ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2026 • ФИЗИКА • Вып. 3

Избранные доклады Всероссийской конференции «Механика в новых материалах, конструкциях, технологиях», посвящённой 100-летию А. Н. Поздеева 25–27 марта 2026 г., ИМСС УрО РАН, г. Пермь

УДК 532:5, 537:84
PACS 47.27.nd, 47.65.−d

Влияние аспектного соотношения цилиндрического канала на течение жидкого металла под действием сжимающей электромагнитной силы

А. О. Полуянов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
poluyanov.a@icmm.ru

В работе проводится численное исследование внешнего обжимающего электромагнитного воздействия на жидкий металл, заполняющий цилиндрический канал. Математическая модель сформулирована на основе уравнений магнитной гидродинамики в электродинамическом приближении. Исследуются различные аспектные соотношения длины канала при его фиксированном радиусе. В работе электромагнитное воздействие определяется изменением частоты переменного тока. Результаты описывают локализацию крупномасштабных вихрей в пространстве канала при различном внешнем воздействии. Анализ результатов показал, что длина канала может существенным образом влиять на размер вихрей. Анализ полей и профилей скорости свидетельствует о явных отличиях течения в ядре и пристеночной области.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика; сжимающая электромагнитная сила; течение жидкого металла; замкнутый цилиндрический канал

Поступила в редакцию 03.06.2026; после рецензии 30.07.2026; принята к опубликованию 30.07.2026

Influence of the aspect ratio of a cylindrical channel on the liquid metal flow under the action of a compressive electromagnetic force

A. O. Poluyanov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia
poluyanov@icmm.ru

The paper presents a numerical study of the external electromagnetic compression effect on a liquid metal filling a cylindrical channel. The mathematical model is based on the equations of magnetic hydrodynamics in the electrodynamic approximation. The study explores various aspect ratios of the channel length, with the radius fixed. The electromagnetic effect is determined by changing the frequency of the alternating current. The results describe the localization of large-scale vortices in the channel space under different external conditions. The analysis of the results shows that the length of the channel can significantly affect the size of the vortices. The analysis of velocity fields and profiles shows clear differences in the flow in the core and near-wall regions.

Keywords: magnetohydrodynamics; compressive electromagnetic force; liquid metal flow; closed cylindrical channel

Received 03 June 2026; revised 30 July 2026; accepted 30 July 2026

doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-15-22

© Полуянов А. О., 2026

распространяется на условиях лицензии
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

1. Введение

Генерация течений жидких металлов с помощью электромагнитного воздействия на электропроводящие частицы этих сред длительное время широко применяется в производственных процессах металлургии [1] и атомной энергетике [2]. В производственных процессах часто встречаются элементы жидкометаллических магнитогидродинамических устройств, в которых рабочая среда – жидкий металл – протекает в цилиндрическом канале (или ячейке), с наложенным внешним переменным магнитным полем. Описанная конфигурация встречается в индукционных печах [3–5], электромагнитных насосах [6–8] и перемешивателях [9, 10].

В предыдущих работах были получены пульсационные характеристики двухтороидального течения [11], а также проведена валидация математической модели [12]. Однако исследования проводились для одного и того же аспектного соотношения. Анализ результатов показал, что длина канала может влиять на размер вихрей. Очевидно, что если аспектное соотношение мало (короткий канал), то размер вихря будет определяться не длиной, а радиусом канала. В данном случае форма и размер вихрей будет полностью определяться формой канала. При этом остался открытым вопрос: до какого аспектного соотношения будет сохраняться это влияние?

2. Постановка задачи

Целью работы является оценка влияния аспектного соотношения цилиндрического канала на течение жидкого металла под действием локализованной сжимающей электромагнитной силы. Цилиндрическая ячейка 1 (рис. 1) заполнена электропроводящей средой. В качестве электропроводящей среды используется эвтектический галлиевый сплав (GaSnZn), свойства которого были подробно описаны в работе [13]. В середине ячейки, соосно с ней, располагается индуктор 2.

