

УДК 537.31, 537.84
PACS 07.05.Fb

Определение параметров МГД-канала для повышения однородности растекания тока

Г. Л. Лосев^{1†}, Р. С. Окатьев¹

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

[†] losev.g@icmm.ru

Для оценки условий получения однородного электрического поля численно решена задача растекания электрического тока в проводнике, заключенном в канал произвольной проводимости. В качестве числового критерия однородности растекания выбрана длина участка, на котором величина радиальной компоненты плотности электрического тока не превышает 1% максимума вдоль оси канала. Установлен нелинейный характер зависимости длины участка однородного растекания тока от аспектного отношения канала и толщины стенок. Увеличение длины канала при фиксированном диаметре позволяет достигнуть однородного растекания тока на более чем 80% длины канала при аспектном отношении более 10. Зависимости длины участка однородного растекания от толщины стенок имеет локальный экстремум при толщине стенки менее 0.4 радиуса трубы. В зависимости от отношения проводимостей стенки и среды экстремальная точка может быть как локальным минимумом (хорошо проводящая стенка), так и локальным максимумом (плохо проводящая стенка). Зависимость длины участка однородного растекания тока от протяженности токоподводов линейна, однако наклон графика определяется отношением проводимостей среды и стенки.

Ключевые слова: МГД-канал; растекание тока; численное моделирование

Поступила в редакцию 29.01.2024; после рецензии 13.02.2024; принята к опубликованию 17.02.2024

Determination of the MHD channel parameters for improving the homogeneity of electric current

G. L. Losev^{1†}, R. S. Okatev¹

¹ Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

[†] losev.g@icmm.ru

The problem of electric current flow in a conductor enclosed in a channel of arbitrary conductivity is solved numerically to estimate the conditions for obtaining a homogeneous electric field. The length of the section at which the value of the radial component of the electric current density does not exceed 1% of the maximum along the channel axis was chosen as a numerical criterion for the homogeneity of the flow. We detected the nonlinear character of the dependence of the length of the section of homogeneous current flow on the aspect ratio of the channel and on the wall thickness. By increasing the channel length at a fixed diameter, it is possible to achieve uniform current flow along more than 80% of the channel length with an aspect ratio greater than 10. The dependence of the length of the homogeneous spreading section on wall thickness has a local extremum at wall thickness less than 0.4 of the pipe radius. Depending on the ratio of conductivities of the wall and the medium, the extreme point can be either a local minimum (a well conducting wall) or a local maximum (a poorly conducting wall). The dependence of the length of the section of homogeneous current flow on the length of current conduits is linear, but the slope is determined by the ratio of conductivities of the medium and the wall.

Keywords: MHD channel; electric currents; numerical simulation

Received 29 January 2024; revised 13 February 2024; accepted 17 February 2024

doi: 10.17072/1994-3598-2024-1-49-55

1. Введение

Многофазные МГД-течения становятся актуальной научной задачей современности [1]. Моделирование течений жидких металлов с частицами примесей (оксидов, солей и др.) является важным при разработке технологических устройств для получения сверхчистых материалов, а также композитов с заданными физическими и механическими свойствами (так называемых функциональных материалов). Применение той или иной модели многофазной среды требует определения значений большого числа коэффициентов, зависящих как от свойств отдельных фаз, так и от характеристик процесса [2].

Наиболее информативным подходом к моделированию двухфазных потоков является метод Эйлера-Лагранжа. Он заключается в решении уравнений движения (1) для определения положения отдельных частиц примеси и континуальных уравнений (2), (3) (Навье-Стокса и неразрывности) для описания движения несущей жидкости [3, 4]:

$$m_p \ddot{\mathbf{X}}_p = C_D \frac{\pi d_p^2 \rho_f}{8} |\mathbf{U}_f - \dot{\mathbf{X}}_p| (\mathbf{U}_f - \dot{\mathbf{X}}_p) + \mathbf{F}_p^{ext}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}_f}{\partial t} + \mathbf{U}_f \cdot \nabla \mathbf{U}_f = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P_f + \nu_f \Delta \mathbf{U}_f + \mathbf{f}_f^{ext}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U}_f = 0. \quad (3)$$

Здесь m_p – масса частицы, \mathbf{X}_p – радиус вектор положения центра масс частицы в выбранной системе координат, точками обозначены производные по времени, \mathbf{U}_f – скорость, P_f – давление, ρ – плотность, ν – кинематическая вязкость, d – диаметр частицы. Нижний индекс p обозначает величины, относящиеся к примесным частицам, индекс f – к несущей жидкости.

