

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

В.С. Озерных

ozernykh.v@icmm.ru

И.В. Колесниченко

kiv@icmm.ru

ИМСС УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Аннотация

В металлургии и энергетике жидкий металл используется в качестве теплоносителя, поэтому необходимо точно измерять текущие характеристики потока жидкого металла, поскольку они определяют режимы работы установок. Цель работы — экспериментальное изучение локальных течений, которые возникают в жидком металле под действием электромагнитных сил, для оценки их вклада в общий процесс измерения расхода. Проведено исследование колебаний вихревого течения жидкого металла в плоском слое, которое создано электромагнитными силами. Структура течения зависит от частоты питающего индуктор тока. Интенсивность течения определяется силой тока: чем выше ток, тем интенсивнее течение. Определено пороговое значение частоты тока, при превышении которого в системе увеличивается число вихрей, а число Рейнольдса достигает более 3 000. Это позволяет утверждать, что течение имеет турбулентный характер. При меньшей частоте тока структура течения представляет собой одиночный крупномасштабный полоидальный вихрь. Выбраны параметры частоты тока до 75 Гц и силы тока до 8 А, обеспечивающие корректность работы измерительной системы. В этом случае вихревое течение обладает умеренной интенсивностью, что не оказывает негативное воздействие на точность измерения расхода

Ключевые слова

Магнитная гидродинамика, жидкий металл, вихревое течение, измерение расхода, ультразвуковой доплеровский анемометр

Поступила 19.06.2024

Принята 16.10.2024

© Автор(ы), 2025

*Работа выполнена в рамках государственного задания
(рег. № 122030200191-9)*

Введение. Высокая электрическая проводимость жидких металлов позволяет использовать электродинамические процессы в системах измерения расхода, что и осуществляется в электромагнитных расходомерах. Суще-

существует множество методик измерения скорости течения жидких металлов, применяемых в металлургической и атомной промышленности. Обзор методов расходомерии представлен в [1], где рассмотрены локальные методы распознавания скорости потока, инвазивные и неинвазивные методики. Расход также определяется с использованием кондукционных и индукционных методик, каждая из которых имеет преимущества и недостатки [2–4]. Большое распространение получили кондукционные датчики и расходомеры [5, 6]. Их преимущество — простота реализации и широкие возможности измерения локальных характеристик пульсаций скорости, а недостаток — необходимость калибровки. В случае интенсивного течения среды с высокой электропроводностью эффект сноса наложенного магнитного поля [7] приводит к появлению нелинейной зависимости возникающей разности потенциалов от скорости и расхода, что требует усложнения калибровки и интерпретации результатов измерений [8].

Наибольший интерес представляют конструкции расходомеров, которые не требуют калибровки и являются бесконтактными. Принцип их действия основан на корреляционной методике [9]. Использование в металлургии и энергетике жидкого металла в качестве теплоносителя требует точного измерения текущих характеристик потока жидкого металла, так как они определяют режимы работы установок [10]. Высокая электрическая проводимость жидких металлов дает возможность эффективного управления его потоками за счет электромагнитных сил [11]. Электромагнитные силы генерируются в расплавах с использованием индукционных аппаратов [12, 13], расположенных от них на некотором удалении, т. е. бесконтактно. В связи с этим основное преимущество заключается в отсутствие прямого контакта жидких металлов с аппаратами — контакт только со стенкой канала.

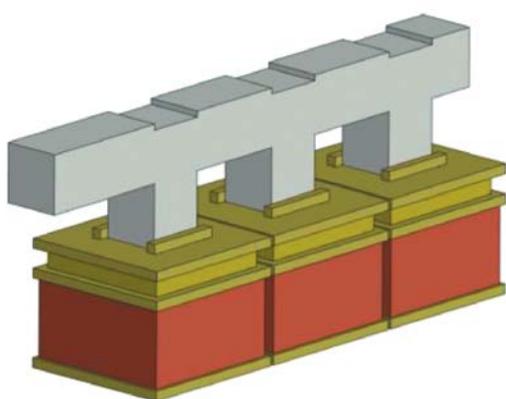
Используемые в металлургии и энергетике жидкие металлы имеют высокую температуру плавления, некоторые из них, например алюминий, в жидком состоянии чрезвычайно агрессивны. Поэтому при эксплуатации металлургических и энергетических установок стремятся упростить и удешевить все технологические каналы как для снижения области контакта и упрощения поддержки температурных режимов, так и для обеспечения возможности периодической замены этих каналов [14]. Наиболее востребованными являются простые технологические каналы с отсутствием внутри них перегородок, датчиков, нагревательных элементов и т. д.

Бесконтактные расходомеры жидких металлов основаны на индукционном принципе работы и бывают различных типов [15]. Конструкционно их можно подразделить на накладные [16, 17] и охватывающие [18, 19].

