

УДК 537.31, 532.5-1/-9
PACS 07.05.Fb

Экспериментальное исследование МГД-течения жидкого металла в прямоугольной кювете при наличии неоднородности электропроводности

В. А. Ельтищев[†], Г. Л. Лосев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

[†]eltishchev.v@icmm.ru

Экспериментально было исследовано течение, вызываемое неоднородностью поля электропроводности проводящей жидкости во внешнем магнитном поле. Рассмотрены течения в двух конфигурациях: при сонаправленном протекании электрического тока и действии внешнего магнитного поля и при их ортогональной ориентации. Определена структура крупномасштабного вихревого течения и зависимость интенсивности течения от величины силового воздействия.

Ключевые слова: МГД, неоднородность электропроводности, вихревые течения

Поступила в редакцию 29.08.2024; после рецензии 08.10.2024; принята к опубликованию 10.10.2024

An experimental study of a liquid metal MHD flow in a rectangular cuvette in the presence of electrical conductivity inhomogeneity

V. A. Eltishchev[†], G. L. Losev

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

[†]eltishchev.v@icmm.ru

We have experimentally investigated a flow caused by inhomogeneity of the conductivity field of a conducting liquid in an external magnetic field. Flows in two configurations are considered: with a co-directional flow of electric current and action of the external magnetic field and with their orthogonal orientation. The structure of a large-scale vortex flow and the dependence of the flow intensity on the magnitude of the force influence have been found.

Keywords: MHD; electrical conductivity inhomogeneity; vortex flows

Received 29 August 2024; revised 08 October 2024; accepted 10 October 2024

doi: 10.17072/1994-3598-2024-3-67-74

1. Введение

Магнитная гидродинамика (МГД) – это область механики сплошных сред, занимающаяся вопросами течения электрически проводящей жидкости. Отличительной чертой МГД является наличие нового механизма объёмного силового воздействия,

связанного с взаимодействием протекающих через некоторый объём среды электрических токов и их взаимодействием с магнитными полями (как внешними, так и собственным полем тока) – силы Лоренца [1]. Классическая МГД рассматривает динамику однородной проводящей жидкости (например, металлического расплава). К настоя-

шему времени существует широкий класс решенных МГД задач как теоретического [2, 3], так и глубоко практического плана [4–6]. Тем не менее актуальным вопросом остаётся построение моделей, более полно учитывающих особенности реальных жидкометаллических систем, в частности, при наличии в жидких металлах примесей с проводимостью, отличной от несущей среды. В зависимости от состава примесей (оксиды, соли, легирующие добавки и пр.) желательным оказывается как извлечение примесной фазы [7], так и распределение примеси в несущей жидкости заданным образом [8, 9].

Существующие ныне модели многофазных сред [10, 11] не предполагают учёта МГД-эффектов, в первую очередь, связанных с неоднородностью растекания тока на локальных возмущениях поля проводимости и соответствующего изменения поля электромагнитных сил. Значительно упрощенные модели показывают, что такое изменение силового поля способно порождать вокруг неоднородностей проводимости вторичные электровихревые течения, потенциально изменяющие динамику поведения примеси [12].

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение структуры возникающих вокруг неоднородности электрической проводимости вихревых течений с целью расширения и верификации новых моделей многофазных МГД-течений.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка (рис. 1) включает себя кювету 1 из плексигласа, заполненную жидким галлиевым сплавом $Ga_{86.3}Zn_{10.8}Sn_{2.9}$ (вес. %). Размеры кюветы составляют 100×200 мм в горизонтальной плоскости, высота слоя жидкого металла – 20 мм. Кювета помещена внутрь катушек Гельмгольца 2, создающих в области её расположения однородное постоянное магнитное поле. Внутренний диаметр катушек Гельмгольца составляет 360 мм. Питание катушек осуществлялось от источника тока HEIDEN power GmbH. С узких торцов кюветы расположены медные электроды 3, обеспечивающие однородное протекание постоянного электрического тока через жидкий металл. Планарные размеры медных электродов 100×15 мм, высота электродов составляет 30 мм. Электрический ток подается от источника GPR-6015HD. В центре кюветы расположен луженый медный стержень 4, представляющий собой цилиндр кругового сечения, играющий роль модельной неоднородности среды. Диаметр стержня 20 мм, а высота более 50 мм. Для моделирования непроводящего включения стержень помещался в изолирующую оболочку из поливинилхлорида. Измерение поперечной компоненты скорости возникающих вихревых течений осуществлялось при помощи гребенки из восьми

датчиков 5 ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) DOP 5000, (производство “Signal Processing”, Швейцария).