Слагаемые \mathbf{F}_p^{ext} и \mathbf{f}_f^{ext} обозначают внешние силы, воздействующие на примесь и несущую жидкость соответственно. Примерами таких сил могут послужить сила тяжести, сила плавучести или электромагнитная сила Ампера.

Слагаемое

$$C_D \frac{\pi d_p^2 \rho_f}{8} |\mathbf{U}_f - \dot{\mathbf{X}}_p| (\mathbf{U}_f - \dot{\mathbf{X}}_p)$$

описывает взаимодействие несущей жидкости и примесных частиц. Частица, имеющая отличные от несущей жидкости физические свойства, оказывает сопротивление набегающему потоку. Величина силы сопротивления пропорциональна разности

скоростей частицы и потока и площади поперечного сечения частицы. Коэффициентом пропорциональности служит безразмерная величина C_D , называемая коэффициентом сопротивления.

Выбору коэффициента C_D посвящено множество работ (обзоры, обобщающие существующие ныне модели, могут быть найдены в [3, 4, 5]). Предложенные авторами этих работ определения коэффициента сопротивления базируются на весьма ограниченном экспериментальном материале. Более того, описанные в литературных источниках модели вводятся для классических непроводящих сред. Стоит отметить, что получить аналитическое или численное выражение для коэффициента сопротивления весьма затруднительно [6], что обуславливает необходимость разработки надежных экспериментальных методик.

Электрическая проводимость жидкости усложняет определение коэффициента C_D , поскольку при протекании по среде электрического тока примесные частицы с проводимостью, отличающейся от проводимости среды, являются источниками локальных возмущений линий электрического тока. Это приводит к возникновению мелкомасштабных электровихревых течений вокруг частиц [7], что еще сильнее усложняет картину обтекания и потенциально может изменить коэффициент сопротивления.

С другой стороны, экспериментальное исследование влияние МГД-эффектов на величину коэффициента сопротивления также требует обеспечения условий однородности поля тока и минимизации вторичных течений, вызванных несовершенством установки. Более того, в силу оптической непрозрачности и высокой химической активности расплавов лишь ограниченное число измерительных техник может быть применено для получения информации о течении [8, 9, 10] и движении частиц в расплаве [11, 12]. Таким образом, исследование должно быть разбито на ряд подзадач, решение каждой из которых позволит обеспечить реализацию комплексного измерения.

Целью данной работы является поиск условий для обеспечения максимальной однородности растекания электрического тока в цилиндрическом объеме проводящей среды, заключенном в трубу произвольной проводимости.

2. Постановка задачи

Рассмотрим электропроводящий цилиндр диаметром $2r$, длиной L , имеющий электрическую проводимость σ_l . Цилиндр помещен коаксиально

внутри цилиндрической трубы диаметром $2R$, толщиной стенки d и проводимостью σ_2 таким образом, что внешняя поверхность цилиндра находится в контакте с внутренней поверхностью трубы, как показано на рис. 1. На торцах цилиндра расположены коаксиальные токоподводы (выделены цветом на рис. 1) длиной b , имеющие ту же проводимость, что и материал трубы.

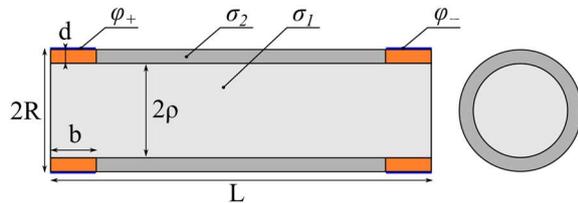


Рис. 1. Постановка задачи: цилиндр в трубе отличной электропроводности с двумя цилиндрическими токоподводами

Такая постановка задачи моделирует участок трубопровода, заполненного жидким металлом, по которому протекает подведенный к трубопроводу извне ток.

