

Received: 31.03.2023

Revised: 22.05.2023

Accepted: 23.06.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.017-028

**BASED ON THE TEMPERATURE CORRELATION PRINCIPLE,  
THE USE OF A MAGNETIC OBSTACLE TO GENERATE PULSATI  
ONS IN THE FLOW MEASUREMENT OF A LIQUID METAL COOLANT**

A. D. Mamykin<sup>1, a), \*</sup>, R. I. Khalilov<sup>1, b)</sup>, E. Golbraikh<sup>2, c)</sup>, and I. V. Kolesnichenko<sup>1, d)</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
1 Ak. Koroleva St., Perm, 6140013, Russia*

<sup>2</sup>*Department of Physics, Ben-Gurion University of the Negev,  
P.O. Box 653, Beer-Sheva, 84105, Israel*

- a)  <https://orcid.org/0000-0001-8213-0260>  [mad@icmm.ru](mailto:mad@icmm.ru);  
b)  <https://orcid.org/0000-0003-4244-4630>  [halilov@icmm.ru](mailto:halilov@icmm.ru);  
c)  <https://orcid.org/0000-0002-3678-7322>  [golbref@bgu.ac.il](mailto:golbref@bgu.ac.il);  
d)  <https://orcid.org/0000-0001-9378-5334>  [kiv@icmm.ru](mailto:kiv@icmm.ru)

\*Corresponding author. E-mail: [mad@icmm.ru](mailto:mad@icmm.ru)

Address for correspondence: ul. Ak. Koroleva, 1, Perm, 1614013, Russia

Tel.: +7 (342) 237-8387; fax: +7 (342) 237-8487

A promising method for determining the flow rate of a liquid metal coolant is the temperature correlation method (TCM) since it does not require calibration. However, being indirect, it has a number of limitations to be carefully studied. A magnetic obstacle is used as a temperature pulsation generator. The paper presents the results of a numerical study on the influence of the size of a magnetic obstacle and its activity ratio, as well as effect of the temperature difference between the liquid metal and the environment, on the performance and accuracy of the TCM. The main criteria influencing the operation of the method are identified, namely the extent and spatial position of the vorticity and mixing zones.

**Keywords:** flow measurement, flow meter, magnetic obstacle, liquid metals, coolant, turbulence, thermocouple measurements, numerical calculation, modeling, cross-correlation

### Acknowledgment

*The work was performed according to government budget plan No. 122030200191-9 and financially supported by the Perm Krai Government within the scientific project entitled The Development of Systems for Measuring the Flow of Liquid Metal in Ducts of Metallurgical and Nuclear Power Facilities.*

### References

1. Eckert S., Buchenau D., Gerbeth G., Stefani F. & Weiss F.-P. Some recent developments in the field of measuring techniques and instrumentation for liquid metal flows. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, vol. 48, No. 4, pp. 490–498. DOI: 10.1080/18811248.2011.9711724.
2. Pavlinov A., Khalilov R., Mamykin A., Kolesnichenko I. Electromagnetic flowmeter for wide-temperature range intensive liquid metal flows. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 581, pp. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/581/1/012011.