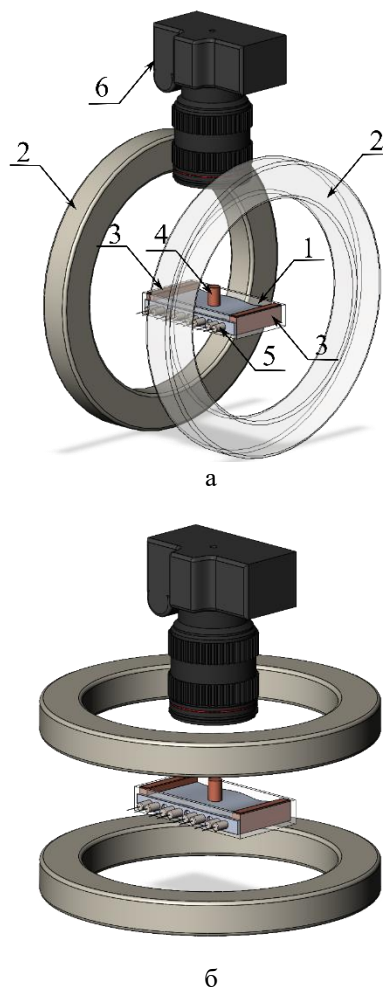


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а – продольное магнитное поле; б – вертикальное магнитное поле

Эффект Доплера – это изменение длины волны излучения, воспринимаемого наблюдателем (приемником), вследствие движения источника излучения и/или движения наблюдателя (приемника). Принцип работы УДА основан на анализе изменения частот ультразвуковых волн между последовательно излученными и отраженными от частиц в движущейся среде ультразвуковыми импульсами [13]. Наличие звукоотражающих частиц является обязательным требованием для применения УДА. В галлиевом сплаве звукоотражающими частицами являются оксиды Ga_2O и Ga_2O_3 . Положение точки измерений скорости на оси вдоль ультразвукового луча определяется временем прохождения ультразвукового импульса и скоростью звука в среде. Датчик УДА излучает набор высокочастотных волновых пакетов, которые отражаются от частиц оксидов, увлекаемых течением металла и повторяющих траектории движения жидких частиц.

Поверхность галлиевого сплава была покрыта 3%-ным раствором соляной кислоты. При контакте с металлом в растворе образовывались пузырьки водорода, служащие трассерами. Движение жидкого металла посредством молекулярного трения передавало импульс водному раствору, воспроизводя крупномасштабную картину движения поверхностных слоёв сплава. Наличие в растворе трассеров позволяет восстановить картину линий тока посредством оптической фиксации траекторий движения пузырьков. Для этого над кюветой с металлом располагалась камера б, производящая видеосъёмку в ходе всего эксперимента.

Введём безразмерные критерии, характеризующие интенсивность течения и силового воздействия [12, 15], а именно число Рейнольдса

$$Re = \frac{V_{max} L}{\nu}, \quad (1)$$

параметр электромагнитного воздействия

$$S = \frac{IB_0 L}{\rho \nu^2} \quad (2)$$

и безразмерное отношение проводимостей

$$K = \frac{\sigma_{цил}}{\sigma_{жид}}, \quad (3)$$

где V_{max} – максимальная скорость течения, I – протекающий через металл электрический ток, B_0 – величина внешнего магнитного поля, L – характерный линейный размер (диаметр цилиндра), ρ – плотность жидкого металла, ν – кинематическая вязкость расплава, $\sigma_{цил}$ – электропроводность материала цилиндрической неоднородности, $\sigma_{жид}$ – электропроводность жидкого металла.

Физические свойства используемого в работе сплава: плотность $\rho = 6302 \text{ кг/м}^3$, вязкость $\nu = 2.9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, электрическая проводимость $\sigma = 2.6 \cdot 10^6 \text{ См/м}$. Более подробно свойства сплава описаны в [14].

Будем рассматривать две конфигурации взаимной ориентации электрического тока и внешнего магнитного поля.

3. Обтекание неоднородности в продольном магнитном поле

В первом случае направим ток и магнитное поле вдоль одного направления. При отсутствии неоднородностей проводимости среды отсутствует компонента тока, ортогональная магнитному полю, и, как следствие, объёмная электромагнитная сила $F = J \times B$ равна нулю. При внесении в жидкость цилиндра в объёме среды возникает неоднородность проводимости, приводящая к искажению линий электрического тока и появлению поперечной магнитному полю компоненты тока. В результате возникает вертикальная электромагнитная сила, приводящая жидкий металл в движение. На рис. 2 схематически представлен описанный механизм генерации течения в продольном магнитном поле.