Постановка задачи включает в себя уравнение неразрывности для плотности электрического тока

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (4)$$

закон Ома

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (5)$$

связь вектора напряженности электрического поля и электрического потенциала

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (6)$$

С учетом неоднородности электропроводности, объединяя уравнения (4) – (6), получим уравнение для электрического потенциала

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \varphi) = 0. \quad (7)$$

На части внешней цилиндрической поверхности токоподводов заданы постоянные по величине и отличающиеся по знаку значения электрического потенциала φ_+ и φ_- , остальные внешние границы являются электрически изолированными. Под действием заданного в рассматриваемой системе градиента потенциала через проводящую среду течет электрический ток. При этом картина растекания тока зависит от геометрических параметров задачи и соотношения проводимостей трубы и цилиндра.

Решение задачи осуществлялось в осесимметричной постановке (рис. 2) методом конечных элементов. Использовалась неструктурированная триангулярная сетка, суммарное число элементов в зависимости от аспектного соотношения цилиндра составляло порядка 10^4 .

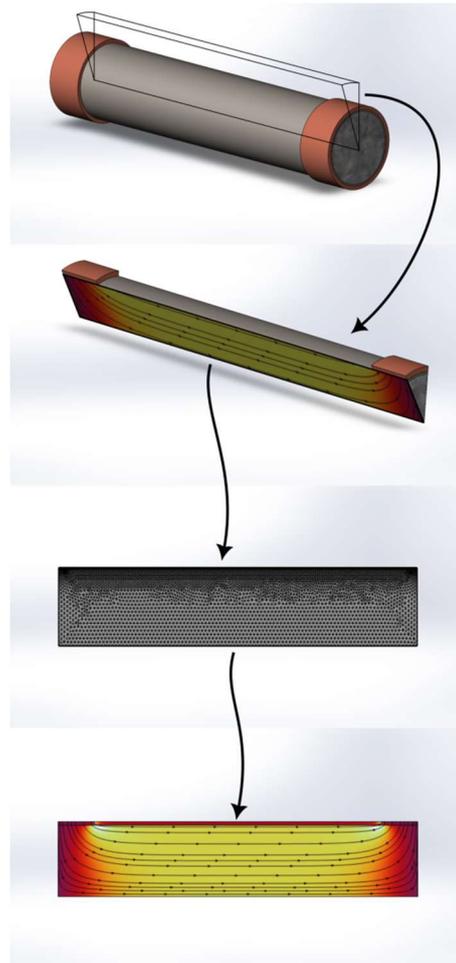


Рис. 2. Схема расчётной области задачи

3. Обработка результатов расчётов

Численное решение позволяет получить двумерное поле плотности электрического тока с компонентами J_r и J_z . В центральной части цилиндрического объёма наиболее выраженной является аксиальная компонента тока J_z . Радиальная компонента демонстрирует принципиальное отличие от нуля в области вблизи токоподводов. Будем считать, что ток протекает однородно в данном сечении по координате $z = z_0$, если

$$\int_0^{\rho} J_r(r, z_0) dr < 0.01 \cdot \max_z \left\{ \int_0^{\rho} J_r(r, z) dr \right\}, \quad (8)$$

т.е. величина тока, протекающего в радиальном направлении, не превышает 1% своего максимума вдоль оси z .

Таким образом можно ввести величину δ , которая по сути является длиной области однородного растекания тока. Рис. 3 демонстрирует графики интегрального тока, протекающего вдоль радиуса и оси цилиндра. Вертикальными пунктирными линиями отмечена область однородного растекания тока, в которой величина радиального тока близка

к нулю и величина аксиального тока не изменяется вдоль оси.

Для анализа результатов полезно ввести несколько безразмерных критериев: δ/L – относительная длина области однородного растекания тока, d/R – относительная толщина стенки, b/L – относительная длина токоподвода, $\Gamma = 2R/L$ – параметр аспектного отношения и относительная электропроводность стенки $K = \sigma_2/\sigma_1$.

