

УДК 537.84, 669-1
PACS 01.50.Pa

Электромагнитный перемешиватель жидкого металла: верификация электромагнитной части задачи

И. В. Колесниченко, А. Д. Мамыкин*, Р. И. Халилов

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

Рассматривается численная модель для описания электромагнитных сил, возникающих в цилиндрическом объеме металла, помещенного в рабочую область электромагнитного перемешивателя нового образца, разработанного в лаборатории технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН. Совместное применение индуктора сложной формы с набором из 6х6 катушек и системы управления питанием позволяет генерировать магнитные поля практически любой топологии (в простейшем случае – бегущее и вращающееся магнитные поля). Для верификации численной модели создана экспериментальная установка, включающая в себя индуктор и измерительные системы. Достигнуто хорошее согласие экспериментальных и численных данных о распределении магнитного поля и величине создаваемых электромагнитных сил. В частности, с хорошей точностью воспроизведен максимум кривой зависимости момента электромагнитной силы от частоты переменного тока в катушках. С помощью численного исследования было изучено влияние вращения электропроводной среды на момент электромагнитной силы, действующий на эту среду. По анализу экстремумов моментов электромагнитных сил найдена зависимость частоты питающего напряжения обмоток, которая обеспечивает максимальный момент электромагнитных сил при вращении электропроводной среды, от частоты вращения среды.

Ключевые слова: электродинамика; численный счет; верификация; вращающееся магнитное поле; электромагнитное перемешивание

Поступила в редакцию 18.08.2022; после рецензии 31.10.2022; принята к опубликованию 31.10.2022

Electromagnetic liquid metal stirrer: verification of the electromagnetic part of the problem

I. V. Kolesnichenko, A. D. Mamykin*, R. I. Khalilov

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

We studied a numerical model describing electromagnetic forces that arise in a cylindrical volume of metal placed in the working area of a newly designed electromagnetic stirrer. The combined use of a complex-shaped inductor with a set of 6x6 coils and a power management system makes it possible to generate magnetic fields of almost any topology (in the simplest case, traveling and rotating magnetic fields). To verify the numerical model, we created an experimental setup consisting of an inductor and measuring systems. A good agreement has been achieved between the experimental and numerical data on the distribution of the magnetic field and the magnitude of the generated electromagnetic forces. In particular, the maximum of the curve showing dependence of the moment of the electromagnetic force on the frequency of alternating current is reproduced with good accuracy. The effect of rotation of an electrically conductive medium on the moment of the electromagnetic force acting on this medium was studied numerically. By analyzing the extrema of the

moments of electromagnetic forces, we have found the dependence of the frequency of the supply voltage of the windings, which ensures the maximum moment of electromagnetic forces during the rotation of the electrically conductive medium, on the rotation frequency of the medium.

Keywords: electrodynamics; numerical calculation; verification; rotating magnetic field; electromagnetic stirring

Received 18 August 2022; revised 31 October 2022; accepted 31 October 2022

doi: 10.17072/1994-3598-2022-4-45-51

1. Введение

Современную промышленную металлургию сложно представить без различных электромагнитных аппаратов – технологических устройств, создающих движение электропроводной среды бесконтактным способом за счет действия электромагнитной силы. К таковым можно отнести электромагнитные насосы, расходомеры и перемешиватели. Последние, представляющие особый интерес в литейном деле, являются предметом данной статьи.

Первые успехи по созданию и применению подобных устройств были достигнуты еще в середине прошлого века [1–4]. Изначально развитие получили методы генерации электромагнитной силы с помощью только бегущего магнитного поля [1,5]. Вскоре в Донецком государственном университете был разработан целый ряд магнитогидродинамических (МГД) машин, использующих также вращающееся магнитное поле [4–6]. Металлургами Всероссийского алюминиевого и магниевоего института (ВАМИ) было обнаружено, что для качественного литья и получения необходимой структуры слитков в процессе непрерывного литья алюминия и его сплавов необходимо производить перемешивание объема жидкого металла в цилиндрическом кристаллизаторе в горизонтальной и вертикальной плоскостях с возможностью отдельного управления интенсивностью этих движений.

