

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПО ПОТОКУ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

**И.В. Колесниченко<sup>1</sup>, В.С. Озерных<sup>1</sup>, Е. Гольбрайх<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

<sup>2</sup> Университет им. Бен Гуриона, Беер-Шева, Израиль

E-mail: kiv@icmm.ru

**Аннотация.** Работа посвящена разработке способа измерения скорости изотермического потока жидкого металла в цилиндрическом канале. Предлагаемый способ измерения не требует калибровки и является бесконтактным. Он основывается на корреляционной методике. Генерация пульсаций осуществляется с помощью индукторов вращающегося магнитного поля. Пульсации аксиальной компоненты скорости фиксируются с помощью регистрации электромагнитного отклика локальных измерителей скорости. Показано, что при малом количестве импульсов величина корреляционной функции мала, что не позволяет надежно измерять скорость, даже при увеличении интенсивности пульсаций. Получено, что высокая степень корреляции для данной методики достигается при существенном увеличении количества импульсов, что влечет за собой увеличение длительности измерений.

*Ключевые слова:* измерение скорости потока жидкого металла; магнитная гидродинамика; корреляционный способ определения расхода жидкого металла.

### Введение

В металлургии и энергетике, где применяется жидкий металл в качестве теплоносителя, необходимо точно измерять текущие характеристики потока жидкого металла, так как они определяют режимы работы установок [1]. Высокая электрическая проводимость жидких металлов дает возможность эффективного управления его потоками с помощью электромагнитных сил [2], а также электромагнитного измерения расхода [3]. Электромагнитные силы генерируются в расплавах с помощью индукционных аппаратов [4], расположенных от них на некотором удалении, т. е. бесконтактно. Наиболее востребованными являются простые технологические каналы с отсутствием внутри них перегородок, датчиков, нагревательных элементов и т. д. Этот факт усложняет конструкции как систем генерации транзитного течения, так и систем контроля характеристик транзитного течения. Поэтому основное преимущество дает отсутствие прямого контакта жидких металлов с аппаратами – они контактируют только со стенкой канала. Существуют бесконтактные методы расходомерии, основанные на измерении электромагнитной силы [5], на измерении искажения магнитного поля потоком [6, 7], на измерении воздействия потока на вращающийся магнит [8]. Основной недостаток этих методик заключается в необходимости калибровки.

В работе предлагается корреляционный способ определения расхода жидкого металла, заключающийся в регистрации флуктуаций магнитного поля в двух измерительных сечениях, расположенных на известном расстоянии друг от друга, и измерении времени пролета флуктуациями этих измерительных сечений, по которому судят о расходе жидкого металла (рис. 1, слева). Для этого при помощи индукторов переменного вращающегося поля (рис. 1, справа), включенных сонаправленно либо противоположно направлено в непрерывном либо импульсном режиме, генерируют возмущения поля скорости в плоскости, ортогональной направлению основного потока [9]. Регистрация флуктуаций реализуется также при помощи электромагнитных методов. Созданные разнонаправленно вращающиеся магнитные поля создают мелкомасштабные флуктуации скорости небольшой интенсивности, преимущественно в плоскости сечения трубы. В данной работе мы акцентируем свое внимание на пульсации той компоненты скорости, которая направлена вдоль потока. Будут ли эти флуктуации скорости надежно зафиксированы регистрирующими индукторами и не потеряют ли свою интенсивность при перемещении потоком по рабочему каналу – предстоит выяснить в данном исследовании. Целью работы является выяснение возможности измерения скорости транзитного течения с помощью корреляционной методики на основе анализа некоторых вариантов конфигурации системы генерации гидродинамических импульсов.

## Методы исследования

Концептуальная постановка задачи заключается в поиске наиболее рациональной конструкции для реализации корреляционной бесконтактной методики регистрации расхода в канале 1 с жидким металлом (рис. 1). В качестве генератора пульсаций 2 решено использовать индуктор вращающегося магнитного поля [10]. Вращающееся магнитное поле создает не только вращающееся течение жидкого металла, но и вторичные полоидальные течения [10] вследствие ограниченности размера индуктора (рис. 1), или наличия экмановской подкачки при присутствии твердых торцевых стенок. Встречные вращающиеся магнитные поля существенно усложняют структуру течения, которое в том числе является предметом исследования этапа проекта. Поток после прохождения через индуктор 2 будет содержать пульсации (см. рис. 1), которые регистрируются измерительным модулем 3. Регистрирующий модуль реагирует на пульсации аксиальной компоненты скорости методом кондукционной анемометрии [3], поэтому в статье изучается поведение именно этих пульсаций.

