

Исследование процесса перемешивания жидкого металла посредством воздействия постоянного или импульсного внешнего магнитного поля

Д. А. Виноградов, И. О. Тепляков и Ю. П. Ивочкин

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: igor.teplyakov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 июля 2024 г.

Аннотация. Численно исследован процесс перемешивания жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии постоянного или импульсного внешнего магнитного поля. Расчеты проводились в безындукционном приближении. Полученные результаты показывают, что следует тщательно подбирать как величину, так и параметры импульса внешнего магнитного поля. Если индукция магнитного поля будет слишком мала, то течение будет подавлено противонаправленным вихрем и перемешивание замедлится, а если слишком велика, то течение будет подавлено электромагнитным торможением, что также приведет к замедлению перемешивания.
<https://doi.org/10.33849/2024305>

1. ВВЕДЕНИЕ

В металлургии перемешивание используется для получения равномерного распределения примеси в металлах и сплавах [1]. Принципиально, электродуговая печь состоит из плавильной ванны и подведенных к ней электродов. При пропускании электрического тока через электродугую печь возникает электрическая дуга, а металл, помещенный в плавильную ванну, разогревается. Затем расплавленный металл под действием электромагнитной силы приходит в движение, и образуется т.н. электровихревое течение (ЭВТ) [2]. Интенсивность этого течения зависит от величины электрического тока, пропускаемого через жидкий металл. Вместе с тем, с помощью внешнего магнитного поля (МП) (например, созданного соленоидом) также можно управлять интенсивностью ЭВТ. В текущей работе рассматривалась задача о течении и перемешивании между двух полусферических электродов, поскольку такая геометрия близка к конфигурации промышленных электродугowych печей постоянного тока [3–9].

Рассмотрим задачу, где электрический ток распространяется от малого электрода полусферической формы к большому полюсу электроду (через жидкий металл), являющемуся стенкой плавильной ванны. В такой системе возникает электромагнитная сила $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}_{\text{ЭВТ}}$ (здесь $\mathbf{J}$ — плотность электрического тока, а $\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}}$ — индукция магнитного поля, созданного этим током), которая приводит металл в движение.

В осесимметричной геометрии без внешнего осевого МП ЭВТ представляет собой одиночный торoidalный вихрь, направленный вниз в подэлектродной области (рисунок 1(a)). Внешнее осевое МП приводит к азимутальной закрутке течения (рисунок 1(b)). Вращение оттесняет металл к периферии, что приводит к образованию второго торoidalного вихря, который направлен в противоположенную сторону относительно первого торoidalного вихря (рисунок 1(c)). Возникновение второго вихря приводит к существенному изменению течения. Происходит перераспределение осевой и радиальных компонент скорости в жидком металле. При этом, интенсивность ЭВТ зависит от величины внешнего МП [10], которое, на основании результатов предыдущих исследований, может как увеличивать, так и подавлять интенсивность перемешивания [11].

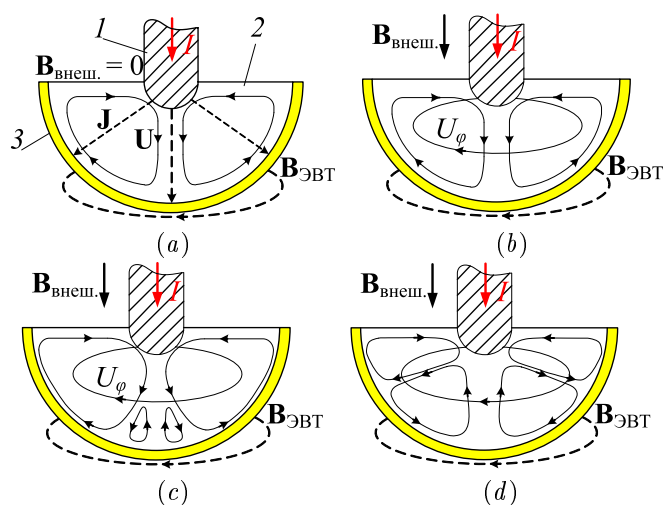


Рисунок 1. Структура электровихревого течения без внешнего осевого МП. 1 — малый электрод, 2 — жидкий металл, 3 — большой электрод. (a) ЭВТ без внешнего МП, (b) возникновение азимутальной закрутки жидкого металла, (c) образование второго торoidalного вихря, (d) двухвихревое вращающееся ЭВТ.