Новый всплеск интереса к вопросу электромагнитного перемешивания расплава вызван необходимостью улучшения качества получаемых цветных металлов и повышения эффективности производства. Для литья непрерывных слитков из алюминия и сплавов на его основе необходимо интенсивное перемешивание жидкой фазы слитка в области кристаллизации расплава [7–12]. Очевидно, что топология течения, возбуждаемого в жидкой фазе слитка, должна влиять на процессы, протекающие при его кристаллизации. Так, например, азимутальное перемешивание расплава (наиболее часто применяемое в металлургии), особенно с пульсирующим полем [13], осуществляет однородное распределение вводимых добавок, а также ломку дендритов на фронте кристаллизации расплава [14]. Возбуждение в жидкой фазе расплава меридиональных течений улучшает перемешивание вводимых компонентов [15] и оказывает влияние на форму границы расплав–твердая фаза. Таким образом, организовав

жидкой фазе слитка азимутальные и меридиональные перемешивающие течения и управляя их интенсивностью, можно влиять на качество получаемых слитков. Использование как бегущего, так и вращающегося магнитных полей [16] с возможностью их отдельной регулировки является современной технологией мирового уровня.

Подбор наилучших параметров работы электромагнитного перемешивателя является сложной и трудоемкой задачей при проведении лабораторного эксперимента. Ускорить анализ аппарата позволяет численное моделирование. Существуют различные подходы к моделированию электродинамики и кристаллизации, например, моделирование твердой жидкой фазы при помощи пористой среды [16–18] или использования теории фазового поля [19]. Так или иначе, любая математическая модель требует наличия данных для ее верификации.

В данной работе рассмотрена численная модель для описания сил, возникающих в цилиндрическом объеме металла, помещенного в рабочую область электромагнитного перемешивателя. Проведена верификация на основе данных, полученных в эксперименте на лабораторной установке.

2. Экспериментальная установка и численная модель

Экспериментальная установка состоит из системы питания и электромагнитного перемешивателя, который представляет собой индуктор нового типа. Он представляет собой набор обмоток, размещенных на ферромагнитном сердечнике сложной формы, который окружает цилиндрическую область шириной 170 мм и высотой 340 мм, в которую может быть помещена ячейка с жидким металлом (рис. 1). Каждая обмотка подключена к системе управления, позволяющей оперативно менять конфигурацию переменного магнитного поля в области ячейки. Это дает возможность 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 позволяет интегрировать индуктор в существующие производственные процессы и аппараты без необходимости модернизации и даже остановки их работы.

Математическая модель основана на уравнениях из раздела электродинамики сплошных сред –

– магнитной гидродинамике. Она описывает процессы взаимодействия электрических и магнитных полей с потоками электропроводных жидкостей. Одним из основных уравнений является уравнение переноса магнитного поля движущейся электропроводной жидкостью, сформулированное из уравнений Максвелла и закона Ома для движущихся сред. Два других основных уравнения – это уравнение Навье-Стокса со слагаемым, учитывающим действие электромагнитной силы, а также уравнение неразрывности.

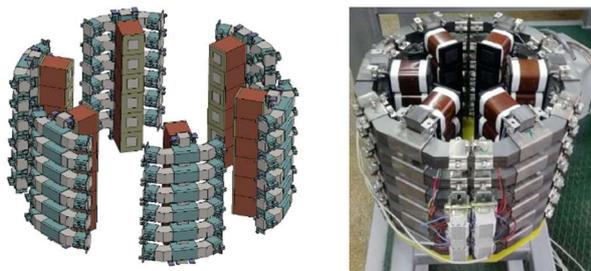


Рис. 1. 3D модель индуктора и его фото

Редуцированная формулировка уравнений математической модели базируется на следующих оценках. Интенсивность процесса переноса магнитного поля движущейся немагнитной средой характеризуется безразмерным магнитным числом Рейнольдса $Re_m = V_0 L_0 \sigma \mu_0$, где V_0 – характерная скорость среды, L_0 – характерный размер, σ – электропроводность среды, μ_0 – магнитная постоянная. Предварительные оценки показали, что $Re_m \ll 1$ для значений указанных величин, достигаемых в данном исследовании. Это означает, что переносом магнитного поля потоком электропроводной жидкости можно пренебречь. В свою очередь, интенсивность тормозящего действия внешнего магнитного поля на поток электропроводной жидкости описывается безразмерным числом Гартмана $Ha = B_0 L_0 \sqrt{\sigma/\eta}$, где B_0 – характерное значение магнитной индукции, η – динамическая вязкость жидкости. Предварительные оценки показали, что $Ha \ll 10$ для значений указанных величин, достигаемых в данном исследовании. Это означает, что магнитное поле не оказывает существенного тормозящего эффекта на поток электропроводной жидкости.