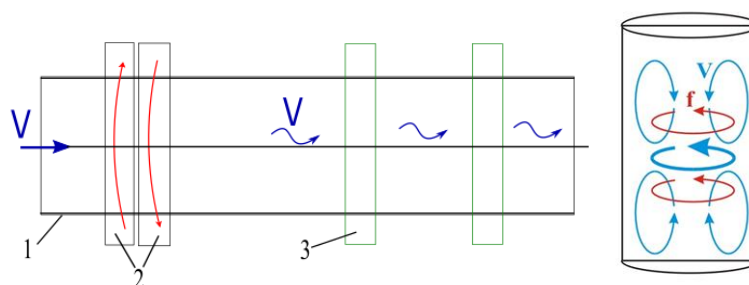


Рис. 1. Схема охватывающего индукционного расходомера (слева), схема генерации вращающегося магнитного поля (справа)

Исследование проводится с помощью математического моделирования. Математическая модель основана на уравнениях магнитной гидродинамики в безындукционном приближении и подробно описана в [11, 12]. Модель реализована в программной среде Ansys и верифицирована на результатах экспериментов, проводимых на галлиевых установках и галлиевом контуре [11, 12]. С ее помощью исследуется распространение пульсаций по потоку жидкого металла с целью их регистрации и восстановления значения скорости с помощью кросскорреляционной методики. В данном исследовании в генерирующем модуле направление вращающихся магнитных полей было встречным: одно вращалось по часовой стрелке, другое – против относительно оси канала. Генерирующий модуль работает в импульсном режиме с длительностью импульса 1–2 с и временем между импульсами 5–10 с. Скорость транзитного потока равна 0,1 и 0,2 м/с. Индуктор вращающегося магнитного поля описан в [13]. Он вызывал генерацию течения, азимутальная скорость которого примерно на порядок меньше скорости транзитного течения. Ток на питающих обмотках равен 1 А. Длина канала равна 0,5 м, диаметр 0,1 м, рабочая жидкость – жидкий натрий. Начало координат располагается на оси цилиндрического канала и связано с положением центра генерирующего модуля. Ось OZ направлена вдоль канала, а оси OX и OY лежат в плоскости, ортогональной оси OZ, и образуют правую тройку векторов. Расстояние от первого датчика до генерирующего модуля равно 0,3 м, а расстояние между датчиками 0,1 м. При построении результатов формируется так называемая диаграмма профиля скорости течения (рис. 2). По вертикальной оси диаграммы отложена координата, вдоль которой строится профиль. По горизонтальной оси откладывается время. В каждый момент времени строится профиль и для их совместного отображения на одном рисунке используется цветовая шкала. Наиболее удобно наблюдать за развитием течения [12] именно с помощью подобных диаграмм, так как на них хорошо видна эволюция пульсаций скорости вдоль потока. Скорость транзитного потока определяется с помощью корреляционного анализа аксиальной компоненты скорости в двух выбранных точках вдоль потока по методике, описанной в [14].

## Результаты

Результаты исследования для избранных конфигураций показали, что данная методика регистрации скорости может быть реализована, но при этом существуют ограничения, влияющие на точность измерений. На примере четырех вариантов набора параметров будут показаны эти особенности. Вариант 1 демонстрирует существенно ограниченный по времени интервал записи

сигнала. Этот короткий интервал времени измерения оказался недостаточен для накопления статистики. Тем не менее, на примере этого варианта можно проиллюстрировать вид карт эволюции профиля скорости (см. рис. 2) и разверток сигналов в измеряемых областях (рис. 3). Именно между этими сигналами определяется корреляционная функция (рис. 10, а). Видно, что в данном случае величина корреляционной функции крайне мала, что делает невозможным измерение скорости.