На рис. 3 приведены фотографии линий гидродинамического тока в поверхностном слое жидкого металла, полученные при помощи пузырьковых трекеров. Как видно, вокруг цилиндрической неоднородности возникают вихревые потоки, чья структура зависит от электропроводности включения. Возникающие вследствие локальной неоднородности проводимости вихревые течения за счёт сил вязкого трения порождают крупномасштабный вихрь, охватывающий весь объём ячейки.

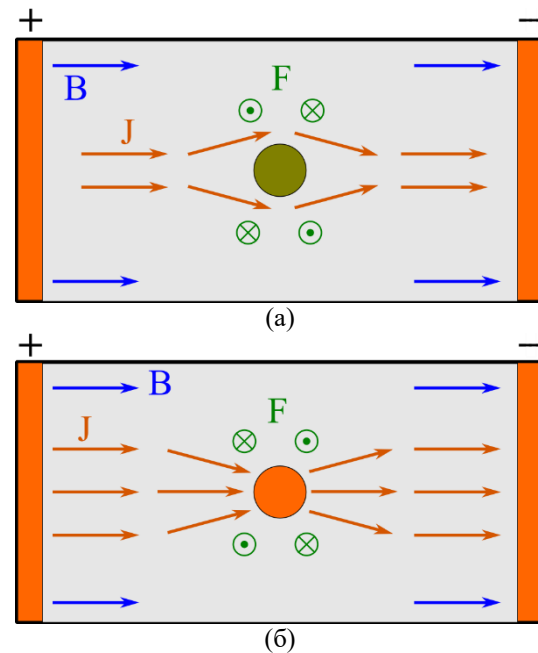


Рис. 2. Схема генерации МГД течения в продольном магнитном поле: а) непроводящий цилиндр, б) хорошо проводящий цилиндр.

При помощи датчиков УДА было измерено поле продольной компоненты скорости течений, возникающих вокруг цилиндрической неоднородности. На рис. 4 приведены двумерные карты скорости в плоскости ячейки. Полученная при помощи УДА карта распределения компоненты скорости повторяет наблюдаемый за счёт фиксации движения трассерных пузырьков крупномасштабный вихрь. Изменение отношения проводимости жидкости и твёрдого включения приводит к смене направления течения (инверсия знака скорости в области вблизи цилиндра на рис. 4). При этом следует отметить, что течение вблизи непроводящего цилиндра является более выраженным, чем в случае хорошо проводящей неоднородности, в силу большего абсолютного перепада проводимостей.

На рис. 5 приведены сечения карты скорости для непроводящего и хорошо проводящего цилиндров вдоль двух характерных направлений: вблизи области неоднородности проводимости и вблизи стенки кюветы. Вертикальными линиями на графиках отмечен среднеквадратичный разброс пульсаций скорости относительно среднего профиля (сплошная линия).

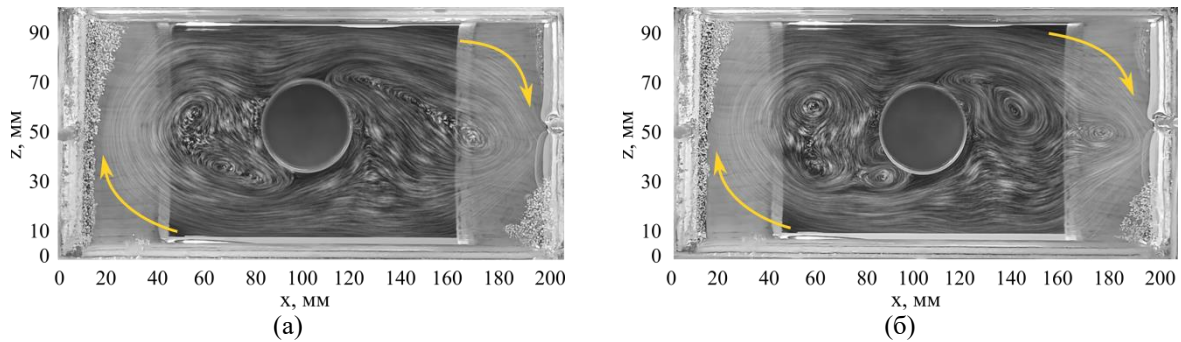


Рис. 3. Фото линий тока МГД течения на поверхности жидкого металла при сонаправленном действии электрического тока и внешнего магнитного поля: а) непроводящий цилиндр, б) хорошо проводящий цилиндр. Желтыми стрелками обозначено направление движения крупномасштабных вихрей