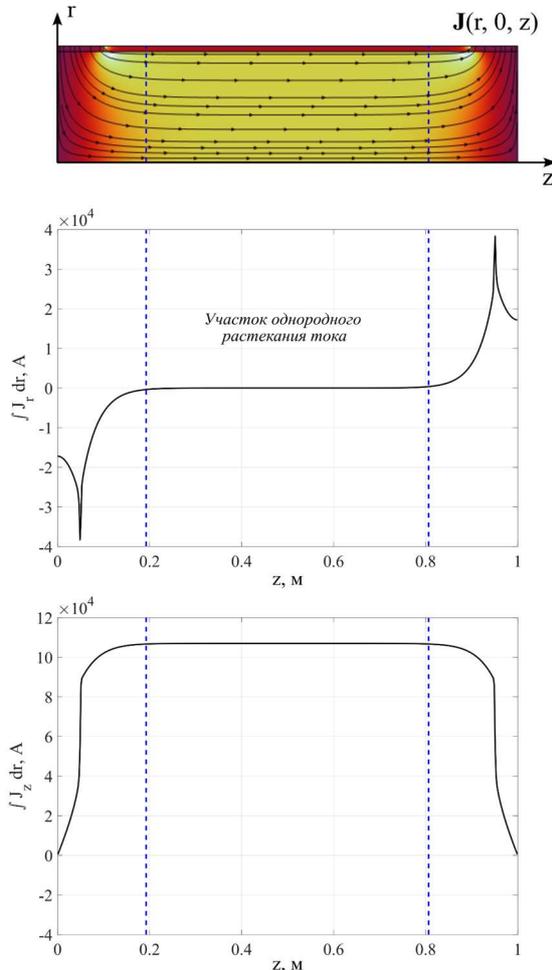


Рис. 3. Определение области однородного растекания электрического тока. Пунктирными линиями обозначены границы области однородного растекания тока

4. Результаты

Последовательно рассмотрим влияние аспектного отношения, относительной длины и толщины токоподводов на размер области однородного растекания токов.

Поскольку целью работы является получение практических рекомендаций, то при рассмотрении описанной системы мы имеем в виду трубопровод реального технологического устройства, заполненный металлическим расплавом. Характерный диаметр трубопровода выберем 100 мм, что согласуется с размерами жидкометаллических переме-

шивателей [13, 14], насосов [15, 16], кристаллизаторов [16, 17]. Характерная толщина стенок промышленно выпускаемых труб порядка 2–5 мм.

Зафиксируем $R = 50$ мм, $d = 2$ мм, $b = 25$ мм и рассмотрим влияние аспектного отношения канала на однородность растекания тока. На рис. 4 приведена зависимость относительной длины области однородного растекания от аспектного отношения области для случаев хорошо и плохо проводящей стенки канала.

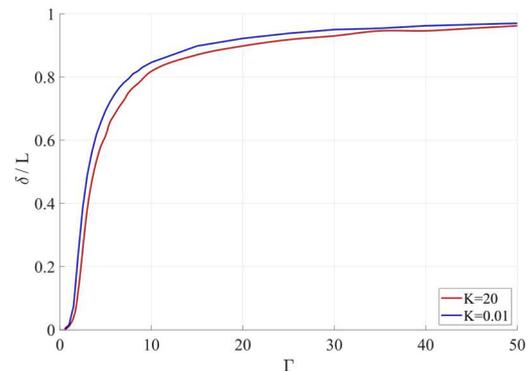


Рис. 4. Относительная длина области однородного растекания тока в зависимости от аспектного отношения цилиндра для двух соотношений проводимостей среды и внешней стенки

Выбор значений K обусловлен свойствами жидких металлов. Характерные величины проводимости жидких металлов составляют порядка 3 МСм/м. В таком случае $K = 20$ соответствует стенке из электролитической меди – наилучший из доступных в промышленных масштабах материалов, $K = 0.01$ моделирует плохо проводящую стенку. Проводимость подавляющего большинства веществ лежит в диапазоне от 0 до ≈ 60 МСм/м, а проводимость жидких металлов ~ 1 –10 МСм/м, поэтому выбор нижнего значения K является достаточно произвольным в том смысле, что предельное значение $K = 0$ достижимо на практике, но является тривиальным в контексте рассматриваемой проблематики, а все $K \ll 1$ являются в широком смысле слова эквивалентными. Таким образом, представленные на рис. 4 графики являются предельными кривыми, которые отмечают границы изменения протяженности участка однородного растекания тока при удлинении канала с разным материалом стенок.

Как видно из рис. 4, относительная протяженность δ/L слабо зависит от соотношения проводимостей сред и существенно нелинейно зависит от аспектного отношения Γ канала. При $\Gamma > 10$ эта зависимость выходит в область плато и в более чем 80% канала наблюдается равномерное растекание электрического тока (т.е. все искажения линий тока сосредоточены в области размещения токоподводов).