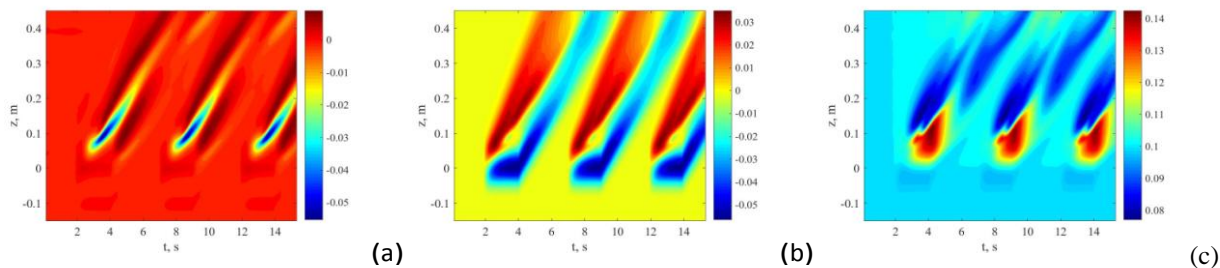


Рис. 2. Карта профилей компоненты скорости вдоль оси канала (а) –  $V_x$ , (б) –  $V_y$ , (с) –  $V_z$ . Вариант 1: скорость транзитного течения  $V = 0,1\text{ м/с}$ , период между импульсами 5 с, длительность импульсов 2 с

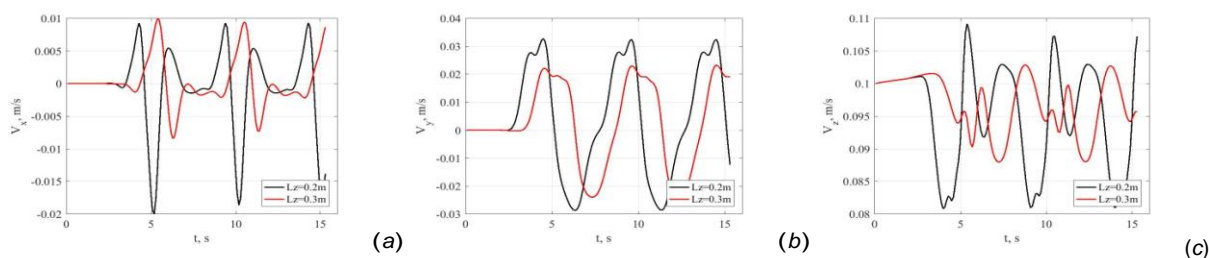


Рис. 3. Эволюции значений компоненты скорости в двух точках вдоль оси канала, в которых вычисляются кросс-корреляции: (а) –  $V_x$ , (б) –  $V_y$ , (с) –  $V_z$ . Вариант 1

В следующем варианте набора параметров исследовалось то, как увеличение интенсивности вращающегося течения повлияет на корреляционную функцию при небольшом увеличении времени регистрации сигнала (количества импульсов). Оказалось, что применение чрезмерно интенсивной электромагнитной силы для достижения сильного всплеска также не является рациональным выбором. На рис. 4 и 5 видно, что, хотя и интенсивность течения существенно возросла, это не помогает надежно восстановить значение скорости (см. рис. 10, б).

Тем не менее увеличение количества импульсов положительно сказывается на способности системы определять скорость – пики корреляционной функции стали ближе друг к другу. Следующий набор параметров демонстрирует возможность проводить измерения скорости при умеренном значении интенсивности вращающегося течения (рис. 6 и 7), о чем свидетельствует корреляционная функция (см. рис. 10, с). В данном случае корреляционная функция для поперечных компонент скорости показывает высокие значения, для продольной компоненты – недостаточные для осуществления надежных измерений.