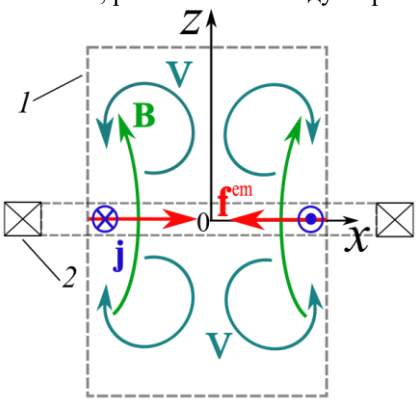


Рис. 1. *Схема постановки задачи*

Индуктор состоит из короткого соленоида, генерирующего переменное магнитное поле. Это поле индуцирует вихревой ток **j** в жидком металле (синие стрелки в плоскости, перпендикулярной плоскости рис. 1). Вихревой ток **j** генерирует собственное магнитное поле. Результирующее магнитное поле **B** (зелёные стрелки) является суперпозицией двух полей. Электромагнитная сила $\mathbf{f}^{\text{em}}$ (красные стрелки), действующая на частицы проводящей среды, возникает при взаимодействии электрического тока **j** и результирующего магнитного поля **B**.

Взаимодействие магнитного поля и движущегося жидкого металла можно оценить с помощью магнитного числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_m = \sigma\delta\mu\mu_0 U$, где σ – электропроводность, δ – величина скин-слоя, μ – магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная постоянная, а U – характерная скорость течения. Оценки магнитного числа Рейнольдса показали, что $\mathrm{Re}_m \approx 10^{-4} - 10^{-3}$. Малость магнитного числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_m \ll 1$ позволяет использовать безындукционное приближение [14, 15] и по отдельности решать электродинамическую и гидродинамическую части задачи. Расчёты проводятся для изотермического случая, так как величина индуцированного электрического тока в среде невелика, и Джоулевым теплом можно пренебречь [16].

Течение жидкого металла описывается системой МГД-уравнений для несжимаемой жидкости [17]:

$$\nabla\times\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{j} + \mathbf{j}_c, \nabla\times\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}, \tag{1}$$

$$\nabla\cdot\mathbf{B} = 0, \quad \nabla\cdot\mathbf{E} = 0, \tag{2}$$

$$\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}, \tag{3}$$

$$\mathbf{f}^{\text{em}} = \mathbf{j}\times\mathbf{B}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial\mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\cdot\nabla)\mathbf{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \\ +\nabla\cdot\left[(\nu+\nu_T)(\nabla\mathbf{V} + \mathbf{V}\nabla)\right] + \frac{1}{\rho}\mathbf{f}^{em}, \tag{5}$$

$$\nabla\cdot\mathbf{V} = 0, \tag{6}$$

где **V** – скорость течения жидкого металла, **j** – ток в среде, $\mathbf{j}_c$ – ток в индукторе, **E** – напряженность электрического поля, ρ – плотность, p – давление, ν – кинематическая вязкость.

Ввиду того, что с увеличением длины канала с замкнутыми границами влияние его торцов полагается малым для длинных каналов, в задаче будет рассмотрена замкнутая цилиндрическая ячейка. Граничные условия задачи электродинамики: на

границе области с жидким металлом $j_n = 0$. Граничные условия задачи гидродинамики: на торцах ячейки и её боковой поверхности задано условие прилипания $\mathbf{V} = 0$.

Решение электродинамической части задачи проводилось в пакете ANSYS Emag. Решение гидродинамической части задачи проводилось в пакете ANSYS Fluent методом контрольных объёмов с подключением пользовательских функций UDF, написанных на языке C, и используются для переноса найденных электромагнитных сил на гидродинамическую сетку, а также для постобработки. Шаг по времени составлял 0.1 сек. Для интенсивных течений, генерируемых высокочастотным переменным магнитным полем, чтобы учесть турбулентность и турбулентную вязкость ν_T, был использован подход моделирования крупных вихрей (LES) [18]. Для подсеточного замыкания использовалась модель Смагоринского с константой Cs=0.1 [19].

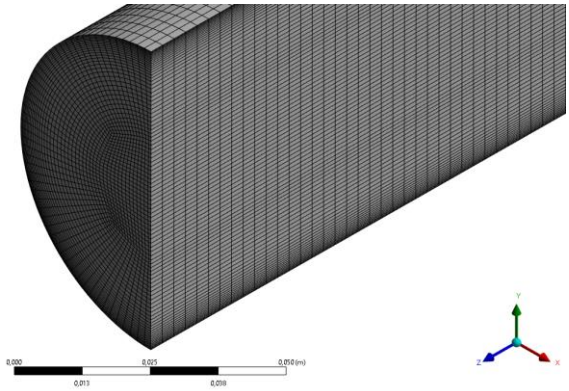


Рис. 2. *Пример расчётной сетки для канала с аспектным соотношением* $\Gamma_2 = 14.7$

На рисунке 2 представлена часть расчётной сетки гидродинамической части задачи. Сетка однородна вдоль оси канала *Z*, неоднородна по радиусу и сгущалась по направлению к стенкам канала. Характерный размер сетки по длине канала – 0.003 м, а по радиусу 0.001 м число узлов составляло 93000. Характерные размеры сетки были выбраны с учётом предварительных расчётов сеточной сходимости.