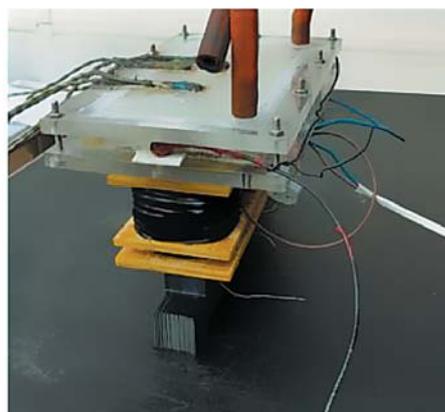
Преимущество накладных расходомеров: их можно монтировать непосредственно на трубопроводы, находящиеся в эксплуатации, без необходимости их разборки. В настоящей работе исследован вариант накладного расходомера, состоящего из индуктора, который генерирует переменное магнитное поле. Поле проникает в жидкий металл и индуцирует вихревые токи, которые генерируют собственные магнитные поля. Суперпозиция всех полей дает отклик в измерительную систему, на основе которого и измеряют расход. Проблема заключается во взаимодействии вихревых токов с магнитным полем, что приводит к генерации локальных течений.

Цель работы — экспериментальное изучение этих течений для оценки их вклада в общий процесс измерения расхода.

Концептуальная постановка задачи. Концептуальная постановка задачи заключается в поиске наиболее рациональной конструкции накладного индукционного расходомера. Разработанный расходомер реализует индукционный способ измерения скорости, основанный на балансной схеме. Принцип действия заключается в регистрации скорости течения катушками регистрирующего модуля. В схеме задействованы три катушки, которые расположены на соседних зубцах единого ферромагнитного магнитопровода (рис. 1). Две из них (крайние) подключены к генератору так, чтобы возбужденные в центральном зубце магнитные потоки были направлены встречно. Центральная катушка является измерительной и подключена к цифровому вольтметру системы измерения. Если крайние катушки создают одинаковые по интенсивности и встречно направленные потоки магнитного поля, то остаточное напряжение в приемной катушке



а



б

Рис. 1. Трехмерная модель индуктора (а) и фотография индуктора и канала (б)

при отсутствии движения жидкого металла будет минимальным, так как магнитные потоки вторичного магнитного поля также направлены встречно. При движении электропроводной среды часть возникающего вторичного поля замыкается через приемный зубец. В приемной катушке наводится электродвижущая сила, которая измеряется вольтметром. Таким образом, измерительная система чувствительна к движению электропроводной среды в направлении вдоль последовательно расположенных катушек.

Переменное магнитное поле, которое генерируется измерительными катушками, действует на электропроводную среду. Переменный магнитный поток создаст в электропроводящей среде вихревой электрический ток согласно закону электромагнитной индукции. При взаимодействии с магнитным полем электрический ток создаст вихревую электромагнитную силу, которая приведет к формированию нежелательных вторичных вихревых течений, локализованных в области индуктора. На практике такие течения неустойчивы, что проявляется в колебательной миграции вихрей в области действия электромагнитных сил [20, 21]. Электромагнитные силы формируются под воздействием преимущественно ортогонального переменного магнитного поля, создаваемого индуктором, который локализован в плоскости слоя. Генерация течения с использованием уединенного локализованного индуктора подробно исследована в [22, 23]. Здесь рассмотрено несколько конфигураций локализованных источников магнитного поля (с двумя и тремя локализованными источниками поля).

Материалы и методы решения задач. Исследование скорости течения галлиевой эвтектики GaZnSn в кювете выполнено на ультразвуковом доплеровском анемометре (УДА) DOP5000 (*Signal Processing*). Трехмерная модель индуктора и фотография экспериментальной установки приведены на рис. 1. Сверху индуктора расположена заполненная галлиевой эвтектикой кювета.

Ультразвуковой доплеровский анемометр — прецизионное устройство, в котором используется эффект отражения звуковых волн от частиц, перемещающихся вместе с жидкостью (рис. 2). Принцип действия УДА основан на эффекте Доплера, принцип работы — на анализе изменений частоты ультразвуковых волн между ультразвуковыми импульсами, испускаемыми датчиком УДА и отраженными от частиц в движущейся среде. Технически метод реализован на корреляционном анализе последовательно испускаемых и принимаемых (отраженных от движущихся частиц) волновых пакетов (всплесков). Наличие звукоотражающих частиц — необходимое условие применения этого метода. Галлиевая эвтектика

(Ga 86,3 Zn 10,8 Sn 2,9 (% (масс.))) является наиболее подходящей для проведения подобных исследований [24]. Выбор обусловлен тем, что этот сплав остается жидким при комнатной температуре (температура плавления 17 °С). При использовании галлиевой эвтектики в качестве дисперсной фазы применяют частицы оксидов Ga_2O и Ga_2O_3 . Контакт сплава с атмосферным кислородом в течение 1...2 мин достаточно для обеспечения концентрации оксидов, необходимой для ультразвуковых измерений [25, 26].