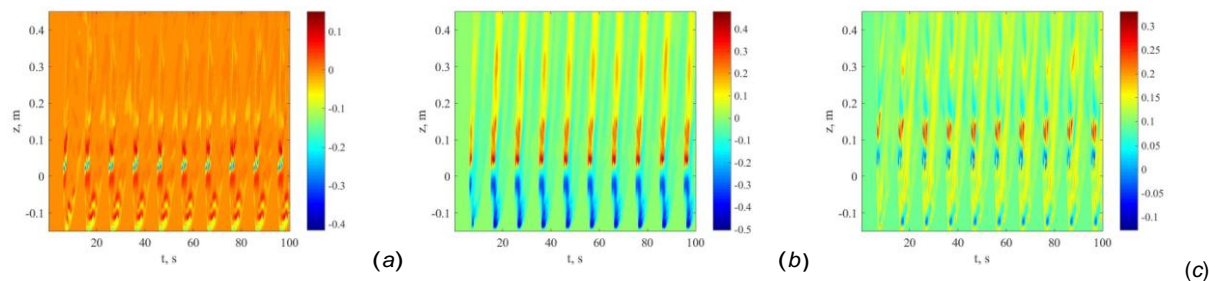


Рис. 4. Карта профилей компоненты скорости вдоль оси канала (а) –  $V_x$ , (б) –  $V_y$ , (с) –  $V_z$ . Вариант 2: скорость транзитного течения  $V = 0,1\text{ м/с}$ , период между импульсами 10 с, длительность импульсов 2 с. Электромагнитная сила в 100 раз больше, чем в других вариантах

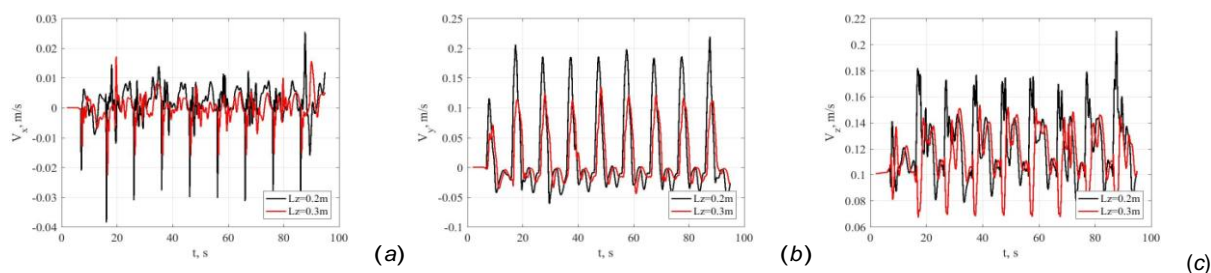


Рис. 5. Эволюции значений компоненты скорости в двух точках вдоль оси канала, в которых вычисляются кросс-корреляции: (a) –  $V_x$ , (b) –  $V_y$ , (c) –  $V_z$ . Вариант 2

Увеличение времени измерений, т. к. количества импульсов, существенно улучшает результат определения скорости с помощью данной методики (рис. 8, 9; 10, d). В данном случае корреляционная функция показывает наивысшую степень корреляции для всех трех компонент скорости и точно восстанавливает значение скорости потока. Это достигается высокой ценой – нужна статистика в 800 с. Таким образом, реализовать корреляционную методику измерения с использованием пульсаций продольной компоненты скорости возможно в тех случаях, когда допустимо проводить такие длительные замеры для накопления статистики.

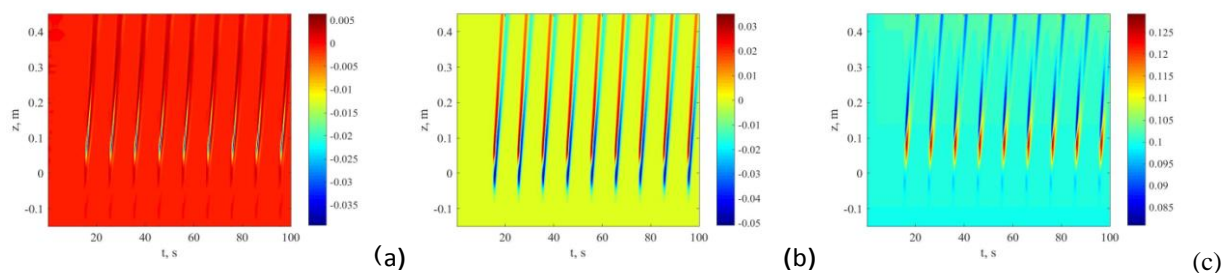


Рис. 6. Карта профилей компоненты скорости вдоль оси канала (a) –  $V_x$ , (b) –  $V_y$ , (c) –  $V_z$ . Вариант 3: скорость транзитного течения  $V = 0,1\text{м/с}$ , период между импульсами 10 с, длительность импульсов 1 с