Геометрические размеры канала: радиус $R = 0.034$ м, аспектное соотношение, определяемое как отношение длины канала к его радиусу, $\Gamma_i = L_i / R$, при $L_1 = 0.04$ м, $L_2 = 0.2$ м, $L_3 = 0.5$ м, $L_4 = 1$ м, были следующие: $\Gamma_1 = 1.2$, $\Gamma_2 = 5.9$, $\Gamma_3 = 14.7$, $\Gamma_4 = 29.4$. Геометрические размеры индуктора: высота $H = 0.02$ м, внешний и внутренний радиусы $R_1 = 0.138$ м, и $R_2 = 0.038$ м. Индуктор подключён к источнику переменного тока. При решении задачи электродинамики, частоты тока задавались следующими: f = 50, 1000, 5000 Гц.

3. Результаты

С увеличением частоты переменного тока f увеличивается величина электромагнитной силы, действующей на жидкий металл. Поэтому течение жидкого металла в канале развивается быстрее, становится более интенсивным, увеличивается средняя скорость и полная кинетическая энергия. Однако для различных аспектных соотношений канала важным фактором является размер генерируемых крупномасштабных вихрей, которые наблюдаются на картинах средних течений.

Размер крупномасштабных вихрей, отчётливо видимых на рис. 3, можно оценить следующим образом. Если принять во внимание то, что один вихрь занимает область, близкую по форме к окружности радиусом, совпадающим с радиусом канала *R*, то сверху и снизу от индуктора каждый такой вихрь будет совершать оборот по окружности длиной $L_в = 2\pi R = 0.214$ м, что совпадает с областью на рис. 3. Оценки показали, что для аспектного соотношения $\Gamma_3 = 14.7$ ($L = 0.5$ м) минимальный период оборота вихря составляет $T_в = L_в / V_{\max} = 2.7$ с, где за $V_{\max}$ при оценке было взято значение скорости 0.08 м/с на частоте тока f = 1000 Гц. И, исходя из того, что полное время расчёта составляло $T_{теч} = 500$ с физического времени, вихрь совершил ≈ 185 оборотов. Такое количество оборотов является достаточным для того, чтобы полная кинетическая энергия вышла на стационарное значение.

Для расчётов на низкой частоте тока (f = 50 Гц) представленных на рис. 3, максимальное значение скорости для оценки времени оборота вихря становится на порядок меньше и составляет 0.008 м/с. Увеличение времени оборота вихря привело к необходимости увеличения физического времени полного расчёта до 1000 с. За это время вихрь совершает около 37 оборотов. Для аспектного соотношения $\Gamma_1 = 1.2$ (рис. 3, *a*) размер вихрей определяется уже не радиусом канала, а его длиной. Вихрь вращается по окружности радиусом, совпадающим с половиной длины канала $L_1 / 2$, и, таким образом, длина окружности будет $L_в = \pi L_1 = 0.125$ м, что меньше в 1.7 раза, чем для аспектных соотношений $\Gamma > \Gamma_2$. Для удобства сравнения размеров крупномасштабных вихрей для аспектных соотношений $\Gamma_2 - \Gamma_4$ были построены одинаковые области. Поля скорости для аспектных соотношений Γ_3 и Γ_4 были построены в диапазоне длины канала $L \in [-0.1, 0.1]$ м. Цветовой шкалой на рис. 3 показано амплитудное значение скорости, стрелками чёрного цвета показано направление течения, а штриховкой обозначается область индуктора.

Пульсации течения в вертикальной плоскости *ZX* представлены на рис. 3, *б, е–з*. Характер пульсаций имеет схожий вид для аспектных соотношений $\Gamma > 5.9$, при котором максимальные пульсации расположены вблизи локализованного индуктора, и распространяются вверх и вниз на расстояние 0.06–0.07 м. Вся остальная часть объёма жидкого металла пульсирует намного слабее. При этом величина пульсаций составляет около 60% от средней скорости течения.

Для того, чтобы более детально отразить структуру скорости, помимо её усреднённых полей были построены диаграммы профилей вертикальной компоненты скорости V_z Подробный способ построения диаграмм описывается в работе [11]. Диаграммы строились вдоль двух прямых, расположенных вдоль оси канала ($x = 0$, $y = 0$) м (рис. 4, *а*, *в*) и в области вдоль стенки ($x = 0.027$, $y = 0$) м (рис. 4, б, г) и помогают оценить уровень пульсаций скорости и их локализацию в канале.