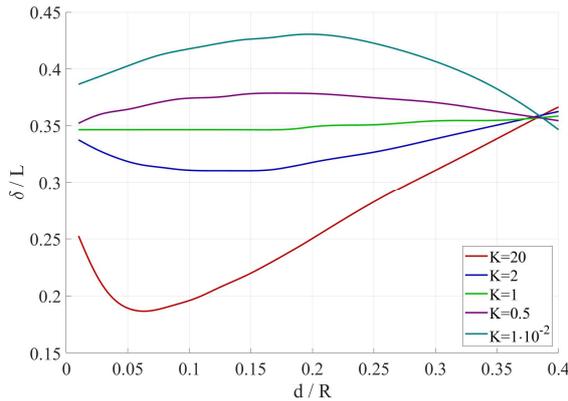


Рис. 5. Относительная длина области однородного растекания тока в зависимости от относительной толщины стенок цилиндра при нескольких отношениях проводимостей среды и внешней стенки

Далее зафиксируем аспектное отношение $\Gamma = 6$ и рассмотрим влияние толщины стенок на процесс растекание тока (см. рис. 5). Изменение относительной толщины приводит к нелинейной зависимости однородности растекания тока. Более того, график зависимости имеет точку экстремума в диапазоне от 0 до 0.4 R. В зависимости от соотношения проводимостей материалов стенки и среды эта точка может быть как локальным максимумом ($K < 1$ – плохо проводящая стенка) или минимумом ($K > 1$ – хорошо проводящая стенка).

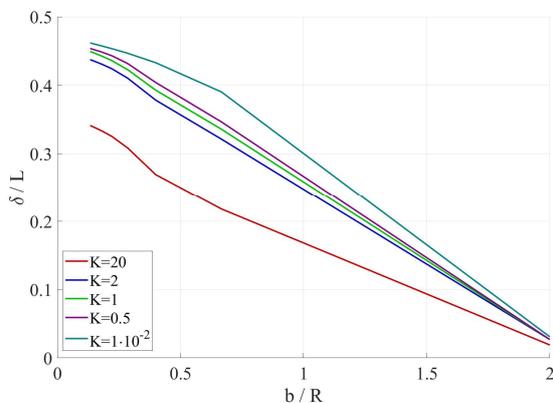


Рис. 6. Относительная длина области однородного растекания тока в зависимости от относительной длины токоподводов при нескольких отношениях проводимостей среды и внешней стенки

В районе $K = 1$ зависимости $\delta(d)$ претерпевают изменение второй производной, т.е. при $\sigma_1 \approx \sigma_2$ длина участка однородного растекания тока не зависит от толщины стенки. Для обеспечения однородности растекания предпочтительным является малая величина отношения проводимости стенки к проводимости среды, однако при этом проводимость стенки должна быть достаточной для обеспечения возможности протекания электрического

тока. Предпочтительным также является выбор толщины стенок порядка $\frac{1}{5} - \frac{1}{4}$ радиуса канала.

Зафиксировав аспектное отношение $\Gamma = 6$ и толщину стенки $d = 2$ мм, рассмотрим также влияние протяженности токоподводов на однородность растекания тока. На рис. 6 приведены зависимости длины участка однородного растекания от относительной длины электродов. Вне зависимости от соотношения проводимостей, все зависимости демонстрируют нисходящий тренд близкий к линейному. Тем не менее величина относительной проводимости стенки влияет на наклон графика (и, следовательно, значение вблизи 0). Для обеспечения наибольшего участка однородного растекания тока следует выбирать слабопроводящий (в сравнении со средой) материал для канала и использовать как можно более локализованные токоподводы. Очевидной проблемой при таком выборе становится тепловыделение вследствие джоулева нагрева в области контакта разнородных материалов.

5. Заключение

В работе изучено влияние аспектного отношения, толщины стенок и протяженности токоподводов на однородность растекания электрического тока в канале, заполненном электропроводящей средой. Установлен нелинейный характер зависимости длины участка однородного растекания тока от аспектного отношения. При аспектном отношении более 10 зависимость выходит в область плато и слабо зависит от дальнейшего увеличения длины канала. Наиболее сильная зависимость наблюдается при аспектных отношениях меньше 5.