Таким образом, в данной постановке задачи взаимодействием магнитного поля и потока электропроводной жидкости можно пренебречь. Это позволяет разделить модель на две части: электродинамическую и гидродинамическую, и формулировать математические постановки для них отдельно. Расчетная часть модели реализована в программной среде ANSYS Emag и Fluent, на которую имеется лицензия. Для обработки данных применяются среды Python и Matlab. Верификация численной модели производилась при помощи экспериментальной установки путём сравнения распределения магнитного поля и величины создаваемых электромагнитных усилий, измеренных в эксперименте и полученных при численном счете.

3. Результаты: верификация по распределению магнитного поля

С целью определения электромагнитных характеристик индуктора и верификации численной модели была создана измерительная система, представляющая собой трехкомпонентный холловский датчик магнитного поля магнетометра (LakeShore Model 421), закрепленного на держателе, способном свободно перемещаться в цилиндрической системе координат внутри индуктора (рис. 2). Ориентация по азимуту происходит за счёт транспортира и подвеса, по высоте Z – за счет линейки и микрометрической подвижки, по радиусу r – дискретно за счет гнезд положения датчика: $r = \{0.023, 0.033, 0.043, 0.053, 0.063, 0.073\}$. Катушки включены в режиме вращающегося поля. Измерения производятся в непрерывном режиме гауссметром Lake Shore 421 Gaussmeter с трехкомпонентным датчиком. Напряжения, токи и данные гауссметра измеряются платами National Instruments 9225, 9227 и 9239 соответственно. Сбор данных осуществляется программой LabView с частотой 1.613 кГц.

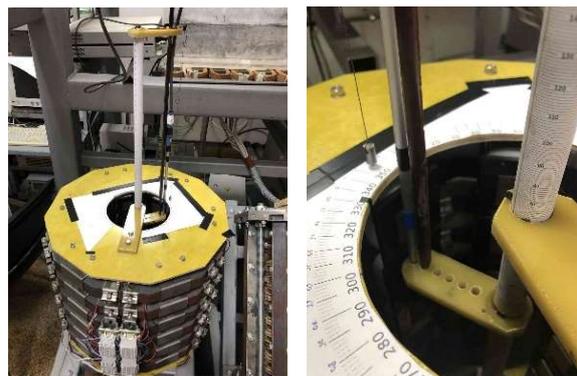


Рис. 2. Фото измерительной системы для определения распределения магнитного поля внутри индуктора

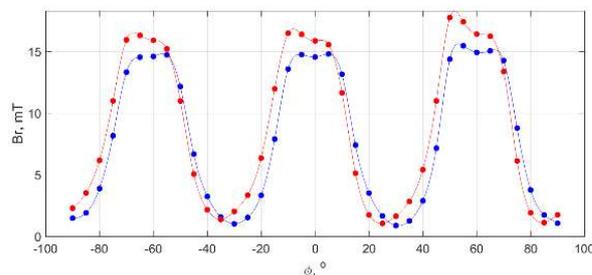


Рис. 3. Распределение радиальной компоненты магнитного поля в четвертом и шестом снизу кольцах индуктора (красная и синяя линии соответственно), полученное экспериментально

Получены азимутальные распределения всех трёх компонент индукции магнитного поля в четвертом и шестом (снизу) кольцах катушек индуктора. Для фиксированных тока 0.6 А и частоты 50

Гц азимутальное распределение (от -90° до 90°) радиальной компоненты имеет вид кривой с максимумами в областях нахождения катушек. Характерное значение индукции магнитного поля в таких областях составляет 15 мТ для указанных параметров питания и верхнего кольца катушек индуктора. В четвертом снизу кольце характерное значение радиальной компоненты индукции магнитного поля в областях нахождения катушек превосходило таковое в верхнем кольце приблизительно на 8 %, что являлось ожидаемым результатом (рис. 3). В целом вид полученных графиков свидетельствует о хорошем уровне инженерного исполнения индуктора.