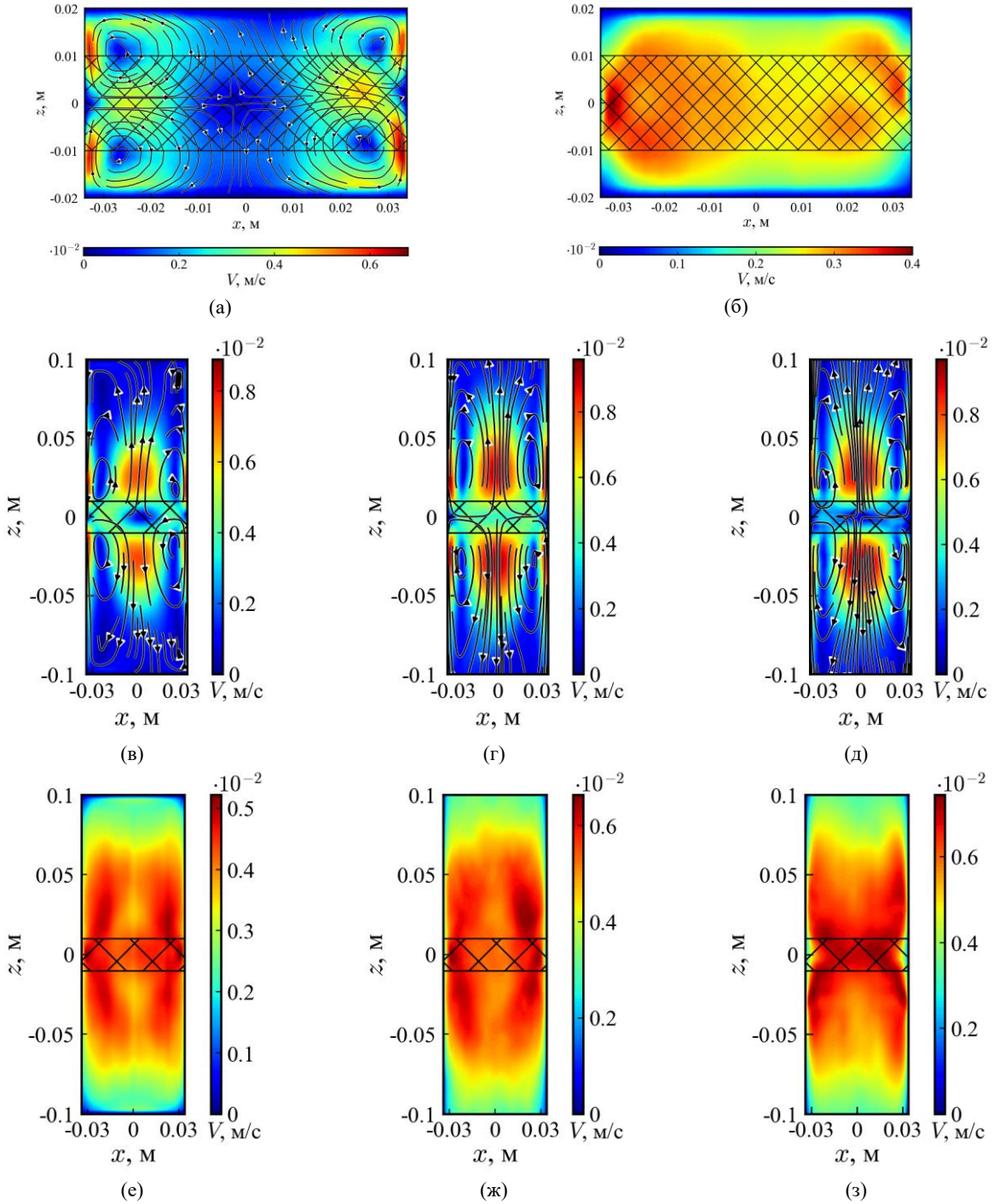


Рис. 3. У*средненные по времени поля скорости в вертикальном сечении ZX для аспектных соотношений* Γ_1*=1.2 (а),* Γ_2*=5.9 (в),* Γ_3*=14.7 (г),* Γ_4*=29.4 (д) и соответствующие им поля пульсаций (б, е-з)*

