

Received: 22.07.2024

Revised: 02.09.2024









Accepted: 25.10.2024

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.069-078

SPIN-UP OF THE VORTEX FLOW OF LIQUID METAL IN A THIN LAYER PLACED IN AN ALTERNATING MAGNETIC FIELD

S. I. Banshchikov^a, I. V. Kolesnichenko^b, A. O. Poluyanov^c*, and R. I. Khalilov^d

*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Ak. Koroleva St., Perm, 614013, Russia*

- a)  <https://orcid.org/0009-0004-4078-4011>  banshchikov.s@icmm.ru;
 b)  <https://orcid.org/0000-0001-9378-5334>  kiv@icmm.ru;
 c)  <https://orcid.org/0000-0002-6103-5157>  poluyanov.a@icmm.ru;
 d)  <https://orcid.org/0000-0003-4244-4630>  khalilov@icmm.ru

*Corresponding author. Email: poluyanov.a@icmm.ru

Address for correspondence: ul. Ak. Koroleva, 1, Perm, 614013, Russia

Tel: +7 (342) 237-8387; fax: +7 (342) 237-8487

The paper studies the transient nonequilibrium modes of a vortex flow in a thin liquid metal layer. The flow is caused by electromagnetic forces generated by the interaction of an alternating magnetic field and electric current induced by it. The most stable variant of the flow, in the form of two large-scale vortices, is studied. In this instance, the region where the alternating magnetic field is generated is situated in close proximity to the edge of the longer side of the rectangular liquid metal layer. Upon activation of the inductor, the flow evolves from rest to some equilibrium state. Conversely, upon deactivation, the flow diminishes. The study is conducted on a gallium eutectic alloy by means of an ultrasonic Doppler velocimeter. Two parameters determining the intensity of the force action are varied: the strength and frequency of the electric current flowing through the inductor windings. The durations of flow evolution and decay depending on the varying process parameters are evaluated. Vortex flow studies can be useful for designing MHD pumps and for stirring liquid metals.

Keywords: experiment with liquid metal, magnetohydrodynamics, transient modes, thin layer, electrovortex flow evolution, ultrasonic Doppler velocimeter

Acknowledgment

The work was performed according to state assignment No. 122030200191-9.

References

1. Kolesnichenko, I., Khalilov, R., and Khripchenko, S. Vortical flow of conducting fluid driven by an alternating magnetic field in a plane channel. *Magnetohydrodynamics*, 2007, 43 (1), 45–52. DOI: 10.22364/mhd.43.1.5.
2. Khalilov, R.I., Mamykin, A.D., Okatev, R.S., and Kolesnichenko, I.V. The impact of flow induced by rotating magnetic fields on processes in a molten conductive medium. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2023, 3, 6–16. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.006-016. Available at: http://dream-journal.org/issues/2023-3/2023-3_396.html
3. Cramer, A., Galindo, V., and Zennaro, M. Frequency dependence of an alternating magnetic field driven flow. *Magnetohydrodynamics*, 2015, 51 (1), 133–148. DOI: 10.22364/mhd.51.1.13.