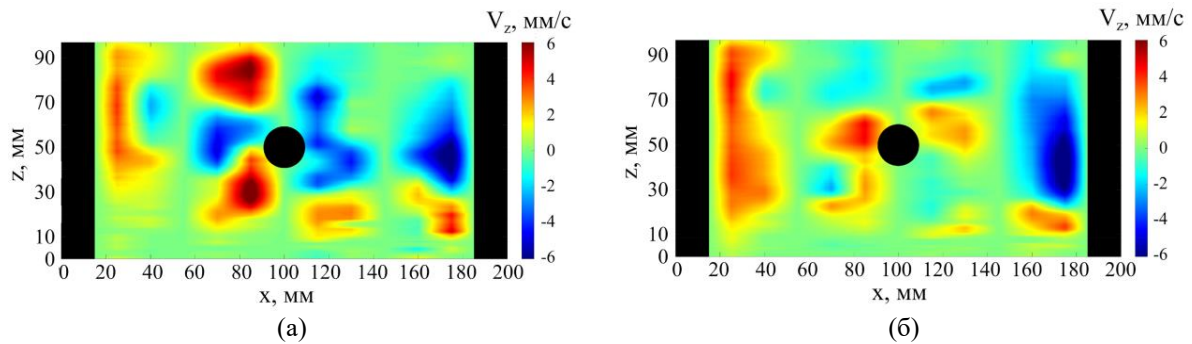


Рис. 4. Карта z -компоненты скорости течения металла при сонаправленном действии электрического тока и внешнего магнитного поля: а) непроводящий цилиндр, б) хорошо проводящий цилиндр

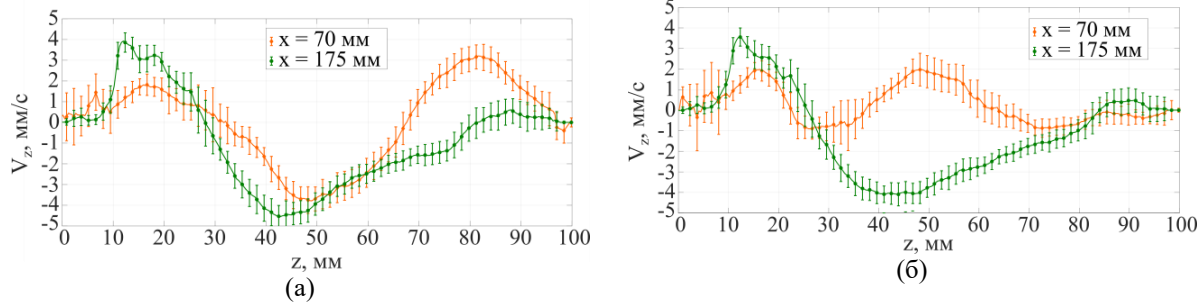


Рис. 5. Осредненные по времени профили z -компоненты скорости (сплошные линии) и их пульсации (вертикальные линии) в двух сечениях слоя: а) непроводящий цилиндр, б) хорошо проводящий цилиндр.

Тем не менее общая интенсивность течения, возникающего вокруг хорошо проводящего цилиндра, оказывается выше приблизительно на 6%. На рис. 6 приведена зависимость числа Рейнольдса от силового параметра для двух соотношений проводимости цилиндрического включения и жидкости.

Зависимости $Re(S)$ для двух соотношений проводимости оказываются близки. При минимальном рассмотренном значении силового параметра отличие в интенсивности течений не превышает 10 %, и течение вокруг непроводящего цилиндра оказывается более развитым. С ростом величины силового параметра (повышения величины протекающего тока либо внешнего магнитного поля) интенсивность вихревых течений вокруг хорошо проводящего включения нарастает несколько быстрее, чем в случае электрически изолированного цилиндра.