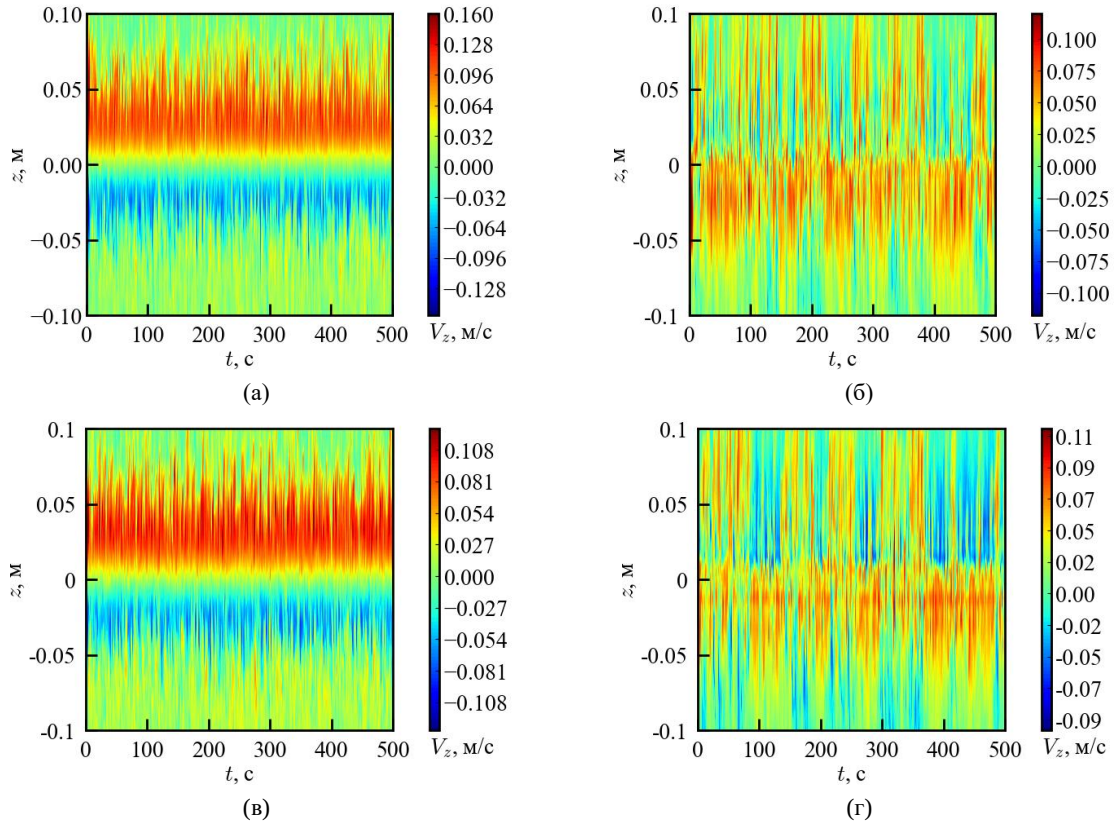


Рис. 4. *Диаграммы осевых (а, в) и пристеночных (б, г) профилей вертикальной компоненты скорости* V_z *для аспектных соотношений* Γ_3 *(а, б) и* Γ_4 *(в, г)*

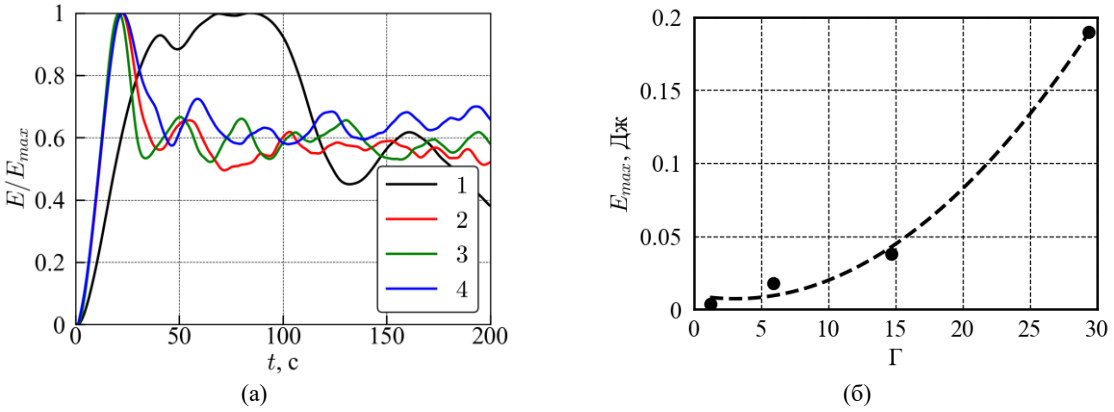
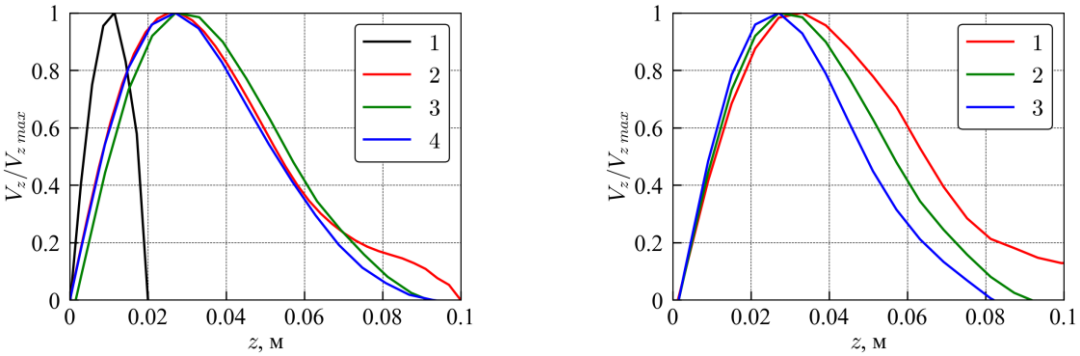