4. Sarma, M., Grants, I., Herrmannsdörfer, T., and Gerbeth, G. Contactless generation of cavitation in high temperature liquid metals and its impact on particle dispersion in solidified iron and steel samples. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 291, 117041. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117041.
5. He, Y., Tang, J., Kalantar-Zadeh, K., Dickey, M.D., and Wang, X. Noncontact rotation, levitation, and acceleration of flowing liquid metal wires. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119 (6), e2117535119. DOI: 10.1073/pnas.2117535119.
6. Nikulin, I.L. and Perminov, A.V. Simulation of the averaged flow of a metal melt in an alternating magnetic field with variable amplitude and frequency. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, 93 (3), 556–566. DOI: 10.1007/s10891-020-02153-0.
7. Moffatt, H.K. Electromagnetic stirring. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1991, 3 (5), 1336–1343. DOI: 10.1063/1.858062.
8. Wang, X., Wang, S., Zhang, L., Sridhar, S., Conejo, A., and Liu, X. Analysis on the deflection angle of columnar dendrites of continuous casting steel billets under the influence of mold electromagnetic stirring. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2016, 47 (11), 5496–5509. DOI: 10.1007/s11661-016-3695-0.
9. Timofeev, V., Pervukhin, M., Vinter, E., and Sergeev, N. Behavior of non-conducting particles in molten aluminium cast into electromagnetic molds. *Magnetohydrodynamics*, 2020, 56 (4), 459–472. DOI: 10.22364/mhd.56.4.10.
10. Listratov, Ya.I., Razuvanov, N.G., Belyaev, I.A., and Sviridov, E.V. Dynamics of submerged jet flow in a pipe in a longitudinal magnetic field. *Computational Continuum Mechanics*, 2023, 15 (4), 480–494. (In Russian). DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.4.37.
11. Losev, G. and Kolesnichenko, I. Structure of MHD vortex flows in a thin layer of liquid metal. *Magnetohydrodynamics*, 2019, 55 (1–2), 97–105. DOI: 10.22364/mhd.55.1-2.12.
12. Losev, G.L., Khalilov, R.I., and Kolesnichenko, I.V. Experimental investigation of characteristics of liquid metal flow generated by alternating magnetic field. *Vestnik Permskogo Universiteta. Fizika*, 2017, 4 (38), 11–18. (In Russian). DOI: 10.17072/1994-3598-2017-4-11-18.
13. Dobosz, A., Plevachuk, Yu, Sklyarchuk, V., Sokoliuk, B., and Gancarz, T. Thermophysical properties of the liquid Ga-Sn-Zn eutectic alloy. *Fluid Phase Equilibria*, 2018, 465, 1–9. DOI: 10.1016/j.fluid.2018.03.001.
14. Losev, G. and Kolesnichenko, I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 75, 101786. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101786.
15. Liu, K., Stefani, F., Weber, N., Weier, T., and Li, B.W. Numerical and experimental investigation of electro-vortex flow in a cylindrical container. *Magnetohydrodynamics*, 2020, 56 (1), 27–41. DOI: 10.22364/mhd.56.1.3.
16. Zürner, T., Schumacher, J., Schindler, F., Vogt, T., and Eckert, S. Combined measurement of velocity and temperature in liquid metal convection. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 876, 1108–1128. DOI: 10.1017/jfm.2019.556.
17. Franke, S., Rübiger, D., Galindo, V., Zhang, Y., and Eckert, S. Investigations of electrically driven liquid metal flows using an ultrasound Doppler flow mapping system. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, 48, 64–73. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2015.09.004.
18. Ozernykh, V.S., Losev, G.L., Golbraikh, E., and Kolesnichenko, I.V. Initial stage of formation of vortex flow in an inductor with counter-rotating magnetic fields. *Computational Continuum Mechanics*, 2023, 16 (4), 493–503. (In Russian). DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.4.41.



Подана в журнал: 22.07.2024
УДК 537.84, 532.54
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.069-078

РАЗГОН ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПЛОСКОМ СЛОЕ, ПОМЕЩЕННОМ В ПЕРЕМЕННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

С. И. Банщикова^а, И. В. Колесниченко^б, А. О. Полуянов^{в, *}, Р. И. Халилов^г

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук
ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия*

- ^{а)} <https://orcid.org/0009-0004-4078-4011> banshchikov.s@icmm.ru;
^{б)} <https://orcid.org/0000-0001-9378-5334> kiv@icmm.ru;
^{в)} <https://orcid.org/0000-0002-6103-5157> poluyanov.a@icmm.ru;
^{г)} <https://orcid.org/0000-0003-4244-4630> khalilov@icmm.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: poluyanov.a@icmm.ru
Адрес для переписки: ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия
Тел.: +7 (342) 237-83-87; Факс: +7 (342) 237-84-87

Работа посвящена изучению переходных неравновесных режимов вихревого течения в плоском слое жидкого металла. Течение вызвано действием электромагнитных сил, возникающих при взаимодействии переменного магнитного поля и индуцированного им электрического тока. Для исследования выбран наиболее устойчивый вариант течения в виде двух крупномасштабных вихрей. В данном случае область, в которой генерируется переменное магнитное поле, расположена рядом с краем длинной стороны прямоугольного слоя жидкого металла. При включении индуктора течение развивается из состояния покоя до некоторого равновесного состояния, а при отключении индуктора, наоборот, затухает. Исследование выполнено на галлиевой эвтектике с помощью ультразвукового доплеровского анемометра. В данной работе варьируются два параметра, определяющие интенсивность силового воздействия: сила и частота электрического тока, который течет по обмоткам индуктора. Получена оценка времени развития и затухания течения в зависимости от варьируемых параметров процесса. Исследования вихревых течений могут быть полезны при проектировании МГД-насосов, а также для перемешивания жидких металлов.

