

УДК 537.84
PACS 01.50.Pa

Особенности турбулентности в электромагнитном перемешивателе жидкого металла

А. Д. Мамыкин

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
mad@icmm.ru

Кондукционные датчики скорости успешно применены для изучения характеристик турбулентных течений жидкого металла, возникающих под действием вращающегося магнитного поля в вертикальном цилиндре. При определенной величине электромагнитного воздействия на графиках спектральной энергии пульсаций скорости наблюдается наклон « $-5/3$ », свидетельствующий о развитой однородной изотропной турбулентности и распространяющийся в частотном диапазоне до двух декад. Уровень пульсаций скорости варьируется в пределах от 4 до 10 % от значения азимутальной скорости вращения. Показано, что выделенные пики на спектрах пульсации скорости соответствуют частоте вращения жидкого металла вокруг оси цилиндра. Получен нелинейный график зависимости частоты вращения жидкого металла от частоты тока в катушках с максимумом вблизи 50–75 Гц.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика; турбулентность; кондукционные датчики скорости; вращающееся магнитное поле; электромагнитное перемешивание

Поступила в редакцию 18.09.2023; после рецензии 26.10.2023; принята к опубликованию 01.11.2023

Features of turbulence in an electromagnetic liquid metal stirrer

A. D. Mamykin

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

In the research work, conduction velocity sensors were successfully used to study the characteristics of turbulent flows arising in a liquid metal under the action of a rotating magnetic field in a vertical cylinder. At a certain magnitude of electromagnetic influence, on the graphs showing spectral energy of velocity pulsations there is observed a slope of ‘ $-5/3$ ’, indicating developed homogeneous isotropic turbulence and spreading in a frequency range of up to two decades. The level of velocity pulsations varies from 4 to 10 % of the azimuthal rotation velocity. It is shown that the identified peaks in the velocity pulsation spectra correspond to the frequency of the liquid metal rotation around the cylinder axis. A nonlinear graph of the dependence of the liquid metal rotation frequency on the current frequency in the coils with a maximum near 50–75 Hz was obtained.

Keywords: magnetohydrodynamics; turbulence; conduction velocity sensors; rotating magnetic field; electromagnetic stirring

Received 18 September 2023; revised 26 October 2023; accepted 01 November 2023

doi: 10.17072/1994-3598-2023-4-62-68

1. Введение

В наши дни металлургическая и атомная промышленность не обходятся без наукоёмких электромагнитных аппаратов – технологических устройств, создающих движение электропроводной среды бесконтактным способом за счет действия электромагнитной силы. Это электромагнитные насосы, дроссели, расходомеры, перемешиватели и др. В таких МГД-машинах течение, например, жидкого металла вызывается действием интенсивных электромагнитных полей. Для проработки конструкций и режимов работы этих машин требуется знать структуру и поведение со временем возникающих течений. Такую информацию для конкретной электропроводной среды можно получить с помощью численного моделирования [1–3]. Однако такие течения зачастую характеризуются высокими значениями числа Рейнольдса, означая, что при численном моделировании необходимо использовать модели турбулентности. Для корректной работы той или иной модели турбулентности требуется задать некоторые параметры, например, уровень турбулентных пульсаций относительно среднего течения, которые достоверно можно получить только из лабораторного эксперимента. Для этого нужно измерить ту или иную компоненту скорости потока жидкого металла локально и с высокой частотой. С первой задачей в случае низкотемпературных сплавов (например, галлий-цинк-олово) хорошо справляется ультразвуковой доплеровский анемометр [4–6]. Вместе с тем, он не может осуществить высокоскоростные измерения он не может, поскольку частота его работы ограничена 3 Гц.

Подходящим инструментом для таких измерений является кондукционный датчик скорости (КДС), который позволяет измерять пульсации скорости с частотой, ограниченной лишь частотой дискретизации измерительной платы (а точнее половиной этого значения). Возможность его применения в присутствии сильных внешних электромагнитных полей была показана в статьях [7, 8].