Рис. 5. *Зависимость энергии от времени, кривые 1–4 соответствуют аспектному соотношению* $\Gamma_1 - \Gamma_4$ *(а), зависимость энергии от аспектного соотношения канала (б)*

Заметно, что интенсивность пульсаций сильно уменьшается по направлению к торам канала для осевых профилей. Пульсации меняют направление с периодичностью около 50 с. Диаграммы были получены для расчётов на частоте тока $f = 5000$ Гц.

Важной интегральной характеристикой, позволяющей оценить развитие и характер течения, является полная кинетическая энергия. Анализ трёхмерных полей скорости и их двумерных проекций на осевые плоскости показал, что в исследуемом диапазоне параметров частоты и аспектного соотношения, течение можно разделить на два этапа. На первом этапе происходит развитие течения, сопровождающееся ростом кинетической энергии до некоторого максимального значения и формирование двух крупномасштабных тороидальных структур. При этом достижение кинетической энергии максимального значения сопровождается распадом вихрей. На втором этапе энергия выходит на стационарное состояние, при котором вихри формируются повторно, и режим течения становится колебательным [11].

На рис. 5, *а* представлены графики отношения энергии к максимальному значению от времени для каждого аспектного соотношения. Стоит отме-



(а) (б)

Рис. 6. *Усреднённые по времени осевые профили скорости. Кривые 1–4 соответствуют аспектным соотношениям* $\Gamma_1 - \Gamma_4$ *для частоты тока* $f = 1000$ *Гц (а), для аспектного соотношения* Γ_3 *для частот тока* $f = 50$ *Гц – 1,* $f = 1000$ *Гц – 2,* $f = 5000$ *Гц – 3 (б)*

тить, что для аспектных соотношений $\Gamma > 5.9$ (кривые 2–4) фаза развития течения занимает от 0 до 20 сек, при этом, для аспектного соотношения $\Gamma_1 = 1.2$ (кривая 1) фаза развития течения занимает от 0 до 75 сек. После достижения энергии своего максимума происходит постепенное спадание энергии примерно на 40% для каждого аспектного соотношения.

На рисунке 5, *б* представлена зависимость максимальной кинетической энергии от аспектного соотношения. При фиксированной частоте тока $f = 1000$ Гц максимальная энергия растёт вместе с ростом аспектного соотношения, а зависимость имеет степенной характер. Полученный вид зависимости может быть обусловлен тем, что в канале находится больше жидкости, и, соответственно, больший объем жидкости приводится в движение, даже несмотря на то, что в среднем скорости остаются близки.

В дополнении к диаграммам профилей скорости были построены средние профили скорости вдоль оси канала (рис. 6). Усреднение проводилось по времени и была проведена нормировка по максимальному значению скорости для каждого аспектного соотношения. Рис. 6, *а* помогает оценить влияние аспектного соотношения на двухтороидальное течение на частоте $f = 1000$ Гц. Явное отличие имеет профиль скорости для Γ_1, в то время как остальные профили довольно близки между собой. Рисунок 6, *б* позволяет оценить влияние частоты тока на течение для аспектного соотношения Γ_3. С увеличением частоты переменного тока уменьшается толщина скин-слоя, в котором локализуется электромагнитная сила, действующая на жидкий металл. Это проявляется в локализации вихря в средней части канала с увеличением частоты переменного тока.