Ключевые слова: эксперимент с жидким металлом, магнитная гидродинамика, переходные режимы, плоский слой, развитие вихревого течения, ультразвуковой доплеровский анемометр

1. Введение

Изучение процессов, происходящих в жидких металлах и их сплавах, необходимо для совершенствования металлургических технологий. Также жидкий металл рассматривается как наилучший теплоноситель для систем охлаждения атомных реакторов на быстрых нейтронах и разрабатываемых термоядерных энергетических установок. Проведение исследовательских экспериментов с некоторыми наиболее востребованными в промышленности металлами крайне затруднено из-за высокой температуры, химической агрессивности этих металлов и их опасности в расплавленном состоянии. Такими металлами являются свинец, алюминий, магний, натрий и их сплавы. В материаловедении особенно остро стоит задача, связанная с определением физических свойств металлов или их сплавов в расплавленном состоянии. Измерение свойств может помочь с определением состава сплавов или многофазных сред. Также определение свойств необходимо для корректного математического моде-



лирования происходящих процессов. Прямые измерения в данном случае или невозможны, или дают результаты с низкой достоверностью. Поэтому выходом в данном случае являются методики косвенных определений свойств на основе измерения характеристик процессов, например гидродинамических.

Актуальность изучения течений в плоском слое обусловлена возможностью их применения в металлургии для перемешивания жидких металлов [1], создания транзитных течений, сепарации включений из расплавов. В силу того, что жидкие металлы и сплавы проводят электрический ток, гидродинамический процесс вихревого течения может быть создан электромагнитными силами [2].

Конфигурация плоского слоя позволяет существенно увеличить электромагнитные силы из-за уменьшения межполюсного зазора. Плоский слой проводящей жидкости пронизывается переменным магнитным полем, созданным индуктором. Это поле порождает в металле вихревой электрический ток плотностью j . При взаимодействии вихревого тока j и магнитного поля B генерируется электромагнитная сила $f^{em} = j \times B$, которая имеет вихревую компоненту. Подробный механизм возникновения электромагнитной силы описан в работах [3–6]. Под действием этой силы в плоском слое возникает вихревое течение.

Пульсации скорости течения являются положительным эффектом в процессах перемешивания рабочей среды [7–9], способствуя ее гомогенизации, и, напротив, являются отрицательным эффектом в процессах с присутствием транзитного и струйного течений [10], где принципиально важна стабилизация. Экспериментальное исследование вихревых течений является актуальной задачей и служит логическим продолжением серии работ [11, 12]. В работе [11] определены области параметров процесса, при которых вихревое течение имеет два или четыре крупномасштабных вихря.

Принципиально важным вопросом с точки зрения технологии является рациональное использование электроэнергии для подачи питания к установкам. Этого можно достичь, если подавать питание индуктора не постоянно, а порциями, тем самым постоянно поддерживая процесс «разгон – торможение», не давая системе вернуться в исходное состояние покоя. Поэтому в данной работе экспериментально исследуются две принципиально важные фазы процесса вихревого течения жидкого металла: разгон и торможение. Целью работы является получение зависимости времени разгона и торможения течения от силового параметра, что позволит подобрать характеристики для осуществления технологического процесса.

2. Постановка эксперимента и методы

Экспериментальная установка (рис. 1, 2) включает в себя прямоугольную кювету и С-образный индуктор. Кювета изготовлена из органического стекла и имеет следующие внутренние размеры (длина, ширина, высота): $200 \times 100 \times 10$ мм. Кювета заполнена эвтектическим галлиевым сплавом со следующими характеристиками: Ga – 87,5 %; Sn – 10,5 %; Zn – 2 %; $\rho = 6150$ кг/м³; $\sigma = 2,6^6$ 1/(Ом · м); $v = 2,9 \cdot 10^{-7}$ м/с². Сплав имеет температуру плавления 17 °С. Свойства галлиевого сплава описаны в [13]. Данная эвтектика была выбрана для использования в экспериментальной установке из-за ее хорошо изученных свойств и удобства работы с ней. С-образный индуктор изготовлен из пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм в количестве 120 шт. и имеет сечение квадрата 60×60 мм. Индуктор подключен к источнику переменного тока Pacific Smart Source 360-ASX.

Для измерения скорости течения электропроводящей жидкости бесконтактным способом в эксперименте использовали ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА) Dop-5000, Signal Processing, Switzerland. Первый датчик расположен вдоль наиболее длинной стороны кюветы, в пристеночной области. Второй датчик расположен перпендикулярно индуктору, в середине наиболее длинной стороны – в центральной области. Такое расположение датчиков обусловлено тем, что в центральной области ячейки возмож-

но наблюдение крупномасштабных структур, а в пристеночной области возможно наблюдение пульсаций течения.

Ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА) позволяет бесконтактным образом проводить измерения в оптически непрозрачных средах. В них визуально отследить физические эффекты весьма затруднительно, иногда даже принципиально невозможно. Принцип работы УДА основан на испускании высокочастотных ультразвуковых импульсов и регистрации отраженного эха от движущихся частиц среды [14–17]. В качестве источников импульсов и приемников эха служат датчики, которые состоят из пьезоэлементов. УДА дает возможность измерять только одну компоненту скорости течения жидкости вдоль луча. Несущая частота каждого датчика составляла 4 МГц.

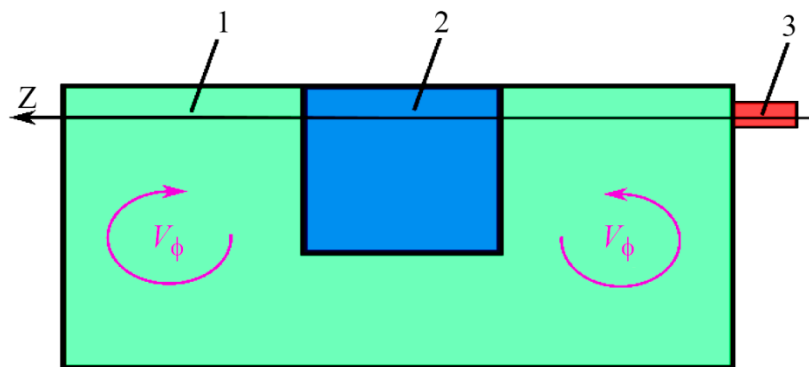


Рис. 1. Схема изучаемого плоского слоя: 1 – кювета; 2 – индуктор; 3 – датчик УДА. Стрелками показана схема течения.

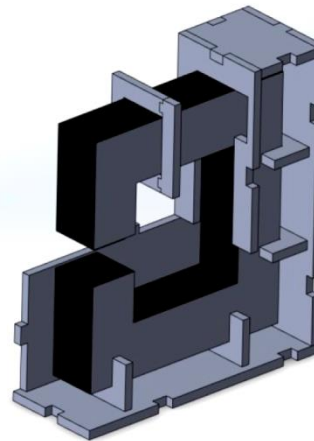
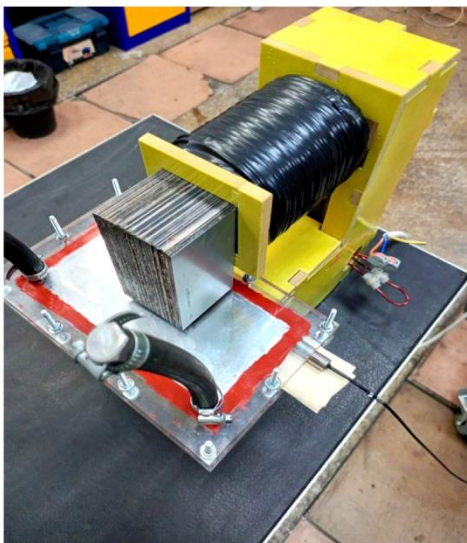


Рис. 2. Фото экспериментальной установки (слева); 3D-модель индуктора в разрезе экспериментальной установки (справа)

Особенностью бесконтактного измерения скорости течения является наличие частиц, способных отражать высокочастотные импульсы. Роль отражателей эха выполняют оксиды галлия, которые образуются в металле при контакте с воздухом в процессе заполнения кюветы. При этом избыточное количество оксидов является существенным препятствием для корректных измерений скорости. Основным требованием к успешным измерениям является отсутствие твердой фазы жидкого эвтектического сплава, который кристаллизуется при комнатной температуре. В эксперименте содержимое ячейки находилось в жидкой фазе.

Важным вопросом при проведении эксперимента является точность измерений. Точность измерения скорости с помощью УДА составляет ± 2 мм/с. Сила тока в индукторе измерялась с точностью до $\pm 0,5$ А. Для заданного значения силы тока индуктора можно измерить индукцию магнитного поля B . Измерения магнитного поля проводились при помощи трехканального гауссметра Lake Shore 460 в среднеквадратичном режиме работы. Датчик Холла, принцип работы которого основан на одноименном эффекте, был помещен в зазор между индуктором и кюветой.