3. Ratajczak M., Hernández D., Richter T., Otte D., Buchenau D., Krauter N., Wondrak T. Measurement techniques for liquid metals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 228, pp. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/228/1/012023.
4. Li X., Yao X., Wang C., Zhu L. An improved electromagnetic flowmeter. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1584, pp. 012068. DOI: 10.1088/1742-6596/1584/1/012068.
5. Kolesnichenko I., Khalilov R., Shestakov A., Frick P. ICMM's two-loop liquid sodium facility. *Magnetohydrodynamics*, 2016, vol. 52, Nos. 1–2, pp. 87–94. DOI: 10.22364/mhd.52.1-2.11.
6. Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pavlinov A. A combined liquid sodium flow measurement system. *Magnetohydrodynamics*, 2016, vol. 52, Nos. 1–2, pp. 53–60. DOI: 10.22364/mhd.52.1-2.7.
7. Taylor G.I. The spectrum of turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A – Mathematical and Physical Sciences*, 1938, vol. 164, No. 919, pp. 476–490. DOI: 10.1098/rspa.1938.0032.
8. Benkert J., Mika C., Raes K.H., Stegemann D. Determination of thermocouple transfer-functions and fluid-flow velocities by temperature-noise measurements in liquid sodium. *Progress of Nuclear Energy*, 1977, vol. 1, iss. 2–4, pp. 553–563. DOI: 10.1016/0149-1970(77)90105-6.
9. Belyaev I.A., Razuvanov N.G., Sviridov V.G., Zagorsky V.S. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, vol. 55, pp. 37–43. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.05.004.
10. Votyakov E.V., Kassinos S.C. On the analogy between streamlined magnetic and solid obstacles. *Physics of Fluids*, 2009, vol. 21, iss. 9, pp. 097102. DOI: 10.1063/1.3231833.
11. Cuevas S., Smolentsev S., Abdou M. On the flow past a magnetic obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, vol. 553, pp. 227–252. DOI: 10.1017/S0022112006008810.
12. Votyakov E., Zienicke E., Kolesnikov Yu. Constrained flow around a magnetic obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 610, pp. 131–156. DOI: 10.1017/S0022112008002590.
13. Votyakov E.V., Kolesnikov Yu., Andreev O., Zienicke E., Thess A. Structure of the wake of a magnetic obstacle. *Physical Review Letters*, 2007, vol. 98, pp. 144504. DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.144504.
14. Kenjereš S., Ten Cate S., Voesenek C.J. Vortical structures and turbulent bursts behind magnetic obstacles in transitional flow regimes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2011, vol. 32, iss. 3, pp. 510–528. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.02.011.
15. Kenjereš S. Energy spectra and turbulence generation in the wake of magnetic obstacles. *Physics of Fluids*, 2012, vol. 24, iss. 11, pp. 115111. DOI: 10.1063/1.4767726.
16. Kenjereš S., Verdoold J., Tummers M. J., Hanjalić K., Kleijn C. R. Numerical and experimental study of electromagnetically driven vortical flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009, vol. 30, iss. 3, pp. 494–504. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.02.014.
17. Zhang X., Huang H. Effect of magnetic obstacle on fluid flow and heat transfer in a rectangular duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 51, pp. 31–38. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.011.
18. Votyakov E.V., Kassinos S.C. Core of the magnetic obstacle. *Journal of Turbulence*, 2010, vol. 11, article No. 49. DOI: 10.1080/14685248.2010.524220.
19. 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.

Подана в журнал: 31.03.2023

УДК 537.84, 532.57.08

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.017-028

## ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИ РАСХОДОМЕТРИИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ, ОСНОВАННОЕ НА ПРИНЦИПЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

А. Д. Мамыкин<sup>1, а), \*</sup>, Р. И. Халилов<sup>1, б)</sup>, Е. Голбрайх<sup>2, в)</sup>, И. В. Колесниченко<sup>1, г)</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Университет имени Давида Бен-Гуриона в Негеве, п/я № 653, Беэр-Шева, 84105, Израиль

- <sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8213-0260>  [mad@icmm.ru](mailto:mad@icmm.ru);  
<sup>б)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4244-4630>  [halilov@icmm.ru](mailto:halilov@icmm.ru);  
<sup>в)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-3678-7322>  [golbref@bgu.ac.il](mailto:golbref@bgu.ac.il);  
<sup>г)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9378-5334>  [kiv@icmm.ru](mailto:kiv@icmm.ru)

\*Ответственный автор. Электронная почта: [mad@icmm.ru](mailto:mad@icmm.ru)

Адрес для переписки: ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия

Тел.: +7 (342) 237–83–87; факс: +7 (342) 237–84–87

Перспективным методом определения расхода жидкометаллического теплоносителя является метод температурных корреляций (МТК) в силу того, что он не требует калибровки. Однако, являясь косвенным, он имеет ряд ограничений, подлежащих тщательному изучению. В качестве генератора пульсаций температуры используется магнитное препятствие. В статье приводятся результаты численного исследования влияния размера магнитного препятствия и его интенсивности воздействия, а также перепада температуры между жидким металлом и внешней средой на работоспособность и точность МТК. Выявлены основные критерии, влияющие на работу метода, а именно: протяженность и положение в пространстве зон завихренности и смешения.