Полученные азимутальные и аксиальные распределения амплитуды индукции магнитного поля при фиксированном токе в катушках, но для разных его частот, показали слабую зависимость амплитуды магнитного поля от частот в диапазоне от 25 до 300 Гц (рис. 4). Например, наблюдалось уменьшение амплитуды радиальной компоненты магнитного поля в области расположения катушек не более чем на 10 % при увеличении частоты от 50 до 300 Гц. Насыщения на низких частотах обнаружено не было. В диапазоне тока питания катушек от 0.6 до 1.6 А нелинейности в зависимостях амплитуд компонент магнитного поля от тока не выявлены. Максимальное значение радиальной компоненты магнитного поля в областях расположения катушек при токе 1.6 А составляло 40 мТ.

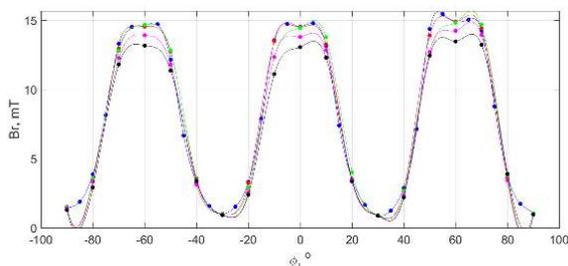


Рис. 4. Распределение радиальной компоненты магнитного поля в четвертом снизу кольцах индуктора для частот от 25 до 300 Гц, полученное экспериментально

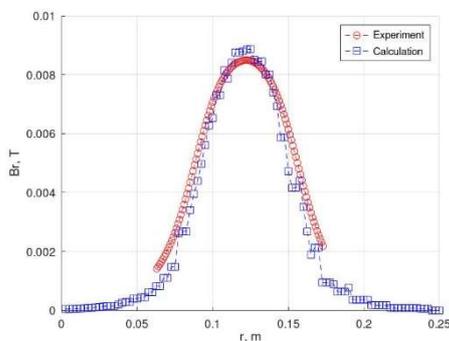


Рис. 5. Распределение радиальной компоненты магнитного поля уединенной катушки без сердечника. Частота – 50 Гц. Красные кружки – эксперимент, синие квадраты – численный счет

Верификация численной модели производилась по магнитному полю уединенной катушки без сердечника (радиальная компонента). Результаты представлены на рис. 5. Наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и численных результатов – расхождение не превышает 5 %.

4. Результаты: верификация по электромагнитному усилию

Для верификации численных расчетов электромагнитных сил был выполнен эксперимент, в котором в индуктор помещался цилиндрический образец из твердого дюралюминиевого сплава (рис. 6). С помощью внешней измерительной системы определялась зависимость момента электромагнитной силы, действующей на образец, от частоты электрического тока, питающего обмотки. Момент определялся в статическом состоянии с помощью слабо растяжимого шнура, один конец которого закреплен снаружи цилиндра, блока и весов. На весах была установлена гиря, привязанная к другому концу шнура. Вес гири изменялся при подачи переменного тока на катушки индуктора различной амплитуды и частоты.

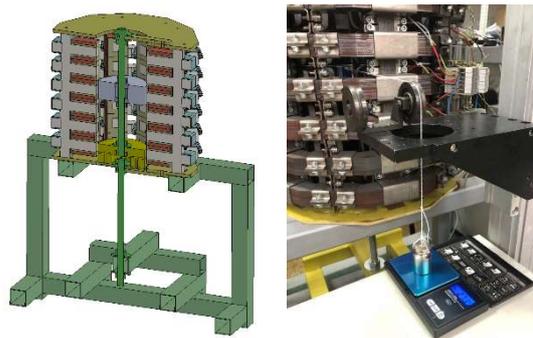


Рис. 6. Схема и фото экспериментальной установки для определения момента электромагнитной силы

Получено, что зависимости момента электромагнитной силы от частоты переменного тока, найденные в эксперименте и расчете, демонстрируют хорошее совпадение (рис. 7). В частности, с хорошей точностью воспроизведен максимум данной кривой, что также свидетельствует о надежности электродинамической части математической модели. Далее, с помощью численного исследования было изучено влияние вращения электропроводной среды на момент электромагнитной силы, действующий на эту среду.