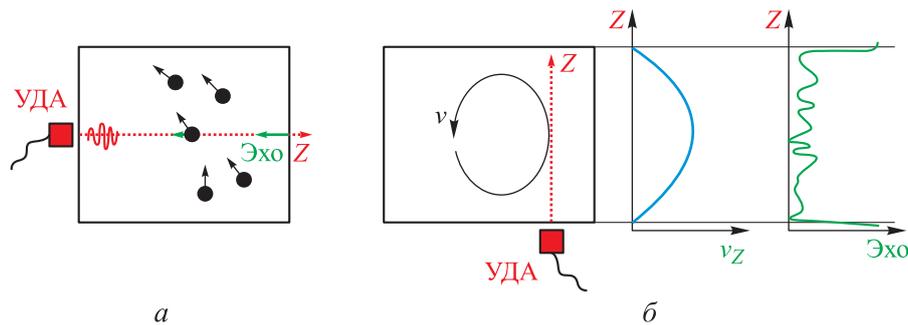


Рис. 2. Принцип действия УДА

Пространственное положение точки, в которой измеряется скорость потока, определяется временем прохождения ультразвукового импульса (временем, за которое излучаемый импульс возвращается в приемник). Датчик УДА излучает набор высокочастотных волновых пакетов, которые отражаются от микрочастиц, содержащихся в среде (рис. 2, а). Увлекаемые потоком жидкости частицы несут информацию о локальной скорости в точках своего местоположения.

При анализе эхо-сигнала предполагается, что интенсивность ультразвукового луча и распределение звукоотражающих частиц в измерительном объеме постоянны и равномерны. Тем не менее реальное распределение частиц в среде является хаотичным, что приводит к уширению полосы частот ультразвука и усложнению спектрального анализа. Наибольшие ошибки, связанные с конечными размерами измерительного объема, имеют место в турбулентных течениях и течениях с большими градиентами скорости. В этом случае ультразвуковое эхо может вырождаться в случайный сигнал. При малых градиентах скорости осреднение по многим принятым сигналам дает достоверное значение измеряемой компоненты скорости. Каждый датчик УДА измеряет одну компоненту вдоль ультразвукового луча (рис. 2, б).

Эксперимент проводится для двух конфигураций. Схемы подключения катушек в каждой конфигурации показаны на рис. 3.

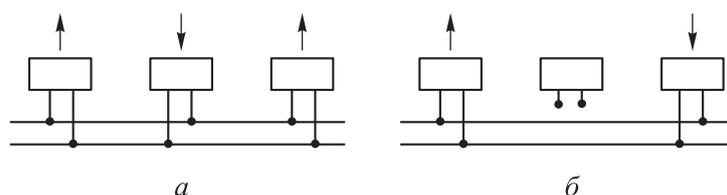


Рис. 3. Схемы подключения катушек для конфигураций 1 (а) и 2 (б) (стрелки показывают направление создаваемого магнитного поля)

Ось Z располагается в центре кюветы и направлена вдоль длинной ее стороны. Ось Z совпадает с центральной осью симметрии индуктора, в результате чего в кювете создается симметричная электромагнитная сила. В экспериментах измеряется скорость течения вдоль луча (Z -компонента), расположенного на оси симметрии.

Структура поля электромагнитных сил магнитных полей для уединенного С-образного индуктора подробно описана в [20, 21]. В настоящей работе применена другая схема генерации переменного магнитного поля и, следовательно, течения в кювете. Принципиальные схемы генерации переменного магнитного поля в фиксированный момент времени показаны на рис. 4.

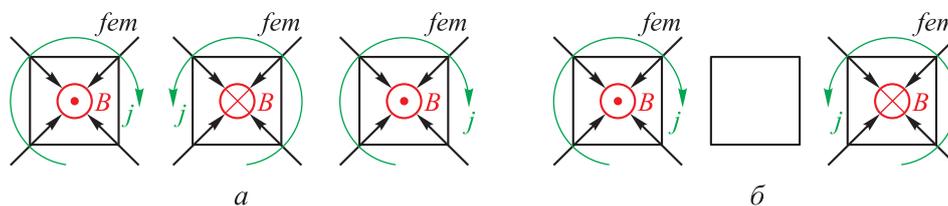


Рис. 4. Принципиальные схемы генерации переменного магнитного поля и тока для конфигураций 1 (а) и 2 (б) (стрелки черного цвета показывают направление электромагнитной силы, красного — переменное магнитное поле, зеленого — направление течения электрического тока)

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5. В экспериментах получено 2048 профилей в течение примерно 167 с. Частота дискретизации 87 мс. Для анализа пульсаций использован аппарат вейвлет-анализа. Этот тип анализа выбран в результате появления негармонических колебаний. В качестве анализирующего вейвлета выбран вейвлет Морле — один из самых распространенных вейвлетов, который лучше подходит для сигналов сложного характера [27–29]:

$$\psi(t) = \exp[-t^2 / (2\sigma^2)] \exp[i2\pi t],$$

где σ — регулирующий параметр.

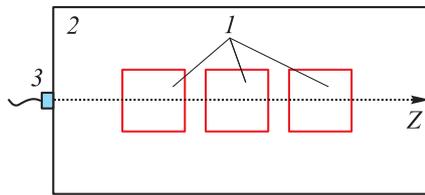


Рис. 5. Схема экспериментальной установки (вид сверху):
1 — индукторы; 2 — кювета; 3 — УДА

Изменяя значение σ , можно получить оптимальное разрешение по времени и частоте. Низкие значения σ обеспечивают лучшее временное разрешение, а высокие — лучшее частотное разрешение вейвлета. Однако бесконтрольное увеличение параметра σ нежелательно, так как ослабляет анализирующую функцию. Общепринятое значение $\sigma = 1$ [27], а предел $\sigma \rightarrow \infty$ соответствует преобразованию Фурье.