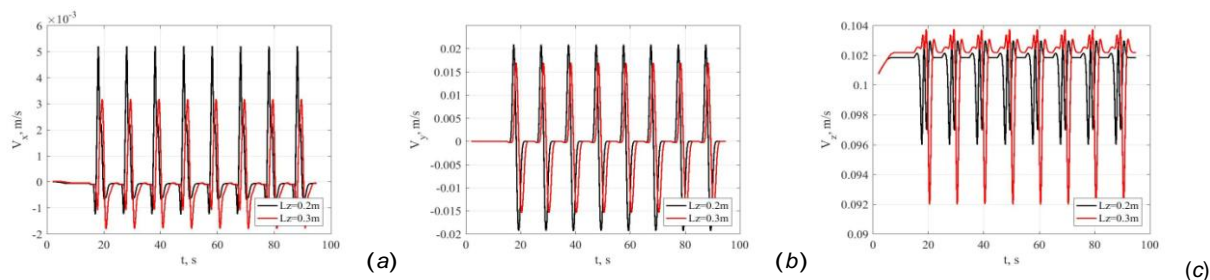


Рис. 7. Эволюции значений компонент скорости  $V_z$  в двух точках вдоль оси канала, в которых вычисляются кросс-корреляции: (a) –  $V_x$ , (b) –  $V_y$ , (c) –  $V_z$ . Вариант 3

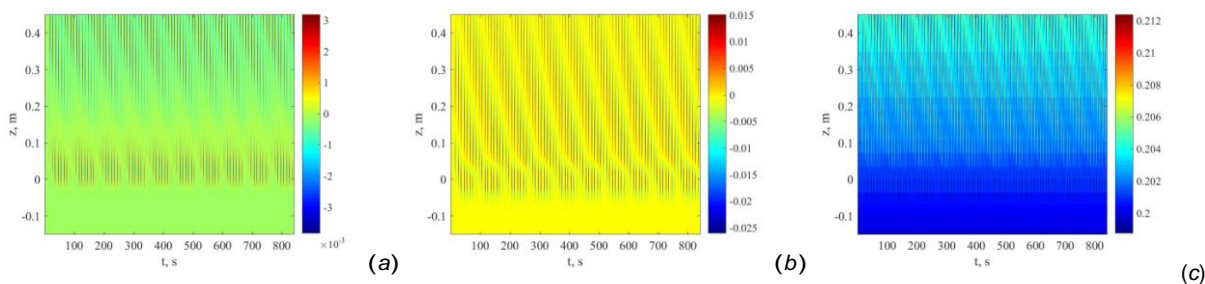


Рис. 8. Карта профилей компоненты скорости вдоль оси канала (a) –  $V_x$ , (b) –  $V_y$ , (c) –  $V_z$ . Вариант 4: скорость транзитного течения  $V = 0,2\text{м/с}$ , период между импульсами 10 с, длительность импульсов 1 с

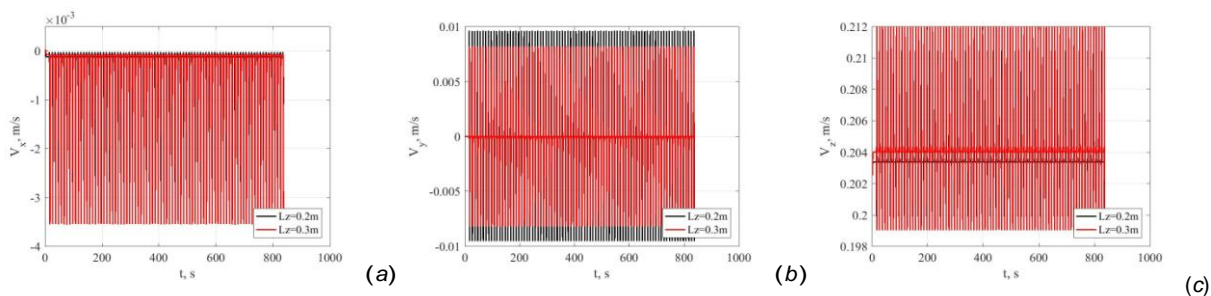


Рис. 9. Эволюции значений компонент скорости в двух точках вдоль оси канала, в которых вычисляется кросс-корреляция: (а) –  $V_x$ , (б) –  $V_y$ , (с) –  $V_z$ . Вариант 4