В данном случае проявляется эффект проскальзывания, связанный с разностью реальной скорости вращающейся среды и скоростью вращения магнитного поля. Обнаружено, что в исследуемом диапазоне параметров на зависимости момента электромагнитных сил от частоты вращающегося поля f_b существует экстремум при фиксированной частоте вращения среды f_{mc} (рис. 8).

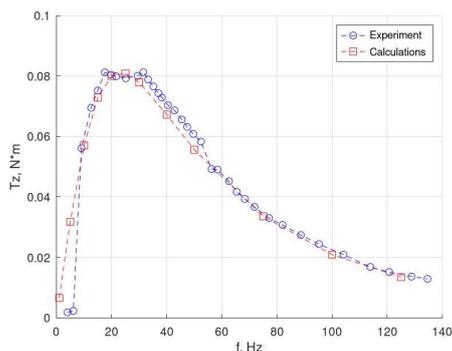


Рис. 7. Зависимость момента электромагнитных сил от частоты: расчет (красным) и эксперимент (синим)

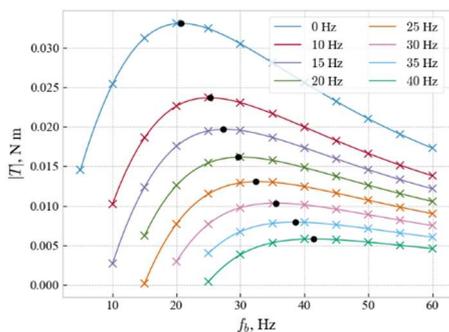


Рис. 8. Зависимости момента электромагнитной силы от частоты вращающегося магнитного поля (различные кривые соответствуют разным частотам вращения электропроводной среды внутри индуктора). Численный счет

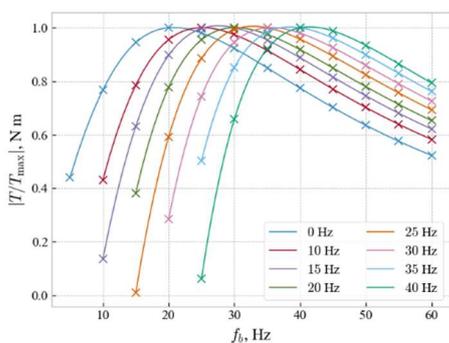


Рис. 9. Нормированные зависимости момента электромагнитной силы от частоты вращающегося магнитного поля. Численный счет

При этом вид зависимостей для разных частот вращения среды подобен, что хорошо заметно на этих же, но нормированных данных (рис. 9).

Значения максимумов моментов электромагнитных сил (черные точки на рис. 8) показаны на рис. 10 в зависимости от частоты вращения электропроводной среды. Представленная зависимость имеет спадающий характер, что ожидаемо.

Также с помощью анализа экстремумов моментов электромагнитных сил (рис. 8) найдена зависимость частоты питающего напряжения обмоток, ко-

торая обеспечивает максимальный момент электромагнитных сил при вращении электропроводной среды, от частоты вращения среды (рис. 11).

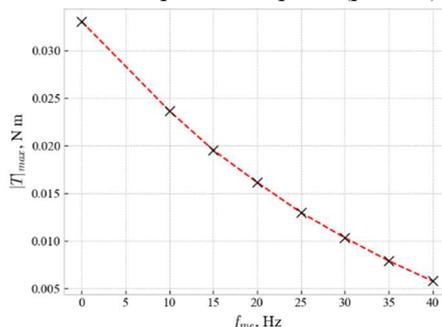


Рис. 10. Зависимость максимума момента электромагнитной силы от частоты вращения электропроводной среды. Численный счет

Эта зависимость дает возможность выбирать наилучшие значения частоты вращения магнитного поля при заданной частоте вращения среды. Следует отметить, что при увеличении частоты вращающегося поля одновременно возникает скин-эффект – уменьшается глубина проникновения магнитного поля в электропроводную среду. Это существенно влияет на величину момента электромагнитных сил при фиксированной силе тока. Поэтому без полного численного анализа задачи невозможно найти экстремум и предсказать наилучшее значение частоты.