Результаты. Проведено экспериментальное измерение скорости течения галлиевой эвтектики. В качестве примера рассмотрены результаты для случая, когда катушки подключены в конфигурации 1. Ток удерживался около значения 8 А (расчетный показатель допустимой нагрузки на провод), частота — в пределах 15...200 Гц. Полученные результаты при частоте тока 50 Гц представлены на рис. 6, а, б. Процедура построения эволюции профиля скорости подробно описана в [30, 31]. Согласно эволюции профиля скорости вдоль оси Z, течение имеет вихревую структуру с несколькими вихрями крупномасштабной циркуляции. Наблюдаются пульсации скорости, средний профиль скорости симметричен относительно нуля.

При увеличении частоты питающего тока до 75 Гц (и более) характер течения меняется (рис. 6, в, г). Число вихрей возрастает в 2 раза. Средний профиль скорости имеет более сложную структуру, интенсивность течения практически не изменяется.

Схематичное изображение направления вихревого течения в кювете для различных режимов работы индукторов показано на рис. 7.

С использованием вейвлет-анализа определены характерные частоты колебаний скорости. Исходя из наличия значительного числа визуально-различимых колебаний скорости для анализа выбрана точка с координатой $Z = 80$ мм. Установлено (рис. 8), что с повышением частоты тока возрастает энергия пульсаций скорости. Характерная частота колебаний смещается в сторону высоких частот.

Результаты исследования показали, что в конфигурации 1 максимальная скорость течения в 2 раза выше, чем в конфигурации 2. Скорость монотонно увеличивается с ростом частоты питающего тока (рис. 9, а).

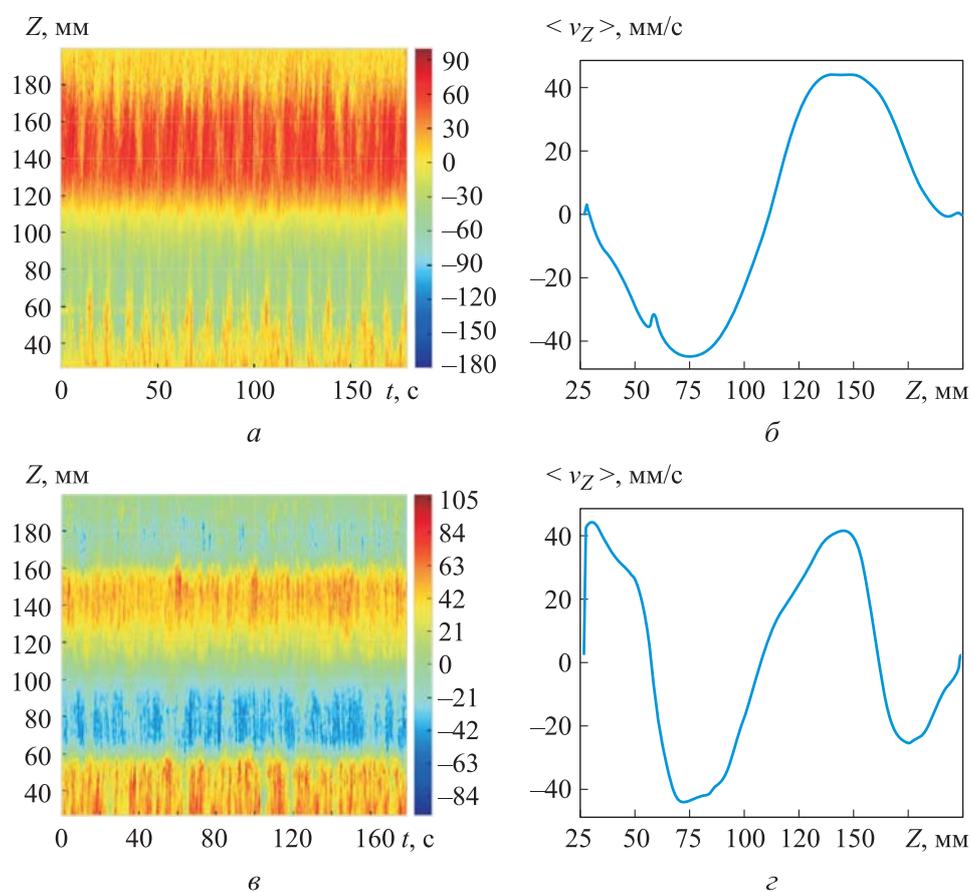
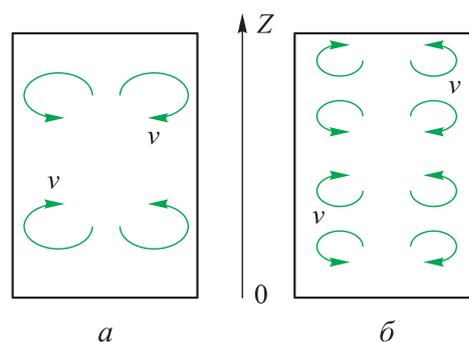


Рис. 6. Эволюция профиля скорости v_z вдоль оси Z (а, в) и средний профиль скорости (б, д) при частоте тока на катушках 50 (а, б) и 75 Гц (в, д)

Рис. 7. Схематичное изображение направления вихревого течения в кювете при частоте тока на катушках 50 (а) и 75 Гц (б)



Согласно зависимости числа Рейнольдса от силы тока, в конфигурации 1 рост скорости течения происходит быстрее, чем в конфигурации 2 (рис. 9, б). При токе более 10 А число Рейнольдса превышает 3 000, что свидетельствует о турбулентном характере течения.