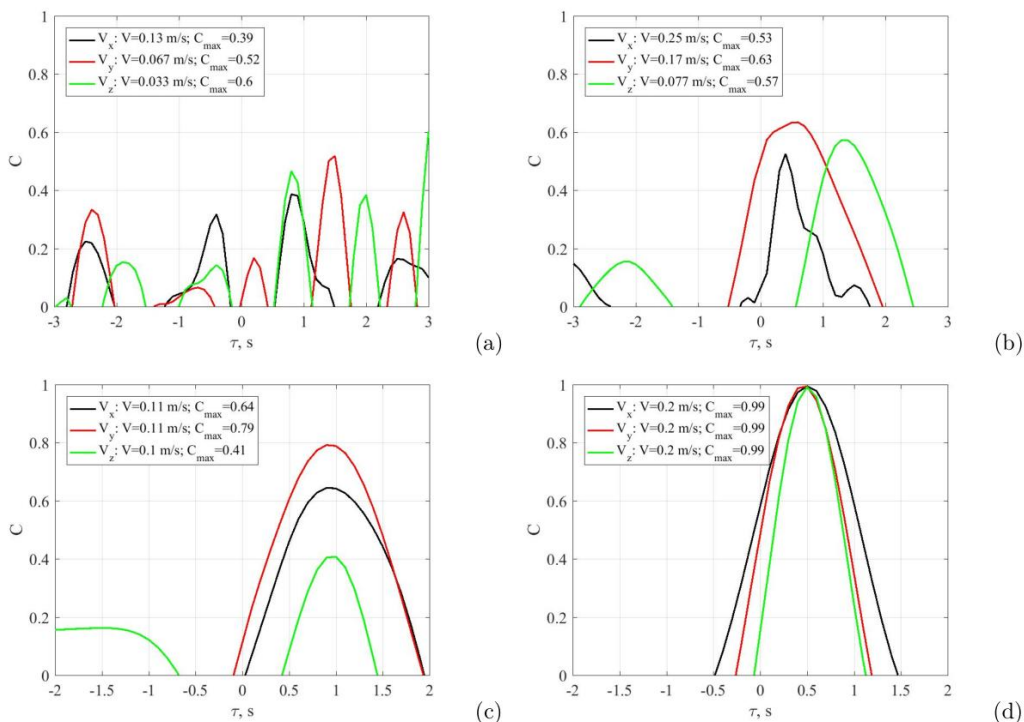


Рис. 10. Корреляционные функции двух сигналов в двух точках вдоль канала, варианты конфигурации которых показаны выше: (а) – вариант 1, (б) – вариант 2, (с) – вариант 3, (д) – вариант 4

### Заключение

В работе изучена возможность реализации корреляционной методики измерения скорости транзитного потока жидкого металла в цилиндрическом канале на основе измерения пульсации аксиальной компоненты скорости. Исследование показало, что для всех изученных режимов генерации пульсации, реализуемой электромагнитным индуктором, всплеск скорости практически не теряет своей интенсивности вдоль потока. Результаты исследования показали, что для надежного определения с помощью регистрирующего модуля интервала времени между пульсациями необходимо проводить достаточно длительные измерения. Для коротких интервалов измерений – при небольшом количестве импульсов – величина корреляционной функции для пульсаций аксиальной компоненты скорости оказалось малой, что не позволяет надежно измерять значения скорости. Повышение интенсивности импульсов также не способствует увеличению величины корреляционной функции. Таким образом, если в данной методике регистрации скорости есть возможность проводить длительные измерения для накопления статистики, то она может быть применена. Для систем с быстро изменяющимися параметрами, переходными процессами, реализация именно этой методики измерения скорости встретит большие затруднения. Следует отметить, что в большинстве систем течения относительно стабильны, поэтому для них эта методика является подходящей. Результаты научного исследования позволили получить параметры конструкции, которые легли в основу разрабатываемого индукционного расходомера. Он имеет сле-

дующие преимущества над имеющимися аналогами [5–8]: отсутствие ограничений на поток контрольной жидкости (например, неизотермичность); повышение достоверности метода за счёт того, что проводятся прямые, а не косвенные измерения поля скорости; расширение диапазонов расхода контрольной жидкости и диаметров трубопровода, отсутствие необходимости калибровки.