3. Результаты и обсуждение

В результате измерений скорости течения жидкого металла с помощью датчиков УДА появляется двоичный файл с информацией о пространственно-временном распределении вертикальной компоненты скорости, которая направлена вдоль испускаемого луча. УДА получает значение вертикальной компоненты скорости и записывает его в файл через равные промежутки времени. Результаты серии измерений обрабатывались с использованием языка программирования Python, а также среды Matlab. Профиль скорости показывает наличие двухвихревого течения (рис. 3). Результаты показали, что в данном эксперименте скорость жидкости пульсирует. Среднеквадратичное отклонение пульсаций характеризуется вертикальными линиями на рис. 3. Можно заметить, что в центральной области кюветы пульсации скорости имеют большую величину, чем по краям кюветы.

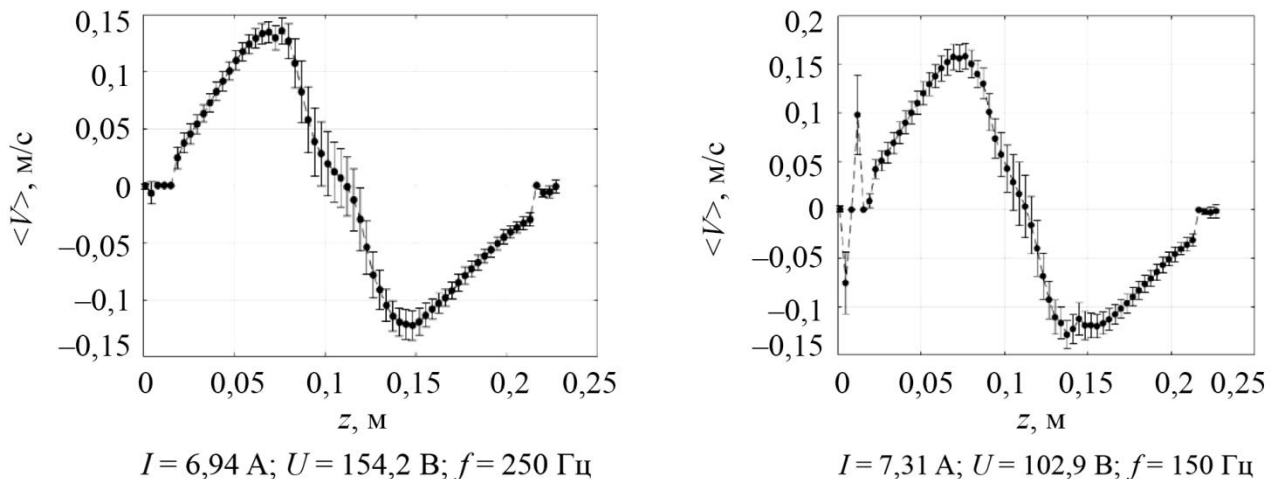


Рис. 3. Профили средней скорости вдоль пристеночного датчика УДА

На диаграммах (рис. 4) последовательно размещаются профили скорости вдоль заданного отрезка, полученные на каждом временном шаге. Такие профили строились только для компоненты скорости $V_z(x, 0, z)$. Выбор точек необходимо осуществлять исходя из принадлежности к линии, соответствующей линии измерения УДА.

На рис. 5 представлены развертки сигналов скорости вдоль пристеночного датчика УДА, взятые в трех точках, принадлежащих линии измерений УДА: $z = 0,075$ м, $z = 0,1$ м и $z = 0,15$ м. Можно заметить, что скорость в каждой из взятых точек разгоняется из состояния покоя с нулевой скоростью и выходит на стационарное значение примерно за 7–8 секунд. Затем система находится в стационарном состоянии примерно 20–30 секунд, о чем свидетельствуют небольшие пульсации скорости. При этом затухание скорости из стационарного состояния до нуля происходит примерно за 10–11 секунд.