Зависимость длины участка однородного растекания тока от толщины стенок канала нелинейна и имеет локальный экстремум в области значений менее 0,4 радиуса канала. Характер точки экстремума определяется соотношением проводимостей стенки и среды. Это позволяет управлять степенью однородности электрического поля за счет выбора геометрии и материала канала как минимизировать возмущения поля, так и вызывать вихревые течения для реализации пассивного перемешивания.

Линейная зависимость длины участка однородного растекания тока от аксиального размера токоподводов позволяет сформулировать рекомендацию: уменьшить площадь поперечного сечения контакта токоподводов. Тем не менее это неизбежно вызовет дополнительное тепловыделение за счёт джоулева нагрева в области контакта. Таким образом, при выполнении данной рекомендации требуется решение конкретной тепловой задачи для защиты установки от выхода из строя вследствие перегрева и подавления возможных конвективных течений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 122030200191-9.

Список литературы

1. Vinter E., Timofeev V., Pervukhin M., Sergeev N. Numerical simulation of electromagnetic refining by in-melt conduction excitation // *Magnetohydrodynamics*. 2021. Vol. 57. N. 1. P. 27–38. DOI:10.22364/mhd.57.1.3
2. Kleinstreuer C., Feng Y. Computational analysis of non-spherical particle transport and deposition in shear flow with application to lung aerosol dynamics – a review // *Journal of Biomechanical Engineering*. 2013. Vol. 135. N. 2, 021008. DOI: 10.1115/1.4023236
3. Minier J.-P., Henry C. The dynamics of discrete particles in turbulent flows: open issues and current challenges in statistical modeling. arXiv:2311.01921, 2023.
4. Grace R. J. R., Weber M. E. *Bubbles, Drops and Particles*. New York: Academic Press, 1978. 381 p.
5. Minier J.-P. Statistical descriptions of polydisperse turbulent two-phase flows // *Phys. Rep.* 2016. Vol. 665. P. 1–122. DOI: 10.1016/j.physrep.2016.10.007
6. Петров А. Г. Аналитическая гидродинамика. М.: Физматлит, 2010. 520 с.
7. Озерных В. С., Колесниченко И. В., Фрик П. Г. Течение в жидком металле под действием электромагнитных сил вблизи сферической частицы с отличающейся электропроводностью // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2022. Т. 15. № 3. С. 354–362. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.3.27
8. Cramer A., Eckert S., Gerbeth G. Flow measurements in liquid metals by means of the ultrasonic Doppler method and local potential probes // *The European Physical Journal Special Topics*. 2013. Vol. 220. P. 25–41. DOI:10.1140/epjst/e2013-01794-2
9. Eckert S., Buchenau D., Gerbeth G., Stefani F., Weiss F.-P. Some recent developments in the field of measuring techniques and instrumentation for liquid metal flows // *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, Vol. 48, No. 4, P. 490–498. DOI: 10.1080/18811248.2011.9711724
10. Stefani F., Eckert S., Ratajczak M., Timmel K., Wondrak T. Contactless inductive flow tomography: basic principles and first applications in the experimental modelling of continuous casting // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 143, 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/143/1/012023
11. Mordant N., Pinton J.-F. Velocity measurement of a settling sphere // *European Physical Journal B*, 2000. Vol. 18. P. 343–352. DOI: 10.1007/PL00011074
12. Zhang C., Eckert S., Gerbeth G. Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a DC magnetic field // *International Journal of Multiphase Flow*. 2005. Vol. 31. P. 824–842. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.05.001
13. Озерных В. С., Лосев Г. Л., Гольбрайх Е., Колесниченко И. В. Начальная стадия формирования вихревого течения в индукторе с вращающимися встречно магнитными полями // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2024. Т. 16. № 4. С. 493–503. DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.4.41
14. Kolesnichenko I., Pavlinov A., Golbraikh E., Frick P., Kapusta A., Mikhailovich B. The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields // *Exp. Fluids*. 2015. Vol. 56, 88. DOI: 10.1007/s00348-015-1957-z
15. Khalilov R., Kolesnichenko I. Annular linear induction pump for liquid sodium // *Magnetohydrodynamics*. 2015. Vol. 51. N. 1. P. 95–103.
16. Луелнетер Ю. Индукционные МГД машины для жидкого металла. Рига: Зинатне, 1969. 246 с.
17. Вольдек А. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 271 с.