В данной работе поставлена задача определения турбулентных характеристик на примере течения, возникающего в МГД-перемешивателе «Топаз» – устройстве, используемом для бесконтактного перемешивания расплавленного металла [9, 10]. Такие аппараты применяются для улучшения качества металлов и их сплавов при литье в промышленных условиях, а именно, для получения большей степени гомогенизации при добавлении легирующих добавок, повышения однородности мелкозернистой кристаллической структуры, уплотнения фронта кристаллизации, улучшения структуры металла вблизи границ, а также устранения усадочной впадины в центре слитка [11–13].

Турбулентный характер течения существенно влияет на процесс перемешивания, поэтому знание характеристик мелкомасштабной турбулентности

необходимо для проектирования и численного моделирования подобных устройств. Последнее, помимо прочего, позволит рассчитать оптимальные режимы перемешивания, которые затем можно воспроизводить в эксперименте путём перекоммутации обмоток перемешивателя «Топаз» или реализации модуляции их питания.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из цилиндра с жидким металлом, помещённого внутрь электромагнитного перемешивателя «Топаз». Последний представляет собой набор обмоток, размещённых на ферромагнитном сердечнике сложной формы, который окружает цилиндрическую область диаметром 170 мм и высотой 340 мм (рис.1). Каждая обмотка подключена к системе управления, которая позволяет оперативно менять конфигурацию переменного магнитного поля в области ячейки. Это позволяет реализовать не только бегущее и вращающееся магнитные поля, но и более сложные конфигурации. Данный аппарат имеет габаритные размеры: ширина 500 мм и высота 400 мм и является разборным, так как состоит из секций. Такая конструкция дает возможность интегрировать индуктор в существующие производственные процессы и аппараты без необходимости модернизации и даже остановки их работы.

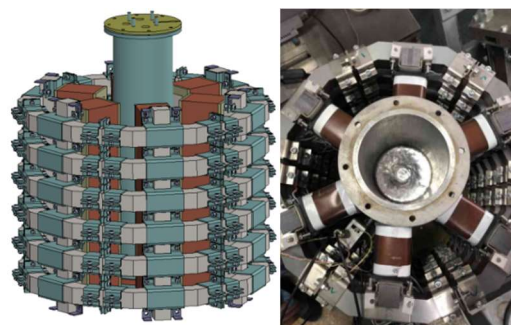


Рис. 1. 3D модель и фотография экспериментальной установки

Экспериментальная ячейка (рис. 2) состоит из цилиндра из нержавеющей стали 1 (толщина стенки 5 мм) со сплавом $Ga_{86.3}Zn_{10.8}Sn_{2.9}$ (вес. %) 2 внутри, ограниченным сверху подвижной крышкой 3. Внутренний диаметр цилиндра – 98 мм, высота до подвижной крышки – 300 мм. Внутрь цилиндра через уплотнительные шлюзы на одинаковую длину введены три кондукционных датчика скорости 4. Они располагаются на одной угловой координате φ с равным шагом, равным 100 мм вдоль координаты z и обозначаются снизу вверх как КДС № 1, 2 и 3. Физические свойства среды при рабочей температуре 25 °С: плотность $\rho = 6150 \text{ кг/м}^3$, коэффициент объёмного теплового расширения $\beta = 9.63 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, кинематическая вязкость $\nu = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, электропроводность $\sigma = 2.6 \cdot 10^6 \text{ См/м}$.