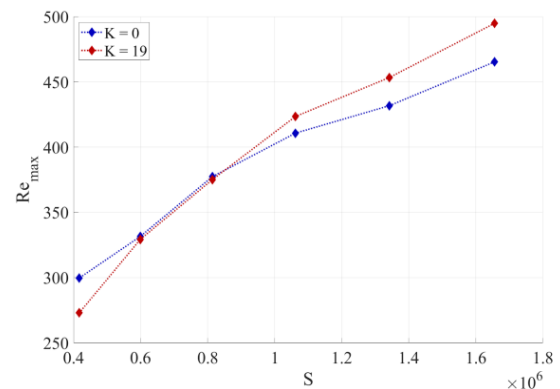


Рис. 6. Зависимость числа Рейнольдса течения от силового параметра

4. Обтекание неоднородности в вертикальном магнитном поле

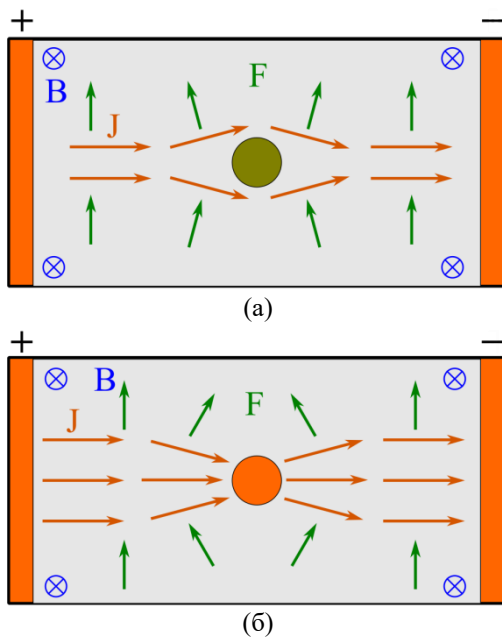


Рис. 7. Схема генерации МГД течения в вертикальном магнитном поле: а) непроводящий цилиндр, б) хорошо проводящий цилиндр

Во втором случае постоянное магнитное поле направлено перпендикулярно направлению электрического тока. Это неизбежно приводит к возникновению электромагнитной силы, преимущественно направленной вдоль электродов. При наличии в центре кюветы цилиндра происходит искривление линий электрического тока, в результате чего возникает горизонтальная компонента электромагнитной силы, сонаправленная с электрическим током (см. рис. 7).

Структуру течения жидкого металла на поверхности кюветы можно получить из видеозаписи пузырьковых треков. Из рис. 8 видно, что наблюдается крупномасштабное вихревое течение вокруг цилиндра, с небольшими вторичными вихрями в углах, вблизи электродов кюветы. Центральный крупномасштабный вихрь располагается несимметрично относительно оси цилиндра и имеет вытянутую вдоль направления протекания тока форму. Внутри крупномасштабного вихря также возникает мелкомасштабный вторичный вихрь меньшей интенсивности.

Карта распределения z -компоненты скорости течения жидкого металла внутри кюветы представлена на рис. 9. Видно, что вне зависимости от проводимости цилиндра наблюдается течение жидкости в одном направлении вблизи цилиндра и в обратном направлении на периферии. В скрещенных электрическом и магнитном полях локализованная неоднородность проводимости оказывается своего рода областью неустойчивости равновесия

жидкости за счёт искажения поля электромагнитной силы. В результате, течение жидкости порождается преимущественно невозмущенной компонентой силы, что обуславливает крайне слабую зависимость структуры потока от отношения проводимостей жидкости и включения.

На рис. 10 представлены профили скорости жидкости в двух сечениях слоя по координате x . Как видно, течение вблизи цилиндра имеет меньшую пульсационную составляющую, чем на периферии слоя: величина вертикальных линий, отмечающих среднеквадратичный разброс скорости относительно среднего профиля, в сечении $x = 70$ мм меньше, чем в сечении $x = 175$ мм.

Тем не менее интенсивность течения для хорошо проводящего цилиндра оказывается больше примерно на 50%, нежели для непроводящего при всех рассмотренных значениях силового параметра (см. рис. 11).

Зависимость $Re(S)$ оказывается близка к линейной в случае скрещенных полей в отличие от случая сонаправленного приложения тока (электрического поля) и внешнего магнитного поля (см. рис. 6). В последнем случае зависимость интенсивности от внешней силы имеет корневой вид, что связано с механизмом возникновения ненулевой проекции электрического тока на направление вектора индукции внешнего магнитного поля.

5. Заключение

Показано, что при протекании электрического тока локальная неоднородность электропроводности вызывает в слое проводящей жидкости, находящейся под действием внешнего постоянного магнитного поля, вихревые течения как в случае коллинеарности электрического тока и магнитного поля, так и в случае их ортогональности.

При сонаправленном воздействии электрического тока и магнитного поля искажение линий тока приводит к формированию ненулевой компоненты объёмной силы, порождающей вихревое течение. В результате в ячейке формируется крупномасштабный вихрь, охватывающий весь предоставленный объём, с ярко выраженными мелкомасштабными вихрями вблизи области неоднородности среды. Течение вблизи непроводящего цилиндра является более выраженным, чем в случае хорошо проводящего. Однако общая интенсивность течения оказывается выше приблизительно на 6% для хорошо проводящего цилиндра.