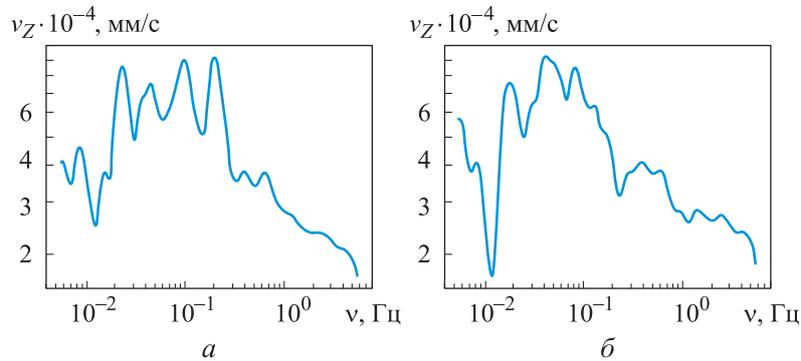


Рис. 8. Вейвлет-спектрограммы по эволюции скорости в точке $Z = 80$ мм при частоте тока на катушках 50 (а) и 75 Гц (б)

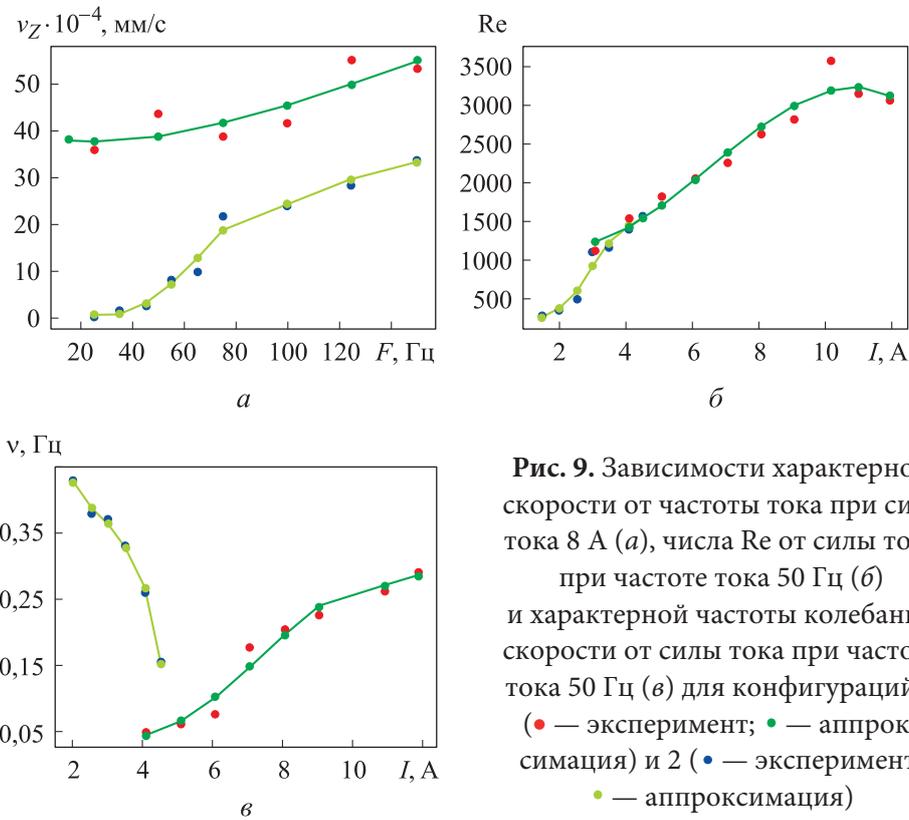


Рис. 9. Зависимости характерной скорости от частоты тока при силе тока 8 А (а), числа Re от силы тока при частоте тока 50 Гц (б) и характерной частоты колебания скорости от силы тока при частоте тока 50 Гц (в) для конфигураций 1 (• — эксперимент; • — аппроксимация) и 2 (• — эксперимент; • — аппроксимация)

С использованием вейвлет-анализа определены характерные частоты колебаний скорости течения (рис. 9, в). Получено, что в конфигурации 1 с увеличением тока монотонно возрастает характерная частота пульсаций скорости и при наибольшем токе 12 А составляет около 0,3 Гц. Обратный случай наблюдается для конфигурации 2, в которой частота пульсаций скорости значительно снижается с увеличением тока.

Выводы. Проведено исследование магнитогидродинамических процессов в жидком металле, на который воздействует переменное магнитное поле от локализованных в пространстве источников. Экспериментальные исследования проведены на галлиевой эвтектике с использованием УДА DOP-5000. Изучена конфигурация, которая представляет собой замкнутую ячейку без транзитного потока. Исследовано развитие вихревого течения, которое позволило оценить параметры установки и интенсивность течения, генерируемую индуктором.