4. Заключение

По результатам численного моделирования было выявлено, что во всем рассмотренном диапазоне аспектных соотношений и частот переменного тока среднее течение имеет форму двух крупномасштабных торов. Размер крупномасштабных вихрей среднего течения примерно одинаков для аспектных соотношений $\Gamma > 5.9$, а увеличение аспектного соотношения при фиксированном радиусе канала не приводит к увеличению размера вихря. Таким образом, для аспектных соотношений, начиная с Γ_2, будет сохраняться оправданность выбора радиуса в качестве определяющего размера. При этом частота тока существенным образом влияет на течение для любых аспектных соотношений.

Обнаружено, что в коротких каналах при $\Gamma < 5.9$ максимум кинетической энергии и её полоидальной и азимутальной компонент совпадает с моментом распада вихрей при достижении торцов канала при движении к ним из области индуктора. В то время как для аспектных соотношений $\Gamma > 5.9$ торцы не влияют на распад вихрей и достижение максимума кинетической энергии.

Дополнительно выявлена особенность, при которой на низких частотах тока для установления среднего течения в форме двух торов необходимо большее время расчёта. Это обусловлено тем, что крупномасштабные вихри на малых частотах вращаются медленнее, с меньшей скоростью.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМСС УрО РАН, регистрационный номер темы 122030200191-9.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в постановке задачи, интерпретации результатов и подготовке статьи научному руководителю, доктору физико-математических наук, заведующему лабораторией технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН, Колесниченко Илье Владимировичу.

Список литературы

1. *Повх И. Л., Капуста А. Б., Чекин Б. В.* Магнитная гидродинамика в металлургии // М.: Металлургия, 1974. 240 с.
2. *Архипов В. М.* Техника работы с натрием на АЭС // М.: Энергоатомиздат, 1986. 133 с.

3. *Tarapore E. D., Evans J. W.* Fluid velocities in induction melting furnaces: Part I. Theory and laboratory experiments // Metallurgical Transactions B. 1976. Vol. 7. P. 343–351. DOI: 10.1007/BF02652704
4. *Stiller J., Koal K., Nagel W. E., Pal J., Cramer A.* Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields // The European Physical Journal Special Topics. 2013. Vol. 220. P. 111–122. DOI: 10.1140/epjst/e2013-01801-8
5. *Perminov A. V., Nikulin I. L.* Mathematical model of the processes of heat and mass transfer and diffusion of the magnetic field in an induction furnace // Journal of Engineering Physics and Termophysics. 2016. Vol. 89, № 2. P. 397–409. DOI: 10.1007/s10891-016-1389-5
6. *Timofeev V., Pervukhin M., Vinter E., Sergeev N.* Behavior of non-conducting particles in molten aluminium cast into electromagnetic molds // Magnetohydrodynamics. 2020. Vol. 56, № 4. P. 459–472. DOI: 10.22364/mhd.56.4.10
7. *Wang X., Wang S., Zhang L., Sridhar S., Conejo A., 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. 2016. Vol. 47. P. 5496–5509. DOI: 10.1007/s11661-016-3695-0
8. *Колесниченко И. В., Халилов Р. И.* Экстремум зависимости напора электромагнитного насоса для жидкого металла от частоты питающего тока // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. Т. 15, № 4. С. 495–506. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.4.38
9. *Moffatt H. K.* Electromagnetic stirring // Physics of Fluids. 1991. Vol. 3. P. 1336–1343. DOI: 10.1063/1.858062
10. *Poitout S., Branco P.* Theoretical modeling and experimental tests of an electromagnetic fluid transportation system driven by a linear induction motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2006. Vol. 42. N. 49. P. 2133–2151. DOI: 10.1109/TMAG.2006.880396
11. *Полуянов А. О., Колесниченко И. В.* Пульсации течения жидкого металла, генерируемые переменным магнитным полем // Вычислительная механика сплошных сред. 2024. Т. 17, № 1. С. 24–32. DOI: 10.7242/1999-6691/2024.17.1.3
12. *Poluyanov A. O., Kolesnichenko I. V.* Unsteady fluctuations of a liquid metal flow in a closed volume inside an alternating magnetic field // Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics. 2025. Vol. 89, № 7. P. 1135–1140. DOI: 10.1134/S1062873825711821
13. *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
14. *Davidson P. A.* An Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 431 p.
15. *Shcherbinin E.* Induction-free approximation in the theory of electrovortex flows // Magnetohydrodynamics. 1991. Vol. 27, № 3. P. 308–311.
16. *Poluyanov A. O., Kolesnichenko I. V.* Experimental study of liquid metal flow for the development of a contact-less control technique // Fluid Dynamics and Materials Processing. 2024. Vol. 20, № 7. P. 1553–1564. DOI: 10.32604/fdmp.2024.050165
17. *Брановер Г. Г., Цинобер, А. Б.* Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. М.: Наука, 1970. 380 с.
18. *Sagaut P.* Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction. Berlin: Springer, 2001. 319 p.
19. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91, № 3. P. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2