**Ключевые слова:** измерение расхода, расходомер, магнитное препятствие, жидкие металлы, теплоноситель, турбулентность, термодарные измерения, численный счет, моделирование, кросскорреляция

### 1. Введение

Измерения скорости в жидких металлах представляют собой сложную задачу из-за непрозрачности и агрессивности таких сред. Различные методы, обычно используемые для измерения скорости потока, неприменимы в жидких металлах или требуют значительной модификации [1, 2].

В настоящее время различные исследовательские группы работают над разработкой и исследованием расходомеров для жидких металлов [3, 4]. Например, нам нужны такие расходомеры для натриевых контуров [5]. Опыт показывает, что расходомеры с жестким каналом и без движущихся частей лучше всего подходят для использования в чистом жидком натрии [2, 6]. Поэтому мы исключили из рассмотрения ультразвуковые кориолисовы расходомеры с вращающимся рабочим телом. Наиболее удобными для наших целей оказались кондукционные и индукционные расходомеры. Обычно они надежно работают при высоких расходах, но их точность падает при измерении медленных течений. Эта проблема может быть решена путем применения расходомера, работающего на методе температурной корреляции сигналов, который демонстрирует высокую чувствительность даже при малых расходах. Однако для адекватной работы такого устройства необходимо наличие в потоке pulsa-

ций температуры. Такие пульсации присутствуют во многих технологических каналах, но есть риск, что они рассеются и потеряют свою интенсивность к моменту прохождения через расходомер.

Таким образом, необходимым условием работы МТК является наличие в жидкой среде температурных неоднородностей, которые перемещаются вместе с потоком. Проходя последовательно через два датчика температуры, они вызывают всплески сигналов на этих датчиках с некоторой задержкой по времени. Используя кросскорреляционный анализ, можно узнать величину этой задержки и определить среднюю в объеме и за некоторый промежуток времени скорость потока в пространстве между датчиками. Метод температурных корреляций основан на гипотезе Тейлора о том, что температурные возмущения «вморожены» в течение жидкой среды при достаточном уровне турбулентности [7]. При этом уровень турбулентности не должен быть большим. Величины интенсивности колебаний температуры и скорости также важны. Все это накладывает ограничения на метод и является предметом исследования.

Метод температурных корреляций является интуитивным и возникает естественным образом в задачах с множеством точек измерения температуры жидкой среды. Его серьезное развитие было связано с исследованиями в атомной отрасли в 1970-х годах [8]. Данный метод является абсолютным, а также, что немаловажно, нечувствительным к магнитным полям [9].

Одним из перспективных способов генерации пульсаций температуры, используемым в данной работе, является применение магнитного препятствия. Его преимущество состоит в неинвазивности, т. е. в отсутствии необходимости в физических турбулизаторах потока (изгибах трубопровода, твердых препятствиях, внедренных внутрь канала и т. п.), а также в использовании естественного градиента температуры, возникающего за счет большего различия в температуре жидкого металла и внешней среды, окружающей трубопровод. Магнитное препятствие в этом случае тормозит поток в центральной области канала и служит причиной обтекания с большой интенсивностью течения по периферии канала, которое охлаждается его стенками, а затем вмешивается в основной поток, создавая зону смешения потоков разной температуры (а значит и пульсации температуры).

Рассмотрим этот процесс с магнитогидродинамической точки зрения. Предположим, что поток жидкого металла в исследуемом цилиндрическом канале пронизан локализованным постоянным магнитным полем, перпендикулярным потоку. Тогда это приведет к генерации электрического тока в этой области. В свою очередь, взаимодействие этого индуцированного тока и внешнего магнитного поля порождает электромагнитную силу, направленную против потока. Это приводит к ситуации, аналогичной обтеканию твердого препятствия в канале [10]. Поэтому процесс получил название «обтекание магнитного препятствия». Этот процесс изучался как в плоских слоях [11], так и в каналах [12-15], и в прямоугольных участках [16, 17].