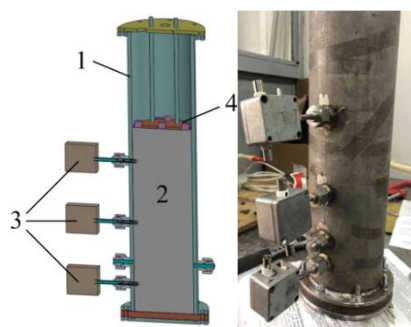


Рис. 2. 3D модель и фотография экспериментальной ячейки

Питание перемешивателя осуществляется с помощью частотного преобразователя Hyundai N700E-110HF/150HFP в режиме вращающегося магнитного поля. В данном режиме на каждом из шести колец индуктора реализуется бегущее по кругу магнитное поле, создающее направленную тангенциально объёмную силу. Под действием этой силы в полости ожидается реализация квазитвердотельного азимутального вращения жидкого металла. Квазитвердотельным будем называть такое вращение, при котором градиенты угловой скорости жидкости по всем координатам могут быть не равны нулю и имеют малые значения. Такое течение, в отличие от твердотельного, может быть турбулентным. Такой прогноз относительно того, что вращение не полностью твердотельное, основан на том, что распределение магнитного поля, а, следовательно, и толкающей силы, по высоте цилиндра сильно неоднородно. Оно имеет максимумы на высотах, соответствующих положениям колец индукторов. Распределение компонент магнитного поля в пространстве подробно изучено в работе [9].

3. Методы

При достаточной величине электромагнитного воздействия, создаваемого перемешивателем, в цилиндрическом объёме жидкого металла возникают турбулентные течения сложной и непостоянной во времени топологии. Для измерения характеристик турбулентности скорости таких потоков и их амплитуд использовались кондукционные датчики скорости, разработанные и созданные в лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН. Кондукционный датчик скорости (рис. 3) представляет собой неодимовый магнит, окруженный двумя парами электродов. Одна часть электродов погружается в жидкий металл, другая часть подключается к усилителю. Все внутренние элементы КДС помещаются в герметичный экранирующий корпус. Все разработанные КДС прошли калибровку на специальном стенде. В нашей конфигурации экспериментальной установки три КДС измеряют в пристеночной области как величину азимутальной, так и вертикальной компоненты локальной скорости течения жидкого металла.

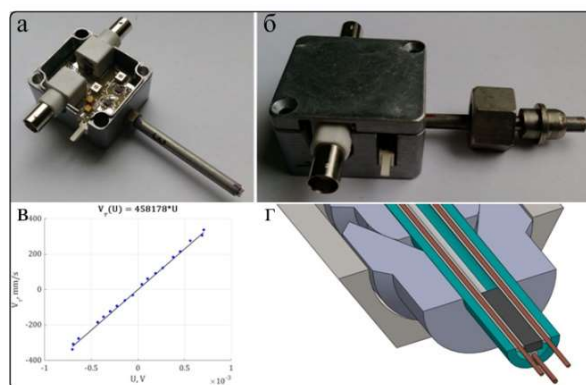


Рис. 3. Кондукционный датчик скорости: а, б – фотографии; в – результаты калибровки азимутальной компоненты датчика №2; г – схема в разрезе

Сигнал на выходе кондукционного датчика имеет крайне малую величину – порядка десятков и сотен нановольт. Усиление сигнала до уровней, адекватно воспринимаемых аналогово-цифровыми преобразователями, осуществляется с помощью схемы на основе инструментальных усилителей INA128 фирмы Texas Instruments. Данные микросхемы обладают постоянным коэффициентом усиления до частот порядка 10 кГц. Интересующие нас турбулентные пульсации скорости течения характеризуются меньшими частотами. Усиленный на 3 порядка величины сигнал поступает на 24-битный АЦП NI9239 фирмы National Instruments и записывается с частотой порядка 2 кГц.

Будем вычислять число Рейнольдса следующим образом: $Re = V_\varphi R / \nu$, где V_φ – азимутальная скорость движения среды, R – радиус цилиндра.

4. Результаты

Рассмотрим прежде всего осредненные по времени амплитуды азимутальных и вертикальных компонент скорости, полученные в зависимости от тока в катушках индуктора (рис.4). Вертикальными отрезками показаны среднеквадратичные отклонения сигнала скорости, характеризующие интенсивность её пульсаций во времени. При токе в катушках 0.6 А азимутальная скорость вращения достигает 1 м/с, а при максимальном токе – почти 2.5 м/с. Диапазон чисел Рейнольдса таким образом составляет: $3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$.

Зависимость амплитуды азимутальной компоненты скорости от тока (а значит, и от величины индукции магнитного поля) имеет линейный характер в согласии с работами [14-16]. Интенсивность пульсаций увеличивается с ростом тока и составляет 9.9 % для 0.1 А и 4.1 % для 1.6 А от средней азимутальной скорости вращения. Амплитуда вертикальной компоненты скорости на порядок меньше и меняет знак с ростом тока. Интенсивность пульсаций в вертикальном направлении при этом достаточно высока и составляет 9 % для 0.1 А и 4.3 % для 1.6 А от средней азимутальной скорости вращения.