Следует отметить, что ранее проведенные исследования процесса перемешивания были выполнены в ограниченном диапазоне внешних МП и без учета токов, индуцированных движением электропроводящей среды [11]. Однако, в работах [12, 13] было показано, что при внешнем МП $B_z > 1.25 \times 10^{-3}$ Тл (B_z — индукция постоянного, однородного внешнего магнитного поля направленного вдоль оси z) индуцированные токи существенным образом влияют на параметры течения. Поэтому в данной работе приведено более подробное исследование процесса перемешивания в зависимости от параметров внешнего МП.

2. РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА

С использованием пакета Ansys Fluent решались уравнение движения и уравнение переноса примеси. Расчеты проводились методом контрольного объема на неструктурированной сетке, в двумерной осесимметричной цилиндрической системе координат.

Расчетная область состояла из 48 тыс. ячеек (рисунк 2) и включала в себя большой и малый электроды, токоподводы и область с жидкостью. Радиус малого электрода составлял $R_1 = 2.5$ мм, внутренний радиус большого электрода — $R_2 = 94$ мм, внешний радиус большого электрода — 100 мм. Длина верхнего и нижнего токоподводов составляла 0.7 и 0.6 м, соответственно. Расчет проводился для эвтектического сплава In-Ga-Sn (который также является рабочим телом в нашей экспериментальной установке). Физические свойства In-Ga-Sn представлены в работе [14].

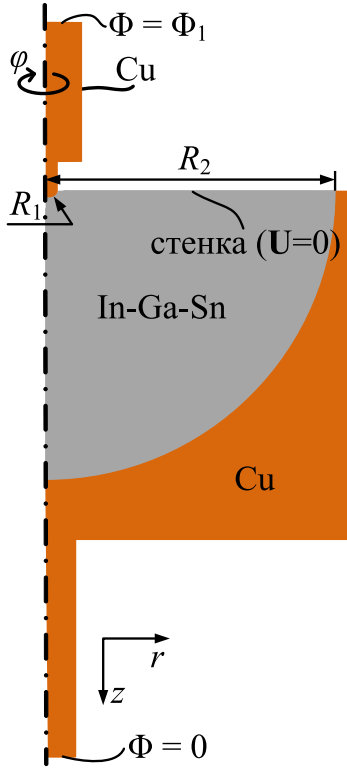


Рисунок 2. Расчетная область.

Движение жидкого металла описывает уравнение Навье–Стокса с электромагнитной силой в качестве источника:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \rho \nu \Delta \mathbf{U} + \mathbf{F}, \quad (1)$$

где $\mathbf{U}$ — скорость жидкого металла, ν — кинематический коэффициент вязкости, p — давление, $\mathbf{F}$ — электромагнитная сила.

Использовалась $k - \omega$ SST-модель турбулентности [15]. Использование этой модели обеспечивает наилучшее совпадение расчетных данных с экспериментальными данными по скорости, полученными ранее с использованием волоконно-оптического преобразователя [16]. Течение на оси схоже с затопленной струей, а струи турбулизуются уже при единицах числа Рейнольдса. Из гидродинамических соображений, число Рейнольдса можно оценить как: $Re = Ud/\nu$, где скорость на оси $U \sim 0.2$ м/с, диаметр подэлектродной струи $d \sim 0.01$ м, кинематический коэффициент вязкости $\nu = 4.3 \times 10^{-7}$ м²/с, тогда $Re \sim 4500$.