References

1. Povkh I. L., Kapusta A. B., Chekin B. V. *Magnitnaia gidrodinamika v metallurgii* [Magnetic hydrodynamics in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 240 p (In Russian).
2. Arkhipov V. M. *Tekhnika raboty s natriem na AES* [Sodium Handling Techniques at Nuclear Power Plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 133 p. (In Russian).
3. Tarapore E. D., Evans J. W. Fluid velocities in induction melting furnaces: Part I. Theory and laboratory experiments. *Metallurgical Transactions B*, 1976, vol. 7, pp. 343–351. DOI: 10.1007/BF02652704
4. Stiller J., Koal K., Nagel W. E., Pal J., Cramer A. Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, vol. 220, pp. 111–122. DOI: 10.1140/epjst/e2013-01801-8
5. Perminov A. V., Nikulin I. L. Mathematical model of the processes of heat and mass transfer and diffusion of the magnetic field in an induction furnace. *Journal of Engineering Physics and Termophysics*, 2016, vol. 89, no. 2, pp. 397–409. DOI: 10.1007/s10891-016-1389-5
6. Timofeev V., Pervukhin M., Vinter E., Sergeev N. Behavior of non-conducting particles in molten aluminium cast into electromagnetic molds. *Magnetohydrodynamics*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 459–472. DOI: 10.22364/mhd.56.4.10
7. Wang X., Wang S., Zhang L., Sridhar S., Conejo A., 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*, 2016, vol. 47, pp. 5496–5509. DOI: 10.1007/s11661-016-3695-0
8. Kolesnichenko I. V., Khalilov R. I. Extremum in the dependence of the head generated by electromagnetic pump of liquid metal on feeding current frequency. *Computational Continuum Mechanics*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 495–506. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.4.38
9. Moffatt H. K. Electromagnetic stirring. *Physics of Fluids*, 1991, vol. 3, pp. 1336–1343. DOI: 10.1063/1.858062
10. Poitout S., Branco P. Theoretical modeling and experimental tests of an electromagnetic fluid transportation system driven by a linear induction motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 49, pp. 2133–2151. DOI: 10.1109/TMAG.2006.880396
11. Poluyanov A. O., Kolesnichenko I. V. Pulsations of the liquid metal flow generated by an alternating magnetic field. *Computational Continuum Mechanics*, 2024, vol. 17, no. 1, pp. 24–32. DOI: 10.7242/1999-6691/2024.17.1.3
12. Poluyanov A. O., Kolesnichenko I. V. Unsteady fluctuations of a liquid metal flow in a closed volume inside an alternating magnetic field. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2025, vol. 89, no. 7, pp. 1135–1140. DOI: 10.1134/S1062873825711821
13. 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
14. Davidson P. A. *An introduction to magnetohydrodynamics.* Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 431 p.
15. Shcherbinin E. Induction-free approximation in the theory of electrovortex flows. *Magnetohydrodynamics*, 1991, vol. 27, no. 3, pp. 308–311.
16. Poluyanov A. O., Kolesnichenko I. V. Experimental study of liquid metal flow for the development of a contact-less control technique. *Fluid Dynamics and Materials Processing*, 2024, vol. 20, no. 7, pp. 1553–1564.
DOI: 10.32604/fdmp.2024.050165
17. Branover G. G., Tsinober A. B. *Magnitnaia gidrodinamika neszhimaemykh sred* [Magnetic Hydrodynamics of Incompressible Media]. Moscow: Nauka, 1970, 380 p. (In Russian).
18. Sagaut P. *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction*. Berlin: Springer, 2001, 319 p.
19. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 1963, vol. 91, no. 3, pp. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Полуянов А. О. Влияние аспектного соотношения цилиндрического канала на течение жидкого металла под действием сжимающей электромагнитной силы // Вестник Пермского университета. Физика. 2026. № 3. С. 15–22. doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-15-22

Please cite this article in English as:
Poluyanov A. O. Influence of the aspect ratio of a cylindrical channel on the liquid metal flow under the action of a compressive electromagnetic force. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2026, no. 3, pp. 15–22. doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-15-22

Сведения об авторах
Александр Олегович Полуянов, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королёва, 1, Пермь, 614013

Author information
Aleksandr O. Poluyanov, Junior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Koroleva st., Perm, 614013, Russia