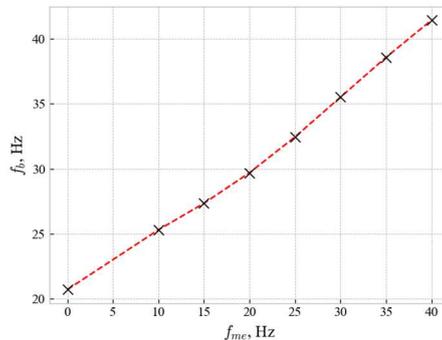


Рис. 11. Зависимость частоты вращения магнитного поля, которая обеспечивает максимальный момент электромагнитных сил, от частоты вращения среды. Численный счет

5. Заключение

В рамках данной работе рассмотрена численная модель для описания электромагнитных сил, возникающих в цилиндрическом объеме металла, помещенного в рабочую область электромагнитного перемешивателя. Для верификации численной модели создана экспериментальная установка, включающая в себя индуктор и измерительные системы. Достигнуто хорошее согласие экспериментальных и численных данных о распределении магнитного поля и величине создаваемых электромагнитных

сил. В частности, с хорошей точностью воспроизведен максимум кривой зависимости момента электромагнитной силы от частоты переменного тока. С помощью численного исследования было изучено влияние вращения электропроводной среды на момент электромагнитной силы, действующий на эту среду. С помощью анализа экстремумов моментов электромагнитных сил найдена зависимость частоты питающего напряжения обмоток, которая обеспечивает максимальный момент электромагнитных сил при вращении электропроводной среды, от частоты вращения среды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Пермского края, проект р_НОЦ_Пермский край № 20-48-596015.

Список литературы

- Верте Л.А. Электромагнитный транспорт жидкого металла. М.: Metallurgiya, 1965, 120 с.
- Охременко Н.В. Основы теории и проектирования линейных индукционных насосов для жидких металлов. М.: Атомиздат, 1968, 396 с.
- Лиелпетер Ю. Индукционные МГД машины для жидкого металла. Рига: Зинатне, 1969, 246 с.
- Вольдек А. Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970, 271 с.
- Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии // М.: Metallurgiya, 1974, 240 с.
- Гельфгат Ю.М., Лиелаусис О.А., Щербинин Э.В. Жидкий металл под действием электромагнитных сил // Рига: Зинатне, 1976, 231 с.
- Moffatt H. Electromagnetic stirring // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. 1991. Vol. 3. P. 1336–1343.
- Гельфгат Ю., Приеде Я. МГД-течения во вращающемся магнитном поле (Обзор) // *Магнитная гидродинамика*. 1995. Т. 31. С. 214–230.
- 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. P. 2133–2151.
- Liu C.-T. Refined model development and performance assessment of a linear induction-type electromagnetic stirrer // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010. Vol. 46. P. 3724–3730.
- Wang X., Wang S., Zhang L. et al. 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.
- Nauber R., Burger M., Neumann M., Büttner L., Dadzis K., Niemietz K., Patzold O. Dual-plane flow mapping in a liquid-metal model experiment with a square melt in a traveling magnetic field // *Experiments in Fluids*. 2013. Vol. 54. P. 1502.
- 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. P. 977–988.
- Willers B., Eckert S., Nikrityuk P.A., Rübiger 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.
- Ščepanskis M., Jakovičs A., Nacke B. Homogenization of non-Conductive particles in EM induced metal flow in a cylindrical vessel // *Magnetohydrodynamics*. 2010. Vol. 46. P. 413–423.
- Stiller J., Koal K., Nagel W., Pal J., Cramer A. Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields // *European Physical Journal: Special Topics*. 2013. Vol. 220. P. 111–122.
- Zhang H., Nagaumi H., Zuo Y., Cui J. Coupled modeling of electromagnetic field, fluid flow, heat transfer and solidification during low frequency electromagnetic casting of 7XXX aluminum alloys // *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 448. P. 189–203.
- Mapelli C., Gruttadauria A., Peroni M. Application of electromagnetic stirring for the homogenization of aluminium billet cast in a semi-continuous machine // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. P. 306–314.
- Martins J. P., Carvalho A. L. M., Padilha A. F. Microstructure and texture assessment of Al-Mn-Fe-Si (3003) aluminum alloy produced by continuous and semicontinuous casting processes // *Journal of Materials Science*. 2009. Vol. 44. P. 2966–2976.