Расчеты приводились в диапазоне внешних МП с B_z от 5×10^{-4} до 5×10^{-1} Тл. Для такого диапазона внешних МП следует использовать безындукционное приближение (когда мы учитываем токи, индуцированные движением жидкости, но пренебрегаем индуцированным ими магнитным полем), тогда электромагнитная сила имеет вид:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{J} + \mathbf{J}_{\text{инд}}) \times (\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}} + \mathbf{B}_{\text{внеш}}), \quad (2)$$

где $\mathbf{J}$ — плотность электрического тока, $\mathbf{J}_{\text{инд}}$ — токи, индуцированные движением электропроводящей среды, $\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}}$ — индукция магнитного поля, созданного этими токами, $\mathbf{B}_{\text{внеш}}$ — индукция внешнего осевого МП, которое имеет только z -компоненту B_z , σ — электропроводность.

Сначала решалось уравнение Лапласа для электрического потенциала:

$$\nabla(\sigma \nabla \Phi) = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{U} \times (\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}} + \mathbf{B}_{\text{внеш}})). \quad (3)$$

При этом задавалась разность потенциалов: $\Phi_1 = 0.06961$ В на верхней границе и $\Phi_2 = 0$ на нижней границе, что соответствовало электрическому току $I = 400$ А (пропускаемому через жидкий металл). На остальных внешних границах было принято граничное условие $\partial \Phi / \partial n = 0$.

Затем вычислялась плотность электрического тока:

$$\mathbf{J}_{\text{полн}} = \mathbf{J} + \mathbf{J}_{\text{инд}}, \quad (4)$$

где ток проводимости:

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla \Phi, \quad (5)$$

а токи, индуцированные движением электропроводящей среды:

$$\mathbf{J}_{\text{инд}} = \sigma \mathbf{U} \times (\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}} + \mathbf{B}_{\text{внеш}}). \quad (6)$$

Далее, с использованием закона Био–Савара–Лапласа, вычислялось МП, созданное током $\mathbf{J}$:

$$\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}}(\mathbf{R}_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J} \times (\mathbf{R}_0 - \mathbf{R})}{|\mathbf{R}_0 - \mathbf{R}|^3} dV. \quad (7)$$

Здесь $\mathbf{R}_0$ — радиус-вектор точки, в которой рассчитывается магнитное поле, $\mathbf{R}$ — радиус-вектор элемента с током, создающим магнитное поле, μ_0 — магнитная постоянная. Расчет данного интеграла выполнялся на графическом процессоре при помощи собственной программы, написанной на CUDA (подробно методика описана в [17]).

Компоненты электромагнитной силы $\mathbf{F}$ в цилиндрической системе координат имеют вид:

$$F_r = -J_z B_\varphi - \sigma U_r B_\varphi^2 - \sigma U_r B_z^2, \quad (8)$$

$$F_z = J_r B_\varphi - \sigma U_\varphi B_\varphi B_z - \sigma U_z B_\varphi^2, \quad (9)$$

$$F_\varphi = -(J_r B_z - \sigma U_\varphi B_z^2) - \sigma U_z B_\varphi B_z. \quad (10)$$

Полученные компоненты подставлялись в уравнение Навье–Стокса.

При исследовании процесса перемешивания использовался метод нейтральной примеси. В объем

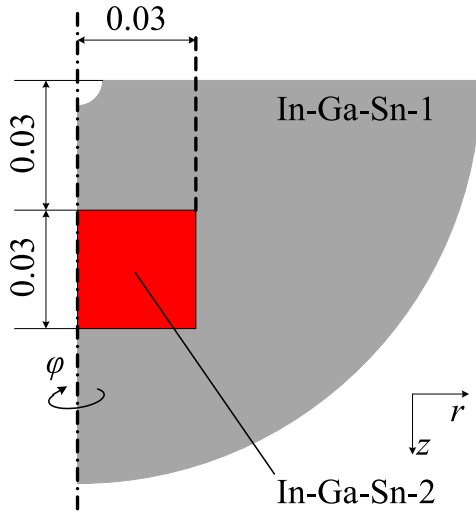


Рисунок 3. Расположение примеси в объеме жидкого металла.