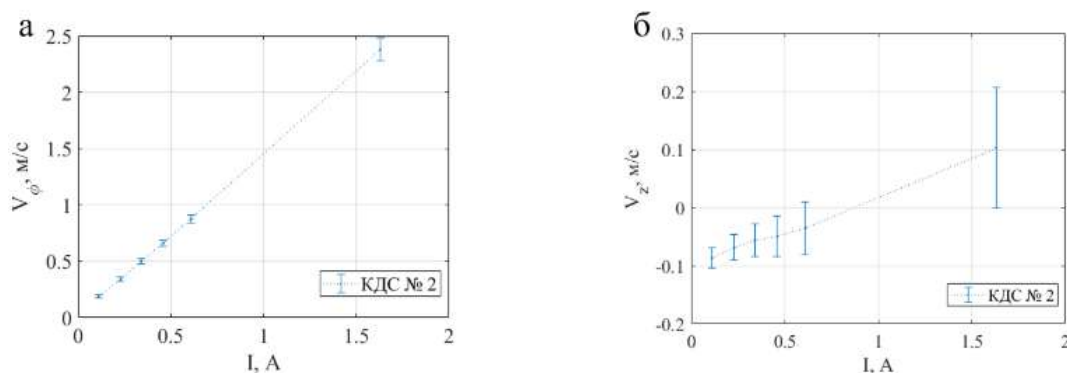


Рис. 4. Амплитуды компонент скорости на КДС №2 в зависимости от значений токов: а – азимутальных; б – вертикальных. Вертикальными отрезками показаны СКО скорости

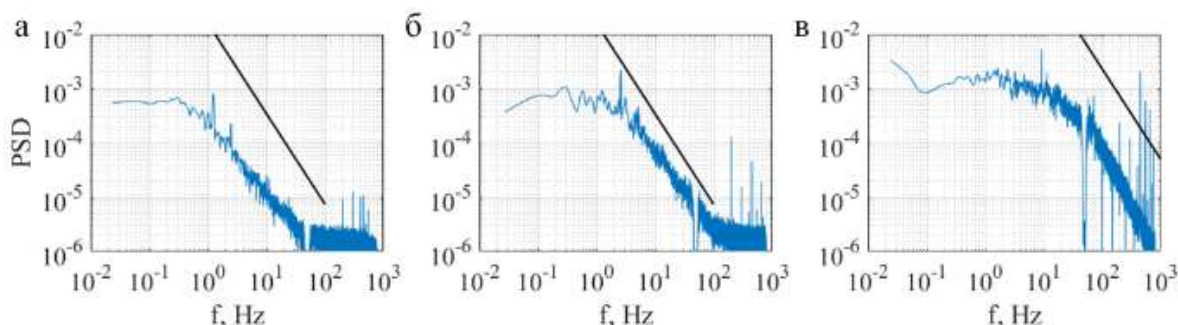


Рис. 5. Графики спектральной энергии пульсаций вертикальной компоненты скорости КДС №2 для значений токов: а – 0.2 А; б – 0.4 А; в – 1.6 А

На рис. 5 приведены графики спектральной энергии пульсаций вертикальной компоненты скорости КДС №2 для трёх значений токов в катушках перемешивателя: 0.2, 0.4 и 1.6 А.