При ортогональном воздействии электрического тока и магнитного поля локальная неоднородность проводимости служит источником нарушения квазиравновесного распределения электромагнитных сил, приводящих к возникновению течения. В ячейке возникает крупномасштабное вихревое течение вокруг цилиндра с небольшими вторичными вихрями вблизи электродов.

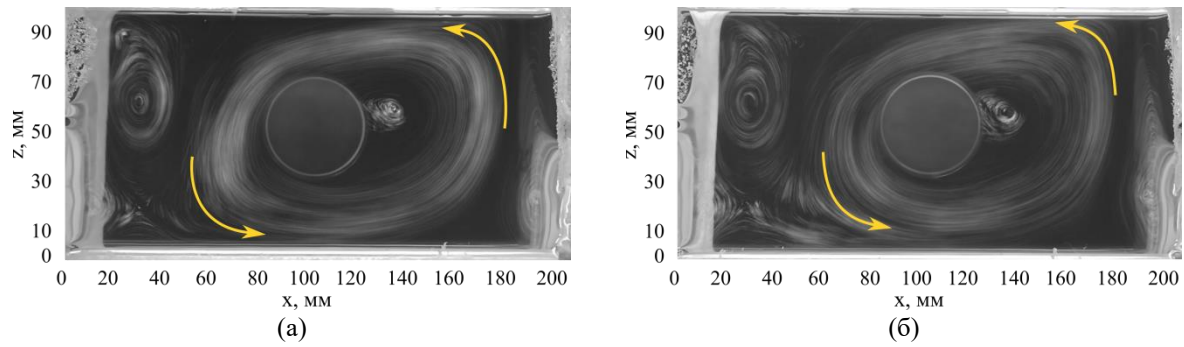


Рис. 8. Фото линий тока МГД течения на поверхности жидкого металла при сонаправленном действии электрического тока и внешнего магнитного поля: а) непроводящий цилиндр, б) хорошо проводящий цилиндр. Стрелками обозначено направление движения крупномасштабных вихрей

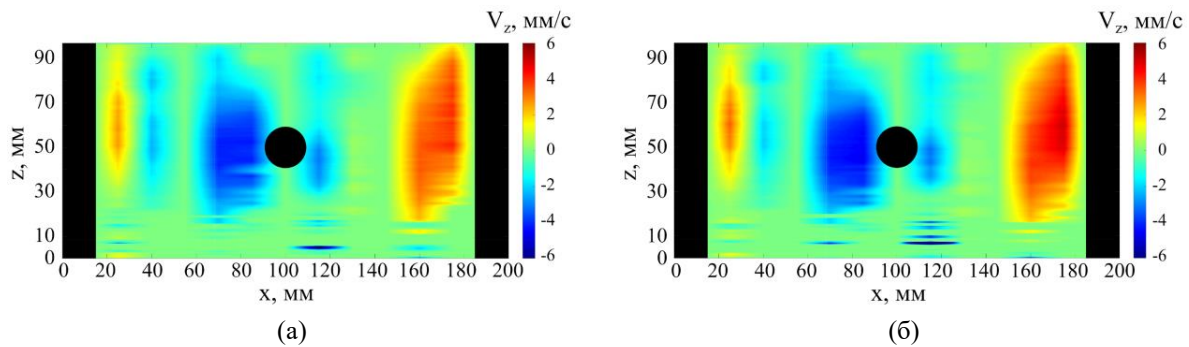


Рис. 9. Карта z-компоненты скорости течения металла при сонаправленном действии электрического тока и внешнего магнитного поля: а) непроводящий цилиндр, б) хорошо проводящий цилиндр

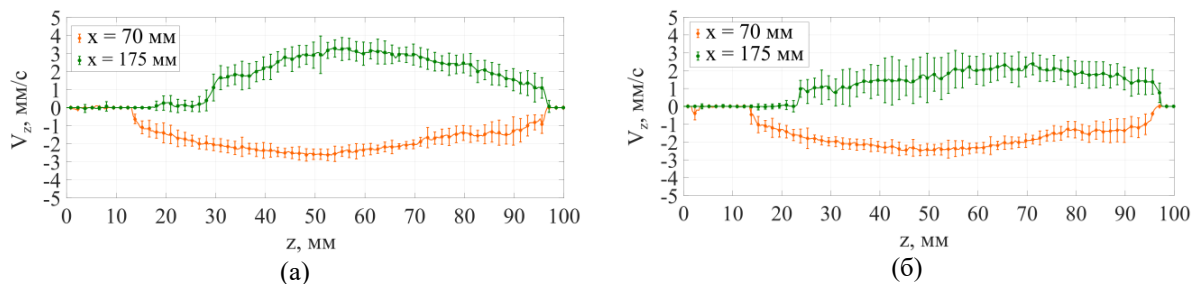


Рис. 10. Осредненные по времени профили z-компоненты скорости (сплошные линии) и их пульсации (вертикальные линии) в двух сечениях слоя: а) непроводящий цилиндр, б) хорошо проводящий цилиндр.