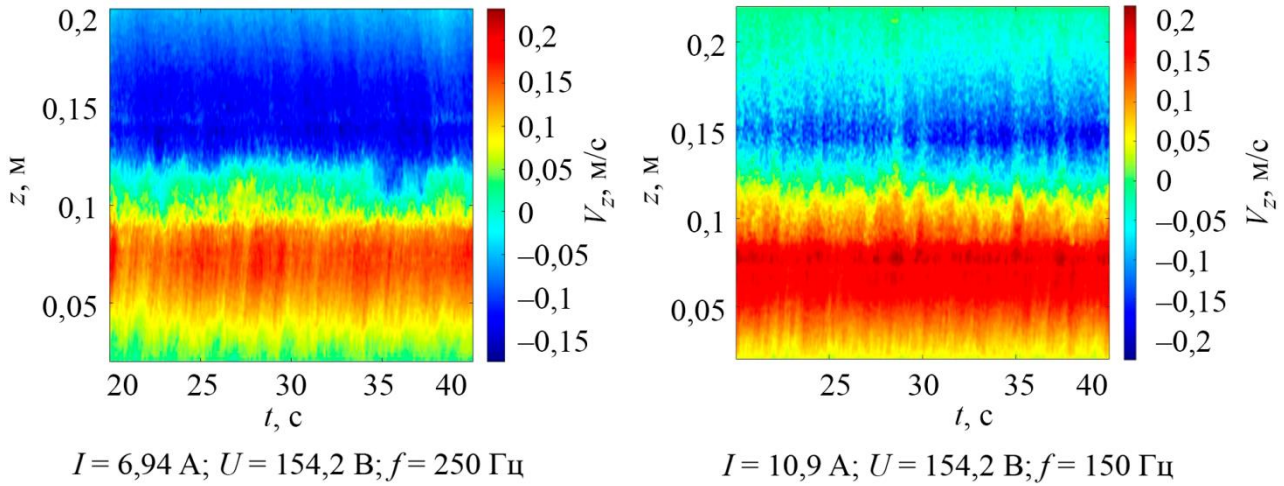


Рис. 4. Временные профили скорости вдоль пристеночного датчика УДА

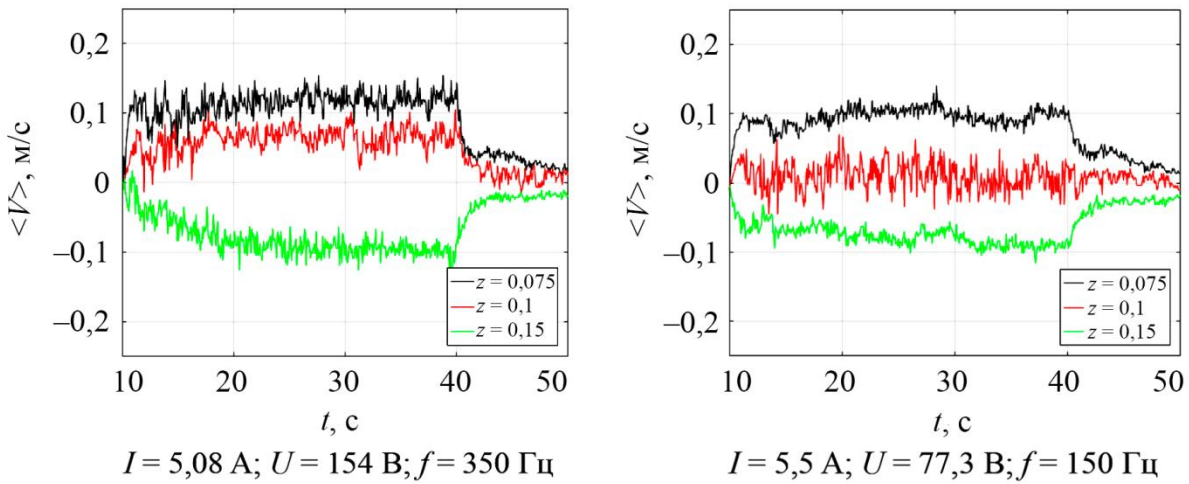


Рис. 5. Сигналы скорости в точках на профиле $z = 0,075; 0,1; 0,15$ м

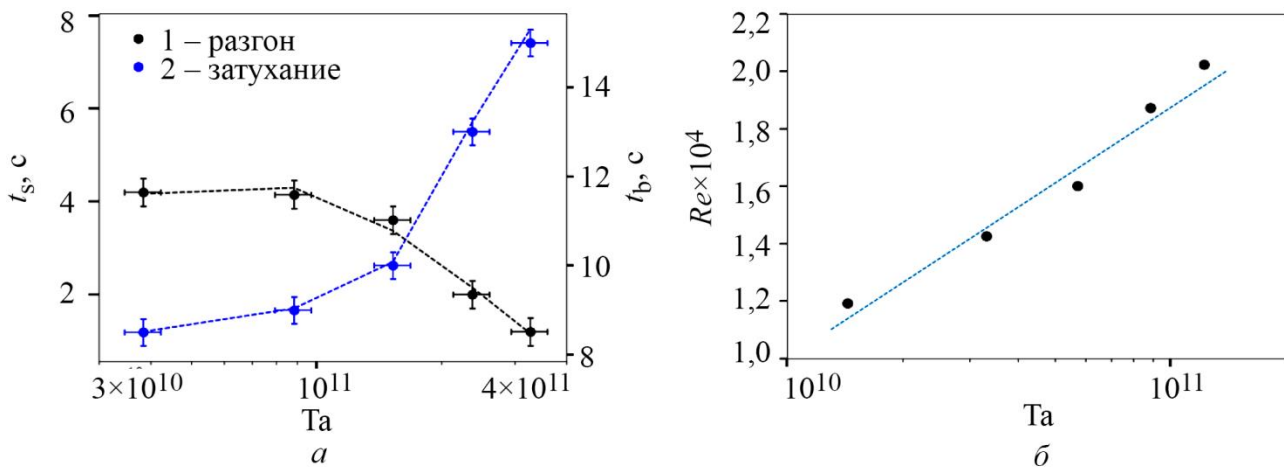


Рис. 6. Зависимость времени разгона и затухания течения от числа Тейлора (а); зависимость числа Рейнольдса от числа Тейлора (б)



Значение гидродинамического числа Рейнольдса $Re = V_z R / \nu$ рассчитывалось путем осреднения по части пространства, которое занимает крупномасштабный вихрь. Здесь V_z – значение вертикальной компоненты скорости, R – радиус одного крупномасштабного вихря, ν – кинематическая вязкость среды. Предполагается, что один вихрь занимает половину пространства кюветы и совершает вращательное движение по окружности радиуса $R = b/2$, где b – ширина кюветы.

Для оценки интенсивности воздействия электромагнитных сил вводится число Тейлора [18]: $Ta = \sigma f B^2 R^4 / (2\rho \nu^2)$, где σ – электропроводность среды; f – частота магнитного поля; B – магнитная индукция; ρ – плотность среды.

Переходный процесс в среде характеризуется не только временем разгона, но и скоростью среднего течения. Чем выше скорость течения, тем меньше время среда находится в зоне индуктора. Следовательно, в зоне разгона за время t_s должна сформироваться достаточно «заметная» для измерительного модуля структура [18]. На рис. 6 а показаны зависимости времени разгона t_s и затухания t_b от числа Тейлора, где 1 – разгон, 2 – затухание, а пунктирными линиями черного и синего цветов показаны аппроксимационные кривые. Точки соответствуют экспериментально полученным данным, погрешности указаны тонкими линиями с засечками соответствующих цветов. На рис. 6 б показана зависимость гидродинамического числа Рейнольдса от числа Тейлора.

4. Заключение