жидкого металла добавлялась примесь, имеющая такие же физические свойства, как и основное вещество (расположение примеси представлено на рисунке 3), и решалось уравнение переноса примеси:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{U} \nabla C = D \Delta C, \quad (11)$$

где D — коэффициент самодиффузии, C — массовая доля добавленного вещества. Коэффициент самодиффузии для In-Ga-Sn был принят как средний из коэффициентов, входящих в сплав компонентов: $D = 5 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Для определения качества перемешивания оценивалось значение максимального отклонения концентрации примеси от средней объемной концентрации:

$$K_{\text{макс}} = \frac{C_{\text{макс}} - C_{\text{ср}}}{C_{\text{ср}}} \cdot 100, \quad (12)$$

$$C_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=0}^N C_i V_i}{V}, \quad (13)$$

где $C_{\text{ср}}$ — средняя массовая доля, $C_{\text{макс}}$ — максимальная массовая доля, V_i — объем i -й ячейки, V — объем жидкости, N — число ячеек.

Расчеты проводились до тех пор, пока максимальное отклонение концентрации примеси от средней достигало 0.1%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Через жидкий металл пропусклся электрический ток $I = 400 \text{ А}$ при различных параметрах внешнего осевого импульсного МП. Были исследованы режимы как с постоянным внешним МП, так и с импульсным. Период колебаний внешнего МП $T = t_{\text{имп}} + t_{\text{паузы}} = 1$. При этом величина импульсного внешнего МП была выбрана таким образом, чтобы средняя величина МП за период оставалась постоянной. Список режимов представлен в таблице 1. Так, например, для случая $t_{\text{имп}}/T = 0.1$, время импульса для каждого периода составляло 0.1 с, а время паузы — 0.9 с, а для режима

Таблица 1. Список режимов для численного моделирования $I = 400 \text{ А}$, $T = 1 \text{ с}$.

№	$B_{\text{ср}} \times 10^4, \text{ Тл}$	$t_{\text{имп}}/T$	$B_{\text{имп}} \times 10^4, \text{ Тл}$
1	5	0.1	50
2	5	0.3	16.7
3	5	0.5	103
4	5	0.7	7.14
5	5	0.9	5.56
6	5	1	5
7	10	0.1	100
8	10	0.3	33.3
9	10	0.5	20
10	10	0.7	14.3
11	10	0.9	11.1
12	10	1	10
13	50	0.1	500
14	50	0.3	167
15	50	0.5	100
16	50	0.7	71.4
17	50	0.9	55.6
18	50	1	50
19	100	0.1	1000
20	100	0.3	333
21	100	0.5	200
22	100	0.7	143
23	100	0.9	111
24	100	1	100
25	500	0.1	5000
26	500	0.3	1670
27	500	0.5	1000
28	500	0.7	714
29	500	0.9	556
30	500	1	500

где $B_{\text{ср}}$ — индукция среднего за период внешнего МП, $t_{\text{имп}}/T$ — отношение времени импульса к периоду, $B_{\text{имп}}$ — индукция пикового за период внешнего МП.

$t_{\text{имп}}/T = 0.7$ время импульса составляло 0.7 с, а время паузы — 0.3 с.

На каждом шаге по времени рассчитывалась полная кинетическая энергия во всем объеме жидкого металла. Примесь добавлялась в момент времени, когда зависимость суммарной кинетической энергии от времени становилась квазистационарной.