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

### Литература

1. Архипов, В.М. Техника работы с натрием на АЭС / В.М. Архипов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 133 с.
2. Лиелпетер, Я.Я. Индукционные МГД машины / Я.Я. Лиелпетер. – Рига: Зинатне, 1969. – 246 с.
3. Schulenberg, T. Flow Measurement Techniques in Heavy Liquid Metals / T. Schulenberg, R. Stieglitz // Nuclear Engineering and Design. – 2010. – Vol. 240, Iss. 9. – P. 2077–2087.
4. Кузнецов, И., Поплавский В. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах / И. Кузнецов, В. Поплавский. – М.: ИздАт, 2012. – 631 с.
5. Thess, A. Lorentz Force Velocimetry / A. Thess, E. Votyakov, Y. Kolesnikov // Physical review letters. – 2006. – Vol. 96, Iss. 16. – P. 164501(4).
6. Forbriger, J. Transient Eddy Current Flow Metering / J. Forbriger, F. Stefani // Measurement Science and Technology. – 2015. – Vol. 26, no. 10. – P. 105303.
7. Design, Development and Performance Testing of Fast Response Electronics for Eddy Current Flowmeter in Monitoring Sodium Flow / S. Poornapushpakala, C. Gomathy, J. Sylvia, B. Babu // Flow Measurement and Instrumentation. – 2014. – Vol. 38. – P. 98–107.
8. Priede, J. Force-Free and Contactless Sensor for Electromagnetic Flowrate Measurements / J. Priede, D. Buchenau, G. Gerbeth // Magnetohydrodynamics. – 2009. – Vol. 45, no. 3. – P. 451–458.
9. Пат. 2791036 Российская Федерация. Корреляционный способ определения расхода жидкого металла и безэлектродный электромагнитный расходомер жидкого металла «ПИР» (Пермский индукционный расходомер) для его осуществления / И. Колесниченко, Р. Халилов, А. Мамыкин. Заявл. 24.06.2022. Опубл. 01.03.2022, Бюл. 7.
10. The Study of Turbulence in MHD Flow Generated by Rotating and Traveling Magnetic Fields / I. Kolesnichenko, A. Pavlinov, E. Golbraikh. *et al.* // Experiments in Fluids. – 2015. – Vol. 56. – P. 88.
11. Колесниченко, И. Экстремум зависимости напора электромагнитного насоса для жидкого металла от частоты питающего тока / И. Колесниченко, Р. Халилов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15. – С. 495–506.
12. Evolution of a Strong Electrosvortex Flow in a Closed Cell / I. Kolesnichenko, P. Frick, V. Eltishchev *et al.* // Physical Review Fluid. – 2020. – Vol. 5, Iss. 12. – P. 123703.
13. Начальная стадия формирования вихревого течения в индукторе с вращающимися встречно магнитными полями / В.С. Озерных, Е. Голбрайх, Г.Л. Лосев, И.В. Колесниченко // Вычислительная механика сплошных сред (принята к публикации).
14. Application of the Temperature Correlation Method to Measuring the Flow Rate of Liquid Sodium / I Kolesnichenko., A. Mamukin, E. Golbraikh, A. Pavlinov // Magnetohydrodynamics. – 2021. – Vol. 57, no. 4. – P. 547–557.

*Поступила в редакцию 14 сентября 2023 г.*

### Сведения об авторах

Колесниченко Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией технологической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация, e-mail: kiv@icmm.ru.

Озерных Владимир Сергеевич – младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация, e-mail: ozernykh.v@icmm.ru.

Гольбрайх Ефим – Ph.D., доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физики, Университет им. Бен Гуриона, Беер-Шева, Израиль, e-mail: golbref@bgu.ac.il.