References

- Verte L. A. *Elektromagnitnyi transport zhidkogo metalla* [Electromagnetic Transport of Liquid Metal]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1965. 120 p. (In Russian).
- Okhremenko N. V. *Osnovy teorii i proektirovaniia lineinykh induktsionnykh nasosov dlia zhidkikh metallov* [Fundamentals of Theory and Design of Linear Induction Pumps for Liquid Metals]. Moscow: Atomizdat Publ., 1968. 396 p. (In Russian).
- Lielpeter Yu. *Induktsionnye MGD mashiny dlia zhidkogo metalla* [Induction MHD Machines for Liquid Metal]. Riga: Zinatne Publ., 1969. 246 p. (In Russian).
- Vol'dek A. *Induktsionnye magnetogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* [Induction Magnetohydrodynamic Machines with Liquid-Metal Working Fluid]. Leningrad: Energiia Publ., 1970. 271 p. (In Russian).
- Povkh I. L., Kapusta A. B., Chekin B. V. *Magnitnaya gidrodinamika v metallurgii* [Magnetohydrodynamics in Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1974. 240 p. (In Russian).

6. Gelfgat Yu. M., Lielausis O. A., Shcherbinin E. V. *Zhidkii metall pod deistviem elektromagnitnykh sil* [Liquid Metal under the Action of Electromagnetic Forces]. Riga: Zinatne, 1976. 231 p. (In Russian).
7. Moffatt H. Electromagnetic stirring. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1991, vol. 3, 1336-1343.
8. Gelfgat Yu., Priede Ia. MGD-techeniia vo vrashchaiushchemsia magnitnom pole (Obzor) [MHD flows in a rotating magnetic field (Overview)]. *Magnitnaia gidrodinamika* [Magnetohydrodynamics], 1995, vol. 31, pp. 214-230. (In Russian).
9. 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, pp. 2133-2151.
10. Liu C.-T. Refined model development and performance assessment of a linear induction-type electromagnetic stirrer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, pp. 3724-3730.
11. Wang X., Wang S., Zhang L. et al. 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.
12. Nauber R., Burger M., Neumann M., Büttner L., Dadzis K., Niemiets K., Patzold O. Dual-plane flow mapping in a liquid-metal model experiment with a square melt in a traveling magnetic field. *Experiments in Fluids*, 2013, vol. 54, p. 1502.
13. 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, pp. 977-988.
14. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P.A., Rübiger 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.
15. Ščepanskis M., Jakovičs A., Nacke B. Homogenization of non-conductive particles in EM induced metal flow in a cylindrical vessel. *Magnetohydrodynamics*, 2010, vol. 46, pp. 413-423.
16. Stiller J., Koal K., Nagel W., Pal J., Cramer A. Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields. *European Physical Journal: Special Topics*, 2013, vol. 220, pp. 111-122.
17. Zhang H., Nagaumi H., Zuo Y., Cui J. Coupled modeling of electromagnetic field, fluid flow, heat transfer and solidification during low frequency electromagnetic casting of 7XXX aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A*, 2007, vol. 448, pp. 189-203.
18. Mapelli C., Gruttadauria A., Peroni M. Application of electromagnetic stirring for the homogenization of aluminium billet cast in a semi-continuous machine. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, pp. 306-314.
19. Martins J. P., Carvalho A. L. M., Padilha A. F. Microstructure and texture assessment of Al-Mn-Fe-Si (3003) aluminum alloy produced by continuous and semicontinuous casting processes. *Journal of Materials Science*, 2009, vol. 44, pp. 2966-2976.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Колесниченко И. В., Мамыкин А. Д., Халилов Р. И. Электромагнитный перемешиватель жидкого металла: верификация электромагнитной части задачи // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 4. С. 45–51. doi: 10.17072/1994-3598-2022-4-45-51

Please cite this article in English as:

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. doi: 10.17072/1994-3598-2022-4-45-51

Сведения об авторах

1. *Илья Владимирович Колесниченко*, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Технологической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
2. *Андрей Дмитриевич Мамыкин*, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
3. *Руслан Ильдусович Халилов*, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.

Author information

1. *Ilya V. Kolesnichenko*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory of Technological Hydrodynamics, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
2. *Andrey D. Mamykin*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
3. *Ruslan I. Khalilov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.