Выполнен анализ спектральных характеристик в вихревом течении, полученных экспериментальным исследованием. Определены зависимости характеристик спектров сигналов от интенсивности воздействия электромагнитной силы, порождающей исследуемые течения. Получена монотонно возрастающая зависимость скорости течения и числа Рейнольдса от управляющих параметров — силы и частоты тока, питающего обмотки измерительного индуктора. Эти данные необходимы для оценки возмущения, которое измерительная система вносит в поток, что влияет на точность измерений расхода транзитных течений в каналах.

Значение частоты тока на катушках 75 Гц является пороговым: при меньшей частоте структура течения представляет собой крупномасштабный полоидальный вихрь. При частоте более 75 Гц число вихрей возрастает в 2 раза, однако предельные значения среднего профиля не меняются.

Заключение. Экспериментальное исследование вихревых течений, формирующихся во время работы измерительных индукторов, позволило оценить возможное влияние этих течений на процесс измерения расхода. В отличие от других маломощных систем измерения расхода, рассмотренных в [6, 16], в этой системе генерация течения является неизбежным сопутствующим процессом, однако не критичным. Как и в [20–24, 31], течение оказалось нестабильным, при этом значения характерных частот колебаний (доли герц) существенно ниже, чем значение частоты, на которой происходит работа индуктора в режиме генерации течения (десятки герц). Частота измерительной системы расходомера также существенно выше (десятки герц). Поэтому колебания вихрей не должны отражаться на том диапазоне спектра, в котором проводятся измерения. Конфигурация 2 является более предпочтительным выбором по сравнению с конфигурацией 1, так как с ростом силы тока частота колебания вихрей снижается, а не увеличивается, как в конфигурации 1. Исходя из полученных данных, для корректной работы измерительной системы следует выбирать режимы генерации магнитного поля с частотой тока до 75 Гц и силой тока до 8 А. Такие значения обеспечат создание вихревого течения умеренной интен-

сивности, что не повлияет на точность измерения расхода. На основе полученных данных разработан и испытан накладной бесконтактный расходомер для жидких металлов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Eckert S., Cramer A., Gerbeth G. Velocity measurement techniques for liquid metal flows. In: *Magneto hydrodynamics. Fluid Mechanics and Its Applications*, vol. 80. Dordrecht, Springer, 2007, pp. 275–294.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4833-3_17
- [2] Шерклиф Д. Теория электромагнитного измерения расхода. М., Мир, 1965.
- [3] Fisher A.E., Kolemen E., Hvasta M.G. Experimental demonstration of hydraulic jump control in liquid metal channel flow using Lorentz force. *Phys. Fluids*, 2018, vol. 30, iss. 6, art. 067104. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5026993>
- [4] Thess A., Votyakov E.V., Kolesnikov Y. Lorentz force velocimetry. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, iss. 16, art. 164501. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.164501>
- [5] von Weissenfluh T. Probes for local velocity and temperature measurements in liquid metal flow. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1985, vol. 28, iss. 8, pp. 1563–1574.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(85\)90258-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90258-3)
- [6] Schulenberg T., Stieglitz R. Flow measurement techniques in heavy liquid metals. *Nucl. Eng. Des.*, 2010, vol. 240, iss. 9, pp. 2077–2087.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.11.017>
- [7] Брановер Г.Г., Цинобер А.Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. М., Наука, 1970.
- [8] Adamovskii L.A., Golovanov V.V., Inkin Yu.N., et al. Calibration of nonlinear magnetic flowmeters in the sodium circuits of fast power reactors. *At. Energy*, 1987, vol. 62, no. 2, pp. 145–148. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01123670>
- [9] Belyaev I.A., Razuvanov N.G., Sviridov V.G., et al. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals. *Flow Meas. Inst.*, 2017, vol. 55, pp. 37–43.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.05.004>
- [10] Архипов В.М. Техника работы с натрием на АЭС. М., Энергоатомиздат, 1986.
- [11] Лиелпетер Ю. Индукционные МГД машины для жидкого металла. Рига, Зинатне, 1969.
- [12] Кузнецов И., Поплавский В. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М., ИздАт, 2012.
- [13] Timofeev V.N., Khatsayuk M.Y. Theoretical design fundamentals for MHD stirrers for molten metals. *Magneto hydrodynamics*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 495–506.
- [14] Боришанский В., Кутателадзе С., Новиков И. и др. Жидкометаллические теплоносители. М., Атомиздат, 1967.
- [15] Ratajczak M., Hernández D., Richter T., et al. Measurement techniques for liquid metals. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 228, art. 012023.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/228/1/012023>