В серии публикаций Вотякова и др. [12, 13], а также Вотякова и Кассиноса [10, 18] была очень подробно изучена структура следа за магнитным препятствием. Показано, что стационарные картины течения за магнитным препятствием и внутри него имеют значительно более сложный характер, чем за твердым препятствием. Помимо числа Рейнольдса  $Re = V_0 D / \nu$ , магнитогидродинамический поток характеризуется параметром магнитного взаимодействия (числом Стюарта)  $N = \sigma D B^2 / \rho V_0$ , где  $D$ ,  $V_0$  и  $B$  – характерные размер, скорость и величина приложенного магнитного поля, а  $\rho$ ,  $\nu$  и  $\sigma$  – плотность, вязкость и электропроводность жидкого металла соответственно. Параметр  $N$  характеризует отношение силы Лоренца к силам инерции. В зависимости от соотношения между параметрами  $N$  и  $Re$  реализуются различные режимы течения. Например, в случае течения в плоском слое возникают три режима: безвихревой, при котором силы вязкости преобладают над силой Лоренца; с двумя «магнитными» вихрями, при котором сила Лоренца большая, а силы инерции малы; шести-

вихревой, при котором силы Лоренца и инерции доминируют над вязкой силой. Такая, наиболее сложная, топология течения включает три пары вихрей: «магнитные» (в пределах магнитного препятствия), соединительные (в ближнем следе) и присоединенные (в дальнем следе) [13].

Важность трехмерной постановки задачи при ее численном исследовании даже для плоского слоя подчеркивается в статье [10], где говорится, что для разрешения таких топологических особенностей течения за магнитным препятствием, как рециркуляции, представляющие собой трехмерные спиральные структуры, необходим трехмерный численный подход.

Большое значение также имеет величина области магнитного воздействия (размеры магнита). Как было показано в работе Вотякова [12], для магнита, перекрывающего всю полость, вихрей не возникает вплоть до критических значений параметра  $N$  (для  $N < N_c = 100$ ). Максимально разнообразная топология (6 вихрей) наблюдается для магнита, занимающего почти половину ( $2/5$ ) полости. В случае т.н. магнитного лезвия (магнит составляет  $1/50$  полости) возникают два вихря вокруг него, и дальше поток почти не возмущен.

В работе Кеньереша [15] для плоского слоя были подробно исследованы механизмы образования турбулентных пульсаций температуры и скорости и их локализация. Было показано, что даже в отсутствие внешнего сильного градиента температуры долговременные осредненные поля турбулентности (по скорости и температуре) выявили области, в которых происходит производство турбулентной кинетической энергии и производство температурной дисперсии. Несмотря на то, что температура является пассивной скалярной величиной, наблюдалось сильное несходство между механизмами образования. В то время как пики производства турбулентной кинетической энергии расположены вблизи горизонтальных стенок, пики производства дисперсии температуры находятся в центральной области канала. Профили турбулентных напряжений и турбулентных потоков тепла в центральной горизонтальной плоскости выявили наличие анизотропной турбулентности и контраградиентной диффузии турбулентных потоков тепла. Таким образом, для расходомера, работающего на МТК, важно правильно подобрать расположение датчиков, фиксирующих пульсации температур.

В нашей предыдущей статье [19] были проведены экспериментальные и численные исследования устойчивости метода температурных корреляций в диапазоне чисел Рейнольдса от  $3,4 \cdot 10^3$  до  $3,4 \cdot 10^4$ . Было показано, что большое значение для МТК имеет правильный выбор места расположения датчика температуры в зависимости от целевого расхода. Расчеты показали, что при больших расходах в потоке есть участки, где пульсации температуры отстают от течения, поэтому гипотеза Тейлора работает плохо. Для возможности измерения скорости методом температурных корреляций при больших расходах термодатчики должны располагаться на большом расстоянии от магнита, или необходима дополнительная калибровка. В начале зоны смешения наблюдается сильно неравномерное распределение скоростей в вертикальном сечении, что приводит к сильным колебаниям ближе к оси трубы. Флуктуации скорости большой амплитуды отрицательно сказываются на точности МТК. Однако влияние величины и топологии магнитного поля, равно как и температурного режима, на работоспособность и точность метода не были изучены. Поэтому целью настоящей статьи является численное исследование влияния размера магнитного препятствия и его интенсивности воздействия, а также перепада температуры между жидким металлом и внешней средой на работоспособность и точность метода температурных корреляций.