Основной вихрь вытянут вдоль направления протекания электрического тока. Интенсивность течения для хорошо проводящего цилиндра оказывается больше примерно на 50%, нежели для непроводящего при всех рассмотренных значениях силового параметра.

Обнаруженные гидродинамические структуры находятся в качественном согласии с результатами расчётов для сферической частицы, погруженной в электропроводящую жидкость [12]. Представленные в настоящем исследовании результаты позволяют верифицировать численные и аналитические модели, необходимые для более комплексных задач, таких как двухфазные МГД-течения

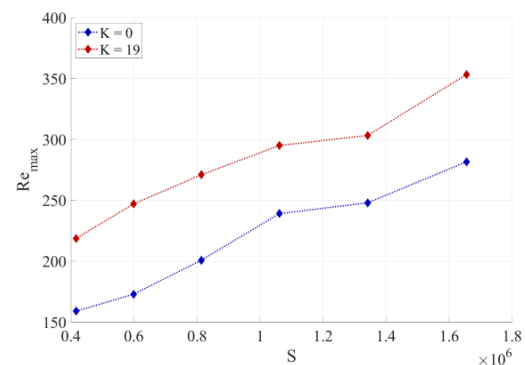


Рис. 11. Зависимость числа Рейнольдса течения от силового параметра

Список литературы

1. Брановер Г. Г., Цинобер А. Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. М.: Наука, 1970. 383 с.
2. Herreman W., Nore C., Guermond J. L., Cappanera L., Weber N., Horstmann G. M. Perturbation theory for metal pad roll instability in cylindrical reduction cells // *Journal of Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 878. P. 598–646. DOI: 10.1017/jfm.2019.642
3. Davidson P., Kinner D., Lingwood R., Short D., He X. The role of Ekman pumping and the dominance of swirl in confined flows driven by Lorentz forces // *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 1999. Vol. 18. P. 693–711. DOI: 10.1016/S0997-7546(99)00106-5
4. Kim H., Boysen D. A., Newhouse J. M., Spatocco B. L., Chung B., Burke P. J., Bradwell D. J., Jiang K., Tomaszowska A. A., Wang K., Wei W., Ortiz L. A., Barriga S. A., Poizeau S. M., Sadoway D. R. Liquid metal batteries: Past, present, and future // *Chemical Reviews*. 2013. Vol. 113. N. 3. P. 2075–2099. DOI: 10.1021/cr300205k
5. Eckert S., Nikrityuk P. A., Rübiger D., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2007. Vol. 38. N. 6. P. 977–988. DOI: 10.1007/s11663-007-9096-4
6. Shu D., Mi J., Wang J., Sun B. Modelling the electromagnetic separation of non-metallic particles from liquid metal flowing through a two-stage multichannel // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. N. 1. P. 21–26. DOI: 10.2355/isijinternational.51.21
7. Zhang L., Wang S., Dong A., Gao J., Damoah L. N. W. Application of electromagnetic (EM) separation technology to metal refining processes: a review // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014. Vol. 45, N. 6. P. 2153–2185. DOI: 10.1007/s11663-014-0123-y
8. Farooq M., Shawnam J. A comparative study of the impact of the stirrer design in the stir casting route to produce metal matrix composites // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 2021. N. 1, 4311743. DOI: 10.1155/2021/4311743
9. Vivés C., Bas J., Beltran G., Fontaine G. Fabrication of metal matrix composites using a helical induction stirrer // *Materials Science and Engineering A*. 1993. Vol. 173. N. 1–2. P. 239–242. DOI: 10.1016/0921-5093(93)90222-z
10. Kuerten J. G. M. Point-particle DNS and LES of particle-laden turbulent flow – a state-of-the-art review // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2016. Vol. 97. N. 3. P. 689–713. DOI: 10.1007/s10494-016-9765-y
11. Brandt L., Coletti F. Particle-laden turbulence: progress and perspectives // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 54. N. 1. P. 159–189. DOI: 10.1146/annurev-fluid-030121-021103
12. 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
13. Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry // *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol. 75, 101786. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101786
14. Dobosz A., Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., Sokoliuk B., Gancarz T. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy // *Fluid Phase Equilibria*. 2018. Vol. 465. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.fluid.2018.03.001
15. Teplyakov I. O., Vinogradov D. A., Ivochkin Y. P., Klementyeva I. B. Experimental and numerical investigation of the instability of the electrovortex flow in hemispherical container // *Fluid Dynamics Research*. 2018. Vol. 50, 051415. DOI: 10.1088/1873-7005/aaba63