В работе изучены переходные неравновесные режимы вихревого течения в плоском слое жидкого металла. Течение вызвано действием электромагнитных сил, возникающих при взаимодействии переменного магнитного поля и индуцированного им электрического тока. Исследование проведено с помощью ультразвукового доплеровского анемометра для наиболее устойчивого варианта течения в виде двух крупномасштабных вихрей.

Измерения и анализ средних значений течения на равновесном участке показали, что течение наиболее интенсивно при большом значении частоты переменного магнитного поля. Получено, что изменение частоты тока при фиксированном токе оказывает большее влияние на изменение величины скорости течения, чем изменение значения силы тока в индукторе при фиксированной частоте.

Проведена оценка времени разгона и затухания течения при различных параметрах процесса. Развитие течения происходит в течение нескольких секунд. После этого течение приходит к установившемуся состоянию. Такой эффект свидетельствует о том, что питание на индуктор можно подавать короткими интервалами времени, этого будет достаточно для поддержания установившегося течения. Торможение, в свою очередь, происходит немного дольше, чем разгон. Так как в число Тейлора электропроводность среды входит в первой степени, можно сделать вывод, что при фиксированных параметрах индуктора времена разгона и торможения будут различаться для разных жидких металлов. При больших числах Тейлора времена разгона получаются порядка долей секунды, при этом времена торможения соответствуют нескольким десяткам секунд. Установлено, что зависимости имеют степенной характер. Результаты работы по экспериментальному изучению вихревого течения могут быть полезны для разработки бесконтактных устройств для перемешивания жидких металлов.

Благодарность

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 122030200191-9.