Черной прямой на графиках обозначен «Колмогоровский» наклон « $-5/3$ »: если энергия пульсаций падает с частотой согласно этому наклону, то можно говорить об однородной изотропной турбулентности и использовать для численного расчета таких течений соответствующие модели. Интервал частот, в котором энергия пульсаций падает согласно закону « $-5/3$ », будем называть инерционным. На полученных графиках спектров явно присутствует инерционный интервал, занимающий до двух декад в частотном диапазоне (2–100 Гц для тока 0.4 А, 30–1000 Гц для тока 1.6 А). При этом видно, что данный интервал сдвигается в область высоких частот с увеличением электромагнитного воздействия, делая частотный интервал от 10 до 1000 Гц более наполненным. Дальнейший анализ графиков спектров позволяет выделить хорошо различимые пики на частотах 1.24, 2.58 и 9.20 Гц, соответствующие, как будет показано далее, основной частоте вращения (перемешивания) жидкого металла. И, действительно, если теперь пересчитать азимутальную скорость в частоту вращения жидкого металла, поделив её на $2\pi R$, можно получить график зависимости частоты вращения жидкого металла от силы тока в катушках (рис. 6). На этом же графике представлены частоты, соответствующие пикам на спектрах турбулентных пуль-

саций скорости. Видно хорошее совпадение полученных графиков, что свидетельствует о том, что пики на спектрах пульсаций скорости (обеих компонент) отвечают за главную частоту вращения жидкого металла. Частота обращения при этом достигает 9 Гц при максимальном токе в катушках и имеет линейный характер от величины силы тока.

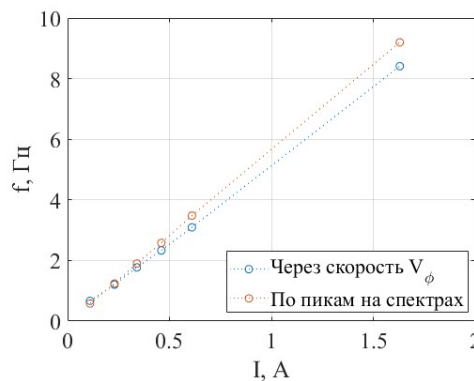


Рис. 6. Зависимость частоты вращения жидкого металла от силы тока в катушках, полученная двумя способами

Также была проведена серия замеров, в которых ток в катушках фиксировался (0.26 А), но менялась его частота f_b . Характер полученных спектров пульсаций скорости существенно не меняется (поэтому графики не приводятся), сдвигаются только выделенные пики, соответствующие частоте вращения жидкого металла. На рис. 7 приведён график

зависимости частоты вращения металла f_m , полученной также двумя способами, от частоты тока в катушках индуктора f_b .

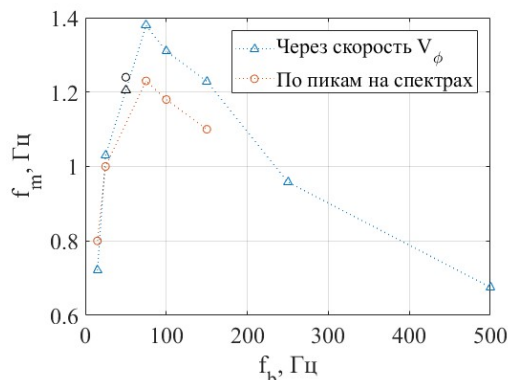


Рис. 7. Зависимость частоты вращения жидкого металла от частоты тока в катушках, полученная двумя способами

Здесь кривые ложатся друг на друга не так хорошо, однако характер совпадает — наблюдается рост частоты вращения жидкого металла в диапазоне $15 \leq f_b \leq 75$ Гц приблизительно вдвое, а затем — спад примерно до начального значения. Такой спад вызван, вероятнее всего, уменьшением скин-слоя с ростом частоты питающего тока и, как следствие, уменьшением интегральной электромагнитной силы, раскручивающей жидкий металл. Максимум зависимости находится в пределах 50–75 Гц. Наличие максимума в представленной зависимости также согласуется с другими численными и экспериментальными работами [14–16]. Однако прямое сравнение с данными работами невозможно по причине различной конфигурации приложенного магнитного поля и, следовательно, топологии течений. Можно, однако, указать величину параметра диффузии переменного магнитного поля (используя данные в указанных работах), при котором наблюдается максимум в нашем случае. Определим этот параметр как: $D_H = 2\pi\mu_a\sigma R^2 f_b$, где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость. Тогда максимум зависимости находится в пределах $D_H = 2.5$ –3.7.