На рисунке 4(а) представлена зависимость времени перемешивания от времени импульса. Из графика видно, что наилучшими являются режимы с большим временем импульса. При этом при $B_{\text{ср}} = 5 \times 10^{-2} \text{ Тл}$ внешнее МП достаточно велико и подавляет течение на периферии полусферического контейнера, течение сосредоточено преимущественно вблизи малого электрода и рядом с поверхностью жидкого металла. В других областях наблюдаются застойные зоны, что замедляет перемешивание. Наибольшая скорость перемешивания наблюдается в режиме $B_{\text{ср}} = 10^{-2}$, когда длительность импульса больше чем полпериода ($t_{\text{имп}}/T \geq 0.5$). Исходя из [11], при постоянном внешнем поле B_z , суммарная кинетическая энергия достигает максимума примерно при $B_z = 10^{-2} \text{ Тл}$, и в режимах с $B_{\text{ср}} \geq 10^{-2}$ время перемешивания увеличивается, поскольку течение

начинает замедляться из-за электромагнитного торможения. На рисунке 4(б) приведена зависимость кинетической энергии жидкого металла от времени импульса при различных значениях $B_{\text{ср}}$. Из графика видно, что максимальная кинетическая энергия наблюдается при $t_{\text{имп}}/T = 1$, что соответствует постоянному внешнему МП. Тем не менее, скорость перемешивания иногда не коррелирует с суммарной кинетической энергией. Это связано с тем, что вблизи малого электрода течение достаточно интенсивно и вносит существенный вклад в суммарную кинетическую энергию, в то время как вблизи большого электрода наблюдаются застойные зоны и примесь переносится туда достаточно долго.

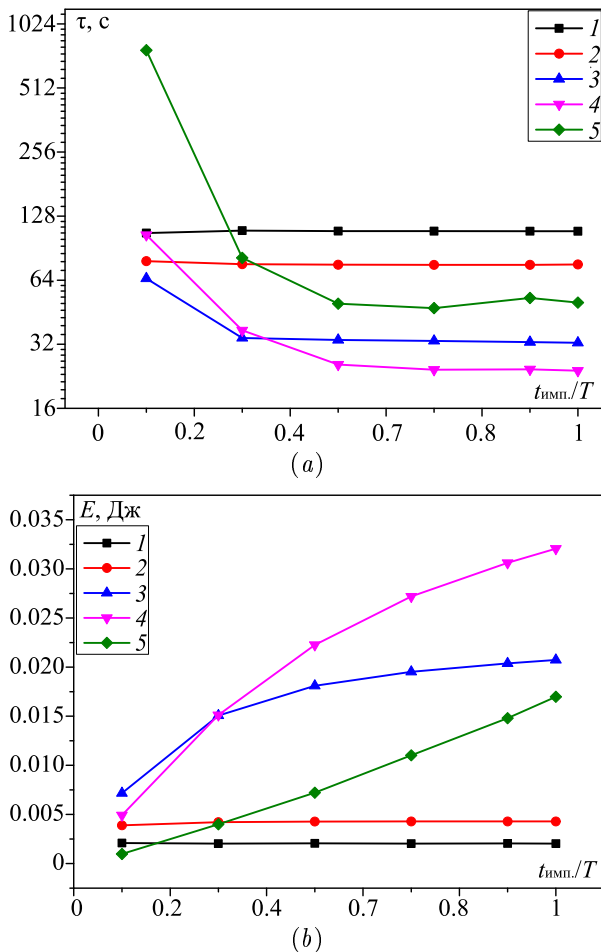


Рисунок 4. (а) Зависимость суммарной кинетической энергии от времени импульса, (б) Зависимость времени перемешивания от времени импульса, 1 — $B_{\text{ср}} = 5 \times 10^{-4}$ Тл, 2 — $B_{\text{ср}} = 10^{-3}$ Тл, 3 — $B_{\text{ср}} = 5 \times 10^{-3}$ Тл, 4 — $B_{\text{ср}} = 10^{-2}$ Тл, 5 — $B_{\text{ср}} = 5 \times 10^{-2}$ Тл.

При каждом значении $B_{\text{ср}}$ был выбран режим с наилучшим временем перемешивания и получена зависимость минимального времени перемешивания от среднего за период внешнего МП (рисунок 5). Из графика видно, что с ростом внешнего МП время перемешивания уменьшается и достигает минимума при $B_{\text{ср}} = 10^{-2}$ Тл, с дальнейшим ростом МП течение замедляется под действием индуцированных токов и время перемешивания увеличивается.