References

1. Vinter E., Timofeev V., Pervukhin M., Sergeev N. Numerical simulation of electromagnetic refining by in-melt conduction excitation. *Magnetohydrodynamics*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 27–38. DOI: 10.22364/mhd.57.1.3
2. Kleinstreuer C., Feng Y. Computational analysis of non-spherical particle transport and deposition in shear flow with application to lung aerosol dynamics – a review. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2013, vol. 135, no. 2, 021008. DOI: 10.1115/1.4023236
3. Minier J.-P., Henry C. The dynamics of discrete particles in turbulent flows: open issues and current challenges in statistical modeling, arXiv:2311.01921, 2023.
4. Grace R.J.R., Weber M.E. *Bubbles, Drops and Particles*. New York: Academic Press, 1978. 381 p.
5. Minier J.-P. Statistical descriptions of polydisperse turbulent two-phase flows. *Phys. Rep.*, 2016, vol. 665, pp. 1–122. DOI: 10.1016/j.physrep.2016.10.007
6. Petrov A. G. *Analiticheskaya gidrodinamika* [Analytical hydrodynamics]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 520 p. (In Russian)
7. Ozernyh V.S., Kolesnichenko I. V., Frick P. G. MHD vortex flow in liquid metal near a spherical particle with different conductivity. *Computational Continuum Mechanics*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 354–362. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.3.27 (In Russian)
8. Cramer A., Eckert S., Gerbeth G. Flow measurements in liquid metals by means of the ultrasonic Doppler method and local potential probes. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013,

- vol. 220, pp. 25–41. DOI: 10.1140/epjst/e2013-01794-2
9. Eckert S., Buchenau D., Gerbeth G., Stefani F., Weiss F.-P. Some recent developments in the field of measuring techniques and instrumentation for liquid metal flows. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, vol. 48, no. 4, pp. 490–498. DOI: 10.1080/18811248.2011.9711724
 10. Stefani F., Eckert S., Ratajczak M., Timmel K., Wondrak T. Contactless inductive flow tomography: basic principles and first applications in the experimental modelling of continuous casting. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 143, 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/143/1/012023
 11. Mordant N., Pinton J.-F. Velocity measurement of a settling sphere. *European Physical Journal B*, 2000, vol. 18, pp. 343–352. DOI: 10.1007/PL00011074
 12. Zhang C., Eckert S., Gerbeth G. Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a DC magnetic field. *International Journal of Multiphase Flow*, 2005, vol. 31, pp. 824–842. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.05.001
 13. Ozernyh V. S., Losev G. L., Gol'brajkh E., Kolesnichenko I. V. Initial stage of formation of vortex flow in an inductor with counter-rotating magnetic fields. *Computational Continuum Mechanics*, 2024, vol. 16, no. 4, pp. 493–503. DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.4.41 (In Russian).
 14. Kolesnichenko I., Pavlinov A., Golbraikh E., Frick P., Kapusta A., Mikhailovich B. The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields. *Exp. Fluids*, 2015, vol. 56, 88. DOI: 10.1007/s00348-015-1957-z
 15. Khalilov R., Kolesnichenko I. Annular linear induction pump for liquid sodium. *Magnetohydrodynamics*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 95–103.
 16. Lielpeter Yu. *Indukcionnye MGD mashiny dlya zhidkogo metalla* [Inductive MHD machines for liquid metals]. Riga: Zinatne, 1969. 246 p. (In Russian)
 17. Vol'dek A. *Indukcionnye magnitogidro-dinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* [Inductive magnetohydrodynamical machines with a liquid-metal working body]. Leningrad: Energiia, 1970. 271 p. (In Russian)

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лосев Г. Л., Окатьев Р. С. Определение параметров МГД-канала для повышения однородности растекания тока // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. № 1. С. 49–55. doi: 10.17072/1994-3598-2024-1-49-55

Please cite this article in English as:

Losev G. L., Okatev R. S. Determination of the MHD channel parameters for improving the homogeneity of electric current. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 1, pp. 49–55. doi: 10.17072/1994-3598-2024-1-49-55

Сведения об авторах

1. Геннадий Леонидович Лосев, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королёва, 1, Пермь, 614013
2. Окатьев Роман Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королёва, 1, Пермь, 614013

Author information

1. Gennadiy L. Losev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
2. Roman S. Okatev, Junior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.