5. Заключение

В рамках данной работы изучено полностью турбулентное течение жидкого металла, движимое вращающимся магнитным полем. Кондукционные датчики скорости показали себя как мощный инструмент для измерения как средних, так и пульсационных характеристик скорости, устойчивый к внешним сильным магнитным полям. Обнаружено, что пики на графиках спектральной плотности энергии вертикальной компоненты скорости соответствуют частоте вращения жидкого металла. Это открывает возможности калибровки таких датчиков (азимутальной компоненты скорости) непосредственно во время экспериментов, в том числе

для больших значений скорости. Последнее важно по причине того, что достаточно проблематично создать такой стенд для калибровки КДС, в котором бы одновременно обеспечивался большой диапазон скоростей и существовал предсказуемый профиль скорости.

Показано, что в цилиндрической полости действительно реализуется квазитвердотельное вращение жидкого металла. Об этом свидетельствует значительный уровень пульсаций обеих компонент скорости, а также наличие инерционного интервала в спектрах скорости.

Полученные значения уровня пульсаций вертикальной и азимутальной компонент скорости, а также определённый характер турбулентности (однородная и изотропная) будут учитываться при настройке параметров численных схем для моделирования данного и подобных электромагнитных устройств. Все полученные данные, в особенности — зависимость частоты вращения жидкого металла от частоты тока в катушках, послужат для верификации численной модели, разрабатываемой в лаборатории технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края, проект № С-26/564.

Список литературы

1. *Khatsayuk M.* Magnetohydrodynamic stirring for aluminium alloy production // *Magnetohydrodynamics*. 2021. Vol. 57. P. 51–72.
2. *Timofeev V., Khatsayuk M., Kizhaev I.* Mathematical simulation of electromagnetic and hydrodynamic processes in the MHD pump // *Magnetohydrodynamics*. 2019. Vol. 55. P. 337–346.
3. *Khripchenko S., Zhelnin M., Kostina A., Prokhorov A., Plekhov O.* Stirring of aluminum in the bath of the industrial aluminum furnace with a rod inductor generating travelling magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 2020. Vol. 56. P. 437–450.
4. *Losev G., Mamykin A., Eltishchev V., Sokolov I.* Adaptation of linear induction machine power supply to the tasks of liquid metal transportation and stirring // *Magnetohydrodynamics*. 2021. Vol. 57. P. 85–94.
5. *Franke S., Rübiger D., Galindo V., Zhang Y., Eckert S.* Investigations of electrically driven liquid metal flows using an ultrasound Doppler flow mapping system // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2016. Vol. 48. P. 64–73.
6. *Cramer A., Eckert S., Gerbeth G.* Flow measurements in liquid metals by means of the ultrasonic Doppler method and local potential probes // *European Physical Journal Special Topics*. 2013. Vol. 220. P. 25–41.
7. *Колесниченко И., Павлинов А., Фрик П.* Особенности исследования турбулентного течения жидкого металла, находящегося под действием