References

1. Branover G. G., Tsinober A. B. *Magnitnaya gidrodinamika neshhimaemykh sred* [Magnetohydrodynamics of incompressible media]. Moscow: Nauka, 1970. 383 p. (In Russian)
2. Herreman W., Nore C., Guermond J. L., Cappanera L., Weber N., Horstmann G. M. Perturbation theory for metal pad roll instability in cylindrical reduction cells. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, vol. 878, pp. 598–646. DOI: 10.1017/jfm.2019.642
3. Davidson P., Kinner D., Lingwood R., Short D., He X. The role of Ekman pumping and the dominance of swirl in confined flows driven by Lorentz forces. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 1999, vol. 18, pp. 693–711. DOI: 10.1016/S0997-7546(99)00106-5
4. Kim H., Boysen D. A., Newhouse J. M., Spatocco B. L., Chung B., Burke P. J., Bradwell D. J., Jiang K., Tomaszowska A. A., Wang K., Wei W., Ortiz L. A., Barriga S. A., Poizeau S. M., Sadoway D. R. Liquid metal batteries: Past, present, and future. *Chemical Reviews*, 2013, vol. 113, no. 3, pp. 2075–2099. DOI: 10.1021/cr300205k
5. Eckert S., Nikrityuk P. A., Rübiger D., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2007, vol. 38, no. 6. P. 977–988. DOI: 10.1007/s11663-007-9096-4
6. Shu D., Mi J., Wang J., Sun B. Modelling the electromagnetic separation of non-metallic particles from liquid metal flowing through a two-stage multichannel. *ISIJ International*, 2011, vol. 51, no. 1, pp. 21–26. DOI: 10.2355/isijinternational.51.21
7. Zhang L., Wang S., Dong A., Gao J., Damoah L. N. W. Application of electromagnetic

- (EM) separation technology to metal refining processes: a review. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, vol. 45, no. 6. P. 2153–2185. DOI: 10.1007/s11663-014-0123-y
8. Farooq M., Shawnam J. A comparative study of the impact of the stirrer design in the stir casting route to produce metal matrix composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 2021, no. 1, 4311743. DOI: 10.1155/2021/4311743
 9. Vivés C., Bas J., Beltran G., Fontaine G. Fabrication of metal matrix composites using a helical induction stirrer. *Materials Science and Engineering A*, 1993, vol. 173, no. 1–2, pp. 239–242. DOI: 10.1016/0921-5093(93)90222-z
 10. Kuerten J. G. M. Point-particle DNS and LES of particle-laden turbulent flow – a state-of-the-art review. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2016, vol. 97, no. 3, pp. 689–713. DOI: 10.1007/s10494-016-9765-y
 11. Brandt L., Coletti F. Particle-laden turbulence: progress and perspectives. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2022, vol. 54, no. 1, pp. 159–189. DOI: 10.1146/annurev-fluid-030121-021103
 12. Ozernykh 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. (In Russian). DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.3.27
 13. Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 75, 101786. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101786
 14. Dobosz A., Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., Sokoliuk B., Gancarz T. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy. *Fluid Phase Equilibria*, 2018, vol. 465, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.fluid.2018.03.001
 15. Teplyakov I. O., Vinogradov D. A., Ivochkin Y. P., Klementyeva I. B. Experimental and numerical investigation of the instability of the electrovortex flow in hemispherical container. *Fluid Dynamics Research*, 2018, vol. 50, 051415. DOI: 10.1088/1873-7005/aaba63

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ельтищев В. А., Лосев Г. Л. Экспериментальное исследование МГД-течения жидкого металла в прямоугольной кювете при наличии неоднородности электропроводности // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. № 4. С. 22–29. doi: 10.17072/1994-3598-2024-4-22-29

Please cite this article in English as:

Eltishchev V. A., Losev G. L. An experimental study of a liquid metal MHD flow in a rectangular cuvette in the presence of electrical conductivity inhomogeneity. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2024, no. 4, pp. 22–29. doi: 10.17072/1994-3598-2024-4-22-29

Сведения об авторах

1. *Владислав Андреевич Ельтищев*, м.н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
2. *Геннадий Леонидович Лосев*, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.

Author information

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