванны за счет наличия достаточно больших градиентов скорости.

3. Наличие перемежаемой турбулентности в области нижней стенки ванны (при $t \approx 70$ с) способствует более интенсивному «размыванию» завихренности, нарушению осевой симметрии поля, смещению ядра относительно оси ванны, существенной деформации и растяжению вихревых линий.

4. Приведенная методика может применяться при исследовании турбулентных процессов в расплавах плавильных агрегатов и рудовосстановительных печей, а также агрегатов для внепечной обработки и разливки.

Список источников

1. Исследование скорости расходования электродов, разработка конструкции и системы управления перемещением рудно-восстановительных блоков при дуговом глубинном восстановлении / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, Р. Н. Саратовский, В. И. Проценко // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2026. № 12 (86). С. 117–126. EDN JRLUEB

2. Куберский С. В. Использование физического моделирования для определения параметров электромагнитного перемешивания стали в промежуточном ковше // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2025. № 9 (83). С. 49–56. EDN IXXABF

3. Виноградов Д. А. Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля : дис. … канд. физ.-мат. наук. М. : [б. и.], 2026. 129 с.

4. Колесниченко И. В. Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики жидких металлов в области значений параметров, характерных для технологических приложений : дис. … д-ра физ.-мат. наук. Пермь : [б. и.], 2024. 345 с.

5. Кухарев А. Л. Эволюция азимутальных возмущений электровихревых течений расплава // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2026. № 12 (86). С. 97–106. EDN IIJQUZ

6. Методы и концепции визуализации вихревых течений в задачах вычислительной газовой динамики / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина, М. С. Яковчук // Вычислительные методы и программирование. 2016. Т. 17. № 1. С. 81–100. DOI: 10.26089/NumMet.v17r109 EDN YTTYTR

7. Долуденко А. Н., Куликов Ю. М., Савельев А. С. Хаотизация течения под действием объемной силы // Компьютерные исследования и моделирование. 2024. Т. 16. № 4. С. 883–912. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-4-883-912 EDN EQZIML

© Кухарев А. Л., 2026

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Куберским С. В., начальником патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.

Статья поступила в редакцию 02.10.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Кухарев Алексей Леонидович, *д-р техн. наук, доцент, профессор каф. автоматизированного управления и инновационных технологий*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

Kukharev A. L. *(Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: alex.kuharev@mail.ru)*

ON THE VORTICITY OF ELECTROVORTEX MELT FLOWS

The results of numerical investigation of vorticity fields at electrovortex melt flows in a hemispherical bath of an installation with axisymmetric electrodes are presented. There have been revealed and analyzed the mechanism of vorticity core formation near the electrode immersed in the melt, the nature of changes in vortex structures at bath depth, as well as the features of evolution influence of electrovortex flows and turbulence on the change of the vorticity field.

Key words: *melt, electrovortex flow, jet swirl, vorticity.*

References

1. Kuberskii S. V., Protsenko M. Yu., Saratovskiy R. N., Protsenko V. I. Investigation of electrode consumption rate and development of the design and movement control system for ore-reduction blocks

in arc deep recovery [Issledovanie skorosti raskhodovaniya elektrodov, razrabotka konstrukcii i sistemy upravleniya peremeshcheniem rudno-vosstanovitel'nyh blokov pri dugovom glubinnom vosstanovlenii]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2026. No. 12 (86). Pp. 117–126. EDN JRLUEB

2. Kuberskii S. V. Using physical modeling to determine the parameters of electromagnetic stirring of steel in the intermediate ladle [Ispol'zovanie fizicheskogo modelirovaniya dlya opredeleniya parametrov elektromagnitnogo peremeshivaniya stali v promezhutochnom kovshe]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2025. No. 9 (83). Pp. 49–56. EDN IXXABF

3. Vinogradov D. A. Electrovortex flow of liquid metal in a hemispherical container under the influence of an external magnetic field : thesis ... of the PhD in Physical and Mathematical Sciences [Elektrovihrevoe techenie zhidkogo metalla v polusfericheskom kontejnere pri vozdejstvii vneshnego magnitnogo polya : dis. ... kand. fiz.-mat. nauk]. M. : [n. p.]. 2026. 129 p.

4. Kolesnichenko I. V. Fundamental aspects of the magnetic hydrodynamics of liquid metals in the field of parameter values peculiar to technological applications : thesis ... of Doctor of Physical and Mathematical Sciences [Fundamental'nye aspekty magnitnoj gidrodinamiki zhidkih metallov v oblasti znachenij parametrov, harakternyh dlya tekhnologicheskih prilozhenij : dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk]. Perm : [n. p.]. 2024. 345 p.

5. Kukharev A. L. Evolution of azimuth perturbations of electro-vortex melt flows [Evolyuciya azimutal'nyh vozmushchenij elektrovihrevyh techenij rasplava]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2026. No. 12 (86). Pp. 97–106. EDN IIJQUZ

6. Volkov K. N., Emel'yanov V. N., Teterina I. V., Yakovchuk M. S. Methods and concepts for the visualization of vortex flows in computational gas dynamics tasks [Metody i koncepcii vizualizacii vihrevyh techenij v zadachah vychislitel'noj gazovoj dinamiki]. Numerical Methods and Programming. 2016. Vol. 17. No. 1. Pp. 81–100. DOI: 10.26089/NumMet.v17r109 EDN YTTYTR

7. Doludenko A. N., Kulikov Yu. M., Savel'ev A. S. Chaotic flow under the action of volumetric force [Haotizaciya techeniya pod dejstviem ob"emnoj sily]. Computer research and modeling. 2024. Vol. 16. No. 4. Pp. 883–912. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-4-883-912 EDN EQZIML

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

***Kukharev Aleksey Leonidovich*,** *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automated Control and Innovative Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: alex.kuharev@mail.ru