## 2. Постановка задачи и методы решения

Численное исследование технологических процессов выполняется с помощью математической модели, сформулированной в рамках магнитной гидродинамики (МГД). Электродинамическая часть задачи описывается системой уравнений Максвелла. На их основе,

с учетом закона Ома для движущихся электропроводных сред, формулируется уравнение переноса магнитного поля

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $\mu$  – магнитная проницаемость, а  $\sigma$  – электропроводность среды. Задача решается с помощью разложения магнитного поля на стационарную составляющую и индуцированное поле:  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{b}$ . Получаем следующее уравнение для индуцированного поля  $\mathbf{b}$  и индуцированного тока  $\mathbf{j}$ :

$$\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{b} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \mathbf{b} + ((\mathbf{B}_0 + \mathbf{b}) \cdot \nabla) \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B}_0, \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{B}. \quad (3)$$

Течение вязкой электропроводной среды описывается уравнениями Навье-Стокса и уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \mathbf{v} + \frac{\mathbf{f}_L}{\rho}, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (5)$$

где  $p$  – давление,  $\rho$  – плотность среды. Последнее слагаемое в (4) есть объемная сила Лоренца  $\mathbf{f}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ , которая обуславливает генерацию МГД-процесса. Магнитное число Рейнольдса в этом процессе мало, поэтому перенос магнитного поля потоком незначителен.

Использована LES-модель турбулентности в формулировке Смагоринского. Среднее расстояние между узлами сетки было 3 мм, а шаг по времени составлял 0,01 с. Таким образом, число Куранта в расчетах не превышало 1, а для не возмущенного магнитным полем потока составляло 0,33.

Все гидродинамические и термодинамические расчеты выполнены в пакете Fluent с добавлением самостоятельно написанных на языке C++ модулей через механизм «user-defined function». Для моделирования магнитогидродинамических процессов использовался МГД-модуль пакета Fluent. Все описанные процедуры и алгоритмы выполнены в многопроцессорном варианте. Вычисление проводилось на 12-ти процессорах (в соответствии с имеющейся лицензией).

Проведены трехмерные расчеты течения жидкой среды в цилиндрическом канале длиной 1 м и диаметром 0,068 м. Такие геометрические параметры были выбраны для соответствия действующему расходомеру, установленному на натриевый контур в ИМСС УрО РАН [19]. Параметры жидкой среды соответствовали металлическому натрию при температуре 423 К, а именно  $\rho = 915 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 59,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\sigma = 9 \text{ МСм/м}$ , протекающему по цилиндрическому каналу длиной  $L = 1 \text{ м}$  и диаметром  $D = 0,068 \text{ м}$ . Температура и скорость (расход) на входе в канал фиксировались и составляли  $T_0 = 423 \text{ К}$  и  $V_0 = 0,1 \text{ м/с}$  (на оси цилиндра). Число Рейнольдса, таким образом, составляло  $1,15 \cdot 10^4$ . Варьировались диаметр магнита  $d$  (от 0,02 до 0,1 м), величина магнитного поля  $B$  (от 0,08 до 1,3 Тл) и температура стенки  $T_c$  (от 250 до 400 К). Или в безразмерных величинах:  $k = d/D$  (от 0,3 до 1,2),  $N$  (от 40 до  $1,14 \cdot 10^4$ ) и  $\theta = T_c/T_0$  (от 0,6 до 0,9).

Расчетная область и система координат приведены на рис. 1. Центр магнита расположен на оси  $Z$  в координате  $-0,07$ , а область действия его магнитных сил обозначена пунктир-

ной областью; ось  $Z$  направлена вдоль потока сонаправленно с ним. Голубыми точками отмечены виртуальные датчики температуры – точки, для которых сохранялись эволюции температуры и скорости с частотой 10 Гц.

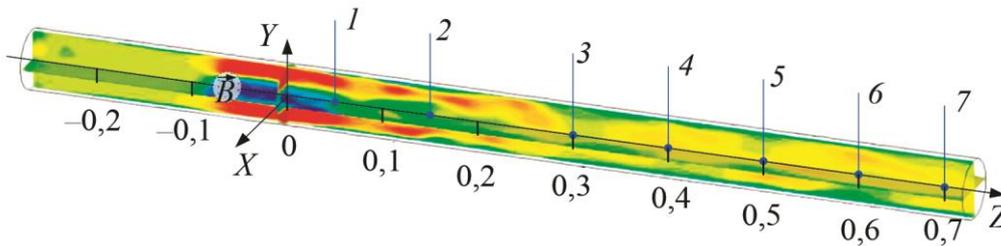


Рис. 1. Схема расчетной области: 1...7 – виртуальные датчики

По данным точкам строились профили температуры и скорости вдоль цилиндра, оценивалась интенсивность их колебаний и строились спектры мощности пульсаций температуры. Также для выбранных пар виртуальных датчиков рассчитывалась функция кросскорреляции (ФКК) по стандартному алгоритму, и рассчитывалась скорость по МТК: расстояние между виртуальными датчиками делилось на время, соответствующее положению максимума функции взаимной корреляции сигналов. Сравнение полученной скорости со скоростью, рассчитанной напрямую в данной области, позволяло сделать оценку точности метода при данных параметрах расчета.