## TRANSFER OF PULSES ALONG A LIQUID METAL FLOW

I.V. Kolesnichenko<sup>1</sup>, V.S. Ozernykh<sup>1</sup>, E. Golbraikh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Ben-Gurion University of the Negev, Beersheba, Israel

E-mail: kiv@icmm.ru

**Abstract.** This work develops a method for measuring the speed of an isothermal flow of liquid metal in a cylindrical channel. The method does not require calibration, is non-contact and is based on a correlation technique. The generation of pulses is carried out using rotating magnetic field inductors. Pulses of the axial velocity component are recorded by recording the electromagnetic response of local velocity meters. It is shown that with a small number of pulses, the value of the correlation function is small, which does not allow the velocity to be reliably measured, even with increasing pulse intensity. Conversely, a high degree of correlation for this technique is achieved with a significant increase in the number of pulses, which entails an increase in the duration of measurements.

**Keywords:** measurement of liquid metal flow velocity; magnetic hydrodynamics; correlation method for determining liquid metal consumption.

### References

1. Arhipov V.M. *Tekhnika raboty s natriem na AES* (Techniques for Working with Sodium at Nuclear Power Plants). Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, p. 136. (in Russ.).
2. Lielpeter Ya.Ya. *Zhidkometallicheskie induktsionnye MGD-mashiny* (Induction MHD Machines). Riga: Zinatne Publ., 1969, 246 p. (in Russ.).
3. Schulenberg T., Stieglitz R. Flow Measurement Techniques in Heavy Liquid Metals. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, Vol. 240, Iss. 9, pp. 2077–2087. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.11.017
4. Kuznecov I., Poplavskij V. *Bezopasnost' AES s reaktorami na bystryh nejtronah* (Safety of Nuclear Power Plants with Fast Neutron Reactors). Moscow, Izdat, 2012, 631 p.
5. Thess A., Votyakov E., Kolesnikov Y. Lorentz Force Velocimetry. *Physical review letters*, 2006, Vol. 96, Iss. 16, P. 164501(4). DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.164501
6. Forbriger J., Stefani F. Transient Eddy Current Flow Metering. *Measurement Science and Technology*, 2015, Vol. 26, no. 10, P. 105303. DOI: 10.1088/0957-0233/26/10/105303
7. Poornapushpakala S., Gomathy C., Sylvia J., Babu B. Design, Development and Performance Testing of Fast Response Electronics for Eddy Current Flowmeter in Monitoring Sodium Flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, Vol. 38, pp. 98–107. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.05.004
8. Priede J., Buchenau D., Gerbeth G., Force-Free and Contactless Sensor for ElectroMagnetic Flowrate Measurements. *Magnetohydrodynamics*, 2009, Vol. 45, no. 3, pp. 451–458. DOI: 10.22364/mhd.45.3.19
9. Kolesnichenko I.V., Khalilov R.I., Mamykin A.D. Pat. RU 2791036. *Correlation Method for Determining the Flow Rate of Liquid Metal and Electrodeless Electromagnetic Flowmeter of Liquid Metal "PIF" (Perm Induction Flowmeter) for its Implementation*. Appl. 24.06.2022, Date of publication: 01.03.2023, Bull. no. 7.
10. 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, p. 88. DOI: 10.1007/s00348-015-1957-z
11. 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

12. Kolesnichenko I., Frick P., Eltishchev V., Mandrykin, S., Stefani F. Evolution of a Strong Electro vortex Flow in a Closed Cell. *Physical Review Fluid*, 2020, Vol. 5, Iss. 12, p. 123703. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.5.123703

13. Ozernyh V.S., Golbrajh E., Losev G.L., Kolesnichenko I.V. The Initial Stage of the Formation of a Vortex Flow in an Inductor with Rotating Counter Magnetic Fields. *Computational Continuum Mechanics* (to be published).

14. Kolesnichenko I., Mamykin A., Golbraikh E., Pavlinov A. Application of the Temperature Correlation Method to Measuring the Flow Rate of Liquid Sodium. *Magnetohydrodynamics*, 2021, Vol. 57, no. 4, pp. 547–557. DOI: 10.22364/mhd.57.4.9

*Received September 14, 2023*

### Information about the authors

Kolesnichenko Ilya Vladimirovich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Technological hydrodynamics, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMSS Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), Russian Federation, e-mail: kiv@icmm.ru.

Ozernykh Vladimir Sergeevich is Junior Research Fellow, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMSS Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), Perm, Russian Federation, e-mail: ozernykh.v@icmm.ru.

Golbraikh Efim is Ph.D., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Physics Department, Ben-Gurion University of the Negev, Beersheba, Israel, e-mail: golbref@bgu.ac.il.