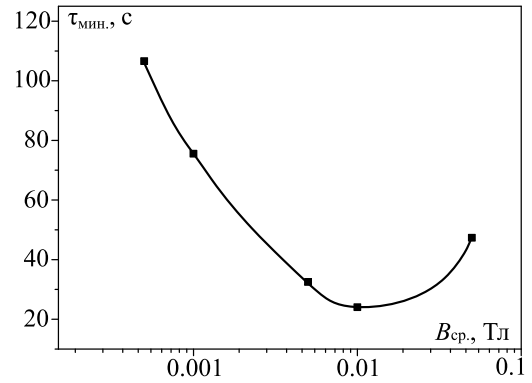


Рисунок 5. Зависимость минимального времени перемешивания от индукции среднего за период внешнего МП.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численно исследован процесс перемешивания жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего МП с различными параметрами.

Результаты показывают, что следует тщательно подбирать параметры внешнего МП, которое существенно образом влияет на структуру течения. В частности, при относительно малых внешних МП (от 5×10^{-4} до 10^{-3} Тл) интенсивность перемешивания мала вследствие подавления течения, вызванного возникновением противоположно направленного ЭВТ восходящего тороидального вихря. При внешних МП более 10^{-2} Тл интенсивность перемешивания уменьшается из-за тормозящего действия электромагнитной силы, вызванной индуцированными токами, создаваемыми движением электропроводящей среды в магнитном поле.

Наилучшими, с точки зрения эффективности перемешивания, являются режимы с временем импульса МП более половины периода и средним значением индукции МП 10^{-2} Т. При внешних МП от 5×10^{-4} до 10^{-3} Тл различия в длительности перемешивания в зависимости от времени импульса не наблюдается, но энергетически более выгодны режимы с постоянным внешним МП, поскольку в них затрачивается меньше электрической мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siraev R R and Khripchenko S Y 2018 *Magnetohydrodynamics* **54** 277–286
2. Бояревич В В, Фрейнберг Я Ж, Шиловых Е И и Щербинин Э В 1985 *Электровихревые течения* (Рига: Зинатне)
3. Kharicha A, Wu M, Ludwig A and Karimi-Sibaki E 2018 *J. Steel Res. Int.* **89** 1–20
4. Kharicha A, Wu M and Karimi-Sibaki E 2016 *Metallurgical and Materials Transactions B* **47** 1427–1434
5. Ячиков И М, Карандаева О И и Ларина Т П 2008 *Моделирование электровихревых течений в ванне электроплавильной печи постоянного тока* (Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ)
6. Yachikov I M, Portnova I V and Larina T P 2018 *Steel in Translation* **48** 1–6
7. Yachikov I M and Portnova I V 2016 *Sciences of the Europe* **2** 67–72
8. Yachikov I M 2018 *Magnetohydrodynamics* **52** 301–310
9. Жилин В Г, Ивочкин Ю П и Тепляков И О 2011 *ТВТ* **49** 957–960

10. Vinogradov D, Teplyakov I and Ivochkin Y 2019 *Magnetohydrodynamics* **55** 455–464
11. Vinogradov D, Teplyakov I and Ivochkin Y 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1809** 012034
12. Vinogradov D, Teplyakov I, Ivochkin Y and Kharicha A 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1128** 012112
13. Vinogradov D, Teplyakov I, Ivochkin Y, Kharicha A and Serbin P 2018 *Magnetohydrodynamics* **54** 403–416
14. Прохоренко В Я, Ратушняк Е А, Стадник Б И, Лах В И и Коваль А М 1970 *ТВТ* **8** 346–350
15. Menter F R 1993 *AIAA paper. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference* 2906
16. Жилин В Г, Ивочкин Ю П, Игумнов В С и Оксман А А 1995 *ТВТ* **33** 3–6
17. Vinogradov D, Teplyakov I and Ivochkin Y 2023 *Mathematics* **11** 3623