- переменного магнитного поля // Вестник пермского университета. Серия: Физика. 2013. Вып. 3. С. 54–59.
8. 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 // *Experiments in Fluids*. 2015. Vol. 56, 88.
 9. Колесниченко И. В., Мамыкин А. Д., Халилов Р. И. Электромагнитный перемешиватель жидкого металла: верификация электромагнитной части задачи // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. Вып. 4. С. 45–51.
 10. Лосев Г. Л., Мамыкин А. Д. Анализ формы и темпа продвижения твердой фазы при направленной кристаллизации цветных металлов с электромагнитным воздействием ультразвуковым и температурным методами // Вестник ПНИПУ. Механика. 2022. Вып. 4. С. 170–179.
 11. Eckert S., Nikrityuk P.A., Rabiger 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. P. 977–988.
 12. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P.A., Rabiger D., Dong J., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2008. Vol. 39. P. 304–316.
 13. Scepanskis M., Jakovich A., Nacke B. Homogenization of non-conductive particles in EM-induced metal flow in a cylindrical vessel // *Magnetohydrodynamics*. 2010. Vol. 46. P. 413–423.
 14. Тур Л. Л., Губченко А. П. Индукционные плазменные печи для процессов повышенной точности и чистоты. М.: Энергоатомиздат, 1988. 120 с.
 15. Cramer A., Galindo V., Zennaro M. Frequency dependence of an alternating magnetic field driven flow // *Magnetohydrodynamics*. 2015. Vol. 51. P. 133–147.
 16. Nikulin I. L. Analysis of possibilities of melt surface cleaning by controlling AMF frequency and distribution // *Magnetohydrodynamics*. 2017. Vol. 53. P. 537–546.
 17. of the industrial aluminum furnace with a rod inductor generating travelling magnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 2020, vol. 56, pp. 437–450.
 4. Losev G., Mamykin A., Eltishchev V., Sokolov I. Adaptation of linear induction machine power supply to the tasks of liquid metal transportation and stirring. *Magnetohydrodynamics*, 2021, vol. 57, pp. 85–94.
 5. Franke S., Rübiger D., Galindo V., Zhang Y., Eckert S. Investigations of electrically driven liquid metal flows using an ultrasound Doppler flow mapping system. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, vol. 48, pp. 64–73.
 6. Cramer A., Eckert S., Gerbeth G. Flow measurements in liquid metals by means of the ultrasonic Doppler method and local potential probes. *European Physical Journal Special Topics*, 2013, vol. 220, pp. 25–41.
 7. Kolesnichenko I. V., Pavlinov A. M., Frick P. G. Specific character of studying turbulent flows of liquid metals under the action of alternating magnetic field. *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 2013, no. 3, pp. 54–59 (In Russian).
 8. 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. *Experiments in Fluids*, 2015, vol. 56, 88.
 9. Kolesnichenko I. V., Mamykin A. D., Khalilov R. I. Electromagnetic liquid metal stirrer: verification of the electromagnetic part of the problem. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2022, no. 4, pp. 45–51.
 10. Losev G. L., Mamykin A. D. Analysis of the form and evolution of the solid phase during directional crystallization of non-ferrous metals with electromagnetic influence by ultrasonic and temperature methods. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 4, pp. 170–179.
 11. Eckert S., Nikrityuk P.A., Rabiger 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, pp. 977–988.
 12. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P.A., Rabiger D., Dong J., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2008, vol. 39, pp. 304–316.
 13. Scepanskis M., Jakovich A., Nacke B. Homogenization of non-conductive particles in EM-induced metal flow in a cylindrical vessel. *Magnetohydrodynamics*, 2010, vol. 46, pp. 413–423.
 14. Tir L. L., Gubchenko A. P. *Induktionnye plavil'nye pechi dlia protsessov povyshennoi tochnosti i chistoty* [Induction melting furnaces for processes with increased precision and purity]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 120 p. (In Russian).

References

1. Khatsayuk M. Magnetohydrodynamic stirring for aluminium alloy production. *Magnetohydrodynamics*, 2021, vol. 57, pp. 51–72.
2. Timofeev V., Khatsayuk M., Kizhaev I. Mathematical simulation of electromagnetic and hydrodynamic processes in the MHD pump. *Magnetohydrodynamics*, 2019, vol. 55, p. 337–346.
3. Khripchenko S., Zhelnin M., Kostina A., Prokhorov A., Plekhov O. Stirring of aluminum in the bath

15. Cramer A., Galindo V., Zennaro M. Frequency dependence of an alternating magnetic field driven flow. *Magnetohydrodynamics*, 2015, vol. 51, pp. 133–147.
16. Nikulin I. L. Analysis of possibilities of melt surface cleaning by controlling AMF frequency and distribution. *Magnetohydrodynamics*, 2017, vol. 53, pp. 537–546.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Мамыкин А. Д. Особенности турбулентности в электромагнитном перемешивателе жидкого металла // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 4. С. 62–68. doi: 10.17072/1994-3598-2023-4-62-68

Please cite this article in English as:

Mamykin A. D. Features of turbulence in an electromagnetic liquid metal stirrer. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 4, pp. 62–68. doi: 10.17072/1994-3598-2023-4-62-68

Сведения об авторах

Андрей Дмитриевич Мамыкин, к.ф.-м.н., н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева 1, 614068, г. Пермь

Author information

Andrey D. Mamykin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.