- [16] Forbriger J., Stefani F. Transient eddy current flow metering. *Meas. Sci. Technol.*, 2015, vol. 26, no. 10, art. 105303. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/10/105303>
- [17] Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Force-free and contactless sensor for electromagnetic flowrate measurements. *Magnetohydrodynamics*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 451–458.
- [18] Kumar M., Tordjeman P., Bergez W., et al. Towards quantitative void fraction measurement with an eddy current flowmeter for fourth generation sodium cooled fast reactors: a simplified model. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2016, vol. 63, iss. 3, pp. 1471–1476. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2542191>
- [19] Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Contactless electromagnetic phase-shift flowmeter for liquid metals. *Meas. Sci. Technol.*, 2011, vol. 22, no. 5, art. 055402. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/5/055402>
- [20] 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, pp. 45–52.
- [21] 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, с. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-4-11-18>
- [22] Losev G., Kolesnichenko I. Structure of MHD vortex flows in a thin layer of liquid metal. *Magnetohydrodynamics*, 2019, vol. 55, no. 1-2, pp. 97–106.
- [23] Losev G., Khalilov R., Kolesnichenko I. UDV study of a liquid metal vortex flow. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 208, art. 012022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/208/1/012022>
- [24] Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry. *Flow Meas. Inst.*, 2020, vol. 75, art. 101786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101786>
- [25] Brito D., Nataf H., Cardin P., et al. Ultrasonic Doppler velocimetry in liquid gallium. *Exp. Fluids*, 2001, vol. 31, no. 6, pp. 653–663. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003480100312>
- [26] Nowak M. Wall shear stress measurement in a turbulent pipe flow using ultrasound Doppler velocimetry. *Exp. Fluids*, 2002, vol. 33, no. 2, pp. 249–255. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-002-0407-x>
- [27] Kolesnichenko I., Pavlinov A., Golbraikh E., et al. The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields. *Exp. Fluids*, 2015, vol. 56, no. 5, art. 88. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1957-z>
- [28] Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. М., Ижевск, Регулярная и хаотическая динамика, 2010.
- [29] Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Academic Press, 2008.

[30] Озерных В.С., Лосев Г.Л., Голбрайт Е. и др. Начальная стадия формирования вихревого течения в индукторе с вращающимися встречно магнитными полями. *Вычислительная механика сплошных сред*, 2024, т. 16, № 4, с. 493–503.

DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.4.41>

[31] Frick P., Mandrykin S., Eltischev V., et al. Electro-vortex flows in a cylindrical cell under axial magnetic field. *J. Fluid Mech.*, 2022, vol. 949, art. A20.

DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.746>

Озерных Владимир Сергеевич — младший научный сотрудник лаборатории технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН (Российская Федерация, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1).

Колесниченко Илья Владимирович — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН (Российская Федерация, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Озерных В.С., Колесниченко И.В. Влияние локализованных переменных магнитных полей на течение жидкого металла. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 2 (119), с. 4–19. EDN: HGJGYA

THE INFLUENCE OF LOCALIZED ALTERNATING MAGNETIC FIELDS ON THE FLOW OF LIQUID METAL

V.S. Ozernykh

ozernykh.v@icmm.ru

I.V. Kolesnichenko

kiv@icmm.ru

ICMM UB RAS, Perm, Russian Federation

Abstract

In metallurgy and power engineering, where liquid metal is used as a coolant, it is necessary to accurately measure the current characteristics of the liquid metal flow, since they determine the operating modes of the installations. The aim of the study is an experimental investigation of local flows that occur in liquid metal under the action of electromagnetic forces to assess their contribution to the overall flow measurement process. The study of oscillations of the vortex flow of liquid metal in a flat layer created by electromagnetic forces was conducted. The flow structure depends on the frequency of the current feeding the inductor. The flow intensity is determined by the current strength: the higher the current, the more intense the

Keywords

Magnetohydrodynamics, liquid metal, vortex flow, flow measurement, ultrasonic Doppler anemometer

flow. The threshold value of the current frequency is determined, exceeding which the number of vortices in the system increases, the Reynolds number is higher than 3 000, which allows us to talk about the turbulent nature of the flow. At a lower current frequency, the flow structure is a single large-scale poloidal vortex. The parameters of the current frequency up to 75 Hz and the current strength up to 8 A are selected, ensuring the correct operation of the measuring system. In this case, the vortex flow has a moderate intensity, which does not negatively affect the accuracy of flow measurement

Received 19.06.2024

Accepted 16.10.2024

© Author(s), 2025

The work was carried out within the framework of a state-funded project (reg. no. 122030200191-9)

REFERENCES

- [1] Eckert S., Cramer A., Gerbeth G. Velocity measurement techniques for liquid metal flows. In: *Magneto hydrodynamics. Fluid Mechanics and Its Applications*, vol. 80. Dordrecht, Springer, 2007, pp. 275–294. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4833-3_17
- [2] Shercliff J.A. The theory of electromagnetic flow-measurement. Cambridge Univ. Press, 1962.
- [3] Fisher A.E., Kolemen E., Hvasta M.G. Experimental demonstration of hydraulic jump control in liquid metal channel flow using Lorentz force. *Phys. Fluids*, 2018, vol. 30, iss. 6, art. 067104. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5026993>
- [4] Thess A., Votyakov E.V., Kolesnikov Y. Lorentz force velocimetry. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, iss. 16, art. 164501. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.164501>
- [5] von Weissenfluh T. Probes for local velocity and temperature measurements in liquid metal flow. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1985, vol. 28, iss. 8, pp. 1563–1574. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(85\)90258-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90258-3)
- [6] Schulenberg T., Stieglitz R. Flow measurement techniques in heavy liquid metals. *Nucl. Eng. Des.*, 2010, vol. 240, iss. 9, pp. 2077–2087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.11.017>
- [7] Branover G.G., Tsinober A.B. Magnitnaya gidrodinamika neszhimaemykh sred [Magnetic hydrodynamics of incompressible media]. Moscow, Nauka Publ., 1970.
- [8] Adamovskii L.A., Golovanov V.V., Inkin Yu.N., et al. Calibration of nonlinear magnetic flowmeters in the sodium circuits of fast power reactors. *At. Energy*, 1987, vol. 62, no. 2, pp. 145–148. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01123670>
- [9] Belyaev I.A., Razuvanov N.G., Sviridov V.G., et al. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals. *Flow Meas. Inst.*, 2017, vol. 55, pp. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.05.004>