Литература

1. Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S. Vortical flow of conducting fluid driven by an alternating magnetic field in a plane channel // *Magnetohydrodynamics*. – 2007. – Vol. 43, No. 1. – P. 45–52. – DOI: 10.22364/mhd.43.1.5.
2. The impact of flow induced by rotating magnetic fields on processes in a molten conductive medium / R. I. Khalilov, A. D. Mamykin, R. S. Okatev, I. V. Kolesnichenko // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – Iss. 3. – P. 6–16. – DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.006-016. – URL: http://dream-journal.org/issues/2023-3/2023-3_396.html
3. Cramer A., Galindo V., Zennaro M. Frequency dependence of an alternating magnetic field driven flow // *Magnetohydrodynamics*. – 2015. – Vol. 51, No. 1. – P. 133–148. – DOI: 10.22364/mhd.51.1.13.
4. Contactless generation of cavitation in high temperature liquid metals and its impact on particle dispersion in solidified iron and steel samples / M. Sarma, I. Grants, T. Herrmannsdörfer, G. Gerbeth // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 291. – P. 117041. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117041.
5. Noncontact rotation, levitation, and acceleration of flowing liquid metal wires / Y. He, J. Tang, K. Kalantar-Zadeh, M. D. Dickey, X. Wang // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2022. – Vol. 119, No. 6 – P. e2117535119. – DOI: 10.1073/pnas.2117535119.
6. Nikulin I. L., Perminov A. V. Simulation of the averaged flow of a metal melt in an alternating magnetic field with variable amplitude and frequency // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2020. – Vol. 93, No. 3. – P. 556–566. – DOI: 10.1007/s10891-020-02153-0.
7. Moffatt H. K. Electromagnetic stirring // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. – 1991. – Vol. 3, iss. 5. – P. 1336–1343. – DOI: 10.1063/1.858062.
8. Analysis on the deflection angle of columnar dendrites of continuous casting steel billets under the influence of mold electromagnetic stirring / X. Wang, S. Wang, L. Zhang, S. Sridhar, A. Conejo, X. Liu // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. – 2016. – Vol. 47, No. 11. – P. 5496–5509. – DOI: 10.1007/s11661-016-3695-0.
9. Behavior of non-conducting particles in molten aluminium cast into electromagnetic molds / V. Timofeev, M. Pervukhin, E. Vinter, N. Sergeev // *Magnetohydrodynamics*. – 2020. – Vol. 56, No. 4. – P. 459–472. – DOI: 10.22364/mhd.56.4.10.
10. Динамика затопленного струйного течения в трубе в продольном магнитном поле / Я. И. Листратов, Н. Г. Разуванов, И. А. Беляев, Е. В. Свиридов // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 480–494. – DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.4.37.
11. Losev G, Kolesnichenko I. Structure of MHD vortex flows in a thin layer of liquid metal // *Magnetohydrodynamics*. – 2019. – Vol. 55, Nos. 1–2. – P. 97–105. – DOI: 10.22364/mhd.55.1-2.12.
12. Лосев Г. Л., Халилов Р. И., Колесниченко И. В. Экспериментальное исследование характеристик течения жидкого металла, вызванного переменным магнитным полем // *Вестник Пермского университета. Физика*. – 2017. – № 4 (38). – С. 11–18. – DOI: 10.17072/1994-3598-2017-4-11-18.
13. Thermophysical properties of the liquid Ga-Sn-Zn eutectic alloy / A. Dobosz, Yu Plevachuk, V. Sklyarchuk, B. Sokoliuk, T. Gancarz // *Fluid Phase Equilibria*. – 2018. – Vol. 465. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.fluid.2018.03.001.



14. Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry // *Flow measurement and instrumentation*. – 2020. – Vol. 75. – P. 101786. – DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101786.
15. Numerical and experimental investigation of electro-vortex flow in a cylindrical container / K. Liu, F. Stefani, N. Weber, T. Weier, B. W. Li // *Magnetohydrodynamics*. – 2020. – Vol. 56, No. 1. – P. 27–41. – DOI: 10.22364/mhd.56.1.3.
16. Combined measurement of velocity and temperature in liquid metal convection / T. Zürner, J. Schumacher, F. Schindler, T. Vogt, S. Eckert // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2019. – Vol. 876. – P. 1108–1128. – DOI: 10.1017/jfm.2019.556.
17. Investigations of electrically driven liquid metal flows using an ultrasound Doppler flow mapping system / S. Franke, D. Rübiger, V. Galindo, Y. Zhang, S. Eckert // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2016. – Vol. 48. – P. 64–73. – DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2015.09.004.
18. Начальная стадия формирования вихревого течения в индукторе с вращающимися встречно магнитными полями / В. С. Озерных, Г. Л. Лосев, Е. Голбрайх, И. В. Колесниченко // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2023. – Т. 16, № 4. – С. 493–503. – DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.4.41.