- [10] Arkhipov V.M. Tekhnika raboty s natriem na AES [Technique of work with sodium at NPPs]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986.
- [11] Lielpeter Yu. Induktsionnye MGD mashiny dlya zhidkogo metalla [Induction MHD machines for liquid metal]. Riga, Zinatne Publ., 1969.
- [12] Kuznetsov I., Poplavskiy V. Bezopasnost AES s reaktorami na bystrykh neytronakh [Safety of NPPs with fast reactors]. Moscow, IzdAt Publ., 2012.
- [13] Timofeev V.N., Khatsayuk M.Y. Theoretical design fundamentals for MHD stirrers for molten metals. *Magnetohydrodynamics*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 495–506.
- [14] Borishanskiy V., Kutateladze S., Novikov I., et al. Zhidkometallicheskie teplonositeli [Liquid-metallic heat transfer fluids]. Moscow, Atomizdat Publ., 1967.
- [15] Ratajczak M., Hernández D., Richter T., et al. Measurement techniques for liquid metals. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 228, art. 012023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/228/1/012023>
- [16] Forbriger J., Stefani F. Transient eddy current flow metering. *Meas. Sci. Technol.*, 2015, vol. 26, no. 10, art. 105303. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/10/105303>
- [17] Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Force-free and contactless sensor for electromagnetic flowrate measurements. *Magnetohydrodynamics*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 451–458.
- [18] Kumar M., Tordjeman P., Bergez W., et al. Towards quantitative void fraction measurement with an eddy current flowmeter for fourth generation sodium cooled fast reactors: a simplified model. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2016, vol. 63, iss. 3, pp. 1471–1476. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2542191>
- [19] Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Contactless electromagnetic phase-shift flowmeter for liquid metals. *Meas. Sci. Technol.*, 2011, vol. 22, no. 5, art. 055402. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/5/055402>
- [20] 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, pp. 45–52.
- [21] Losev G., Khalilov R., Kolesnichenko I. Experimental investigation of characteristics of liquid metal flow generated by alternating magnetic field. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika* [Bulletin of Perm University. Physics], 2017, no. 4, pp. 11–18 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-4-11-18>
- [22] Losev G., Kolesnichenko I. Structure of MHD vortex flows in a thin layer of liquid metal. *Magnetohydrodynamics*, 2019, vol. 55, no. 1-2, pp. 97–106.
- [23] Losev G., Khalilov R., Kolesnichenko I. UDV study of a liquid metal vortex flow. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 208, art. 012022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/208/1/012022>
- [24] Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry. *Flow Meas. Inst.*, 2020, vol. 75, art. 101786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101786>

- [25] Brito D., Nataf H., Cardin P., et al. Ultrasonic Doppler velocimetry in liquid gallium. *Exp. Fluids*, 2001, vol. 31, no. 6, pp. 653–663.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s003480100312>
- [26] Nowak M. Wall shear stress measurement in a turbulent pipe flow using ultrasound Doppler velocimetry. *Exp. Fluids*, 2002, vol. 33, no. 2, pp. 249–255.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-002-0407-x>
- [27] Kolesnichenko I., Pavlinov A., Golbraikh E., et al. The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields. *Exp. Fluids*, 2015, vol. 56, no. 5, art. 88. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1957-z>
- [28] Frik P.G. Turbulentnost: podkhody i modeli [Turbulence: approaches and models]. Moscow, Izhevsk, Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ., 2010.
- [29] Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Academic Press, 2008.
- [30] Ozernykh V.S., Losev G.L., Golbraykh E., et al. Initial stage of formation of vortex flow in an inductor with counter-rotating magnetic fields. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], 2024, vol. 16, no. 4, pp. 493–503 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.4.41>
- [31] Frick P., Mandrykin S., Eltischev V., et al. Electro-vortex flows in a cylindrical cell under axial magnetic field. *J. Fluid Mech.*, 2022, vol. 949, art. A20.
DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.746>

Ozernykh V.S. — Junior Researcher, Laboratory of Technological Hydrodynamics, ICMM UB RAS (Koroleva ul. 1, Perm, 614013 Russian Federation).

Kolesnichenko I.V. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of Laboratory of Technological Hydrodynamics, ICMM UB RAS (Koroleva ul. 1, Perm, 614013 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ozernykh V.S., Kolesnichenko I.V. The influence of localized alternating magnetic fields on the flow of liquid metal. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 2 (119), pp. 4–19 (in Russ.). EDN: HGJGYA