### 3. Результаты и обсуждение

Ожидалось, что наибольшее влияние на топологию потока за магнитным препятствием, а значит и на пространственное распределение поля температуры и ее колебаний, будет оказывать вариация размера магнита. Поэтому в первую очередь рассмотрим результаты серии расчетов, в которой варьировался параметр  $k$  от 0,3 до 1,2. От диаметра магнита главным образом зависит топология течения за ним и то, на каком расстоянии от магнита формируется зона смещения. У Кеньереша она названа «intermittent region» – зоной, в которой изолинии температуры сильно искажены [15]. На рис. 2 приведен пример функций кросскорреляции для случая  $k = 0,3$ , посчитанной для разных пар виртуальных датчиков. Помимо построения ФКК для сигналов с соседних виртуальных датчиков, был рассмотрен случай применения МТК к датчикам через один: 3 и 5 (голубая линия на рис. 2). Нужно отметить, что хотя высота пика такой ФКК уменьшилась (не намного), дисперсия ее практически не изменилась. Если ФКК для пар датчиков 3-4 и 4-5 дают значения скорости 0,11 м/с, то ФКК для пары 3-5 – 0,1 м/с. Это говорит, с одной стороны, о том, что пульсации температуры в натрии живут достаточно долго и медленно меняют свою форму при передвижении вместе с потоком, а с другой стороны, о гибкости МТК – положение датчиков температуры относительно друг друга можно варьировать в некоторых пределах. Синяя кривая на рис. 2 построена для первых двух датчиков и дает приблизительно вдвое меньшее значение скорости, чем остальные – 0,05 м/с. Это объясняется тем, что данные виртуальные датчики расположены в непосредственной близости от магнитного препятствия. В этой области среднее течение еще не установилось – поток испытывает торможение магнитным препятствием. Зона смещения разнотемпературных потоков здесь только начинается, что обуславливает достаточно низкий уровень корреляции (0,5).

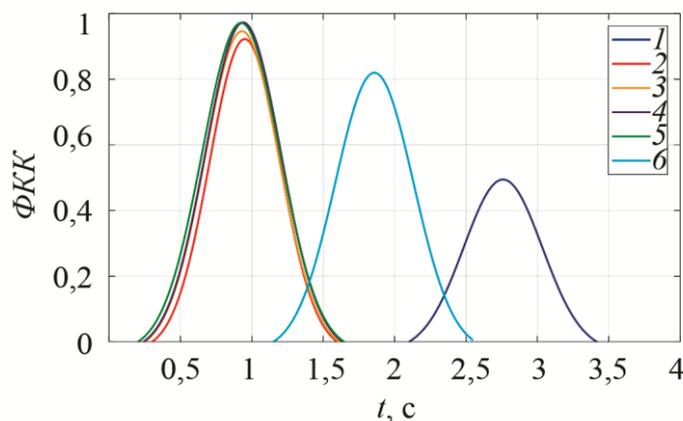


Рис. 2. Пример функций кросскорреляции для случая  $k = 0,3$  для разных пар виртуальных датчиков: 1 – 1-2, 2 – 2-3, 3 – 3-4, 4 – 4-5, 5 – 5-6, 6 – 3-5

На рис. 3 приведены различные графики для трех значений параметра  $k$ : 0,3, 0,6 и 1,2 (верхняя, средняя и нижняя строки на рис. 3 соответственно). Число Стюарта при этом постоянно и составляет 455. Первым в каждой строке представлен график профиля скорости вдоль оси канала. Пунктирной линией показаны профили  $z$ -компоненты скорости, полученные в численном счете. Кругами – значения  $z$ -компоненты скорости в местах расположения виртуальных датчиков. Вертикальными отрезками показаны величины СКО  $z$ -компоненты скорости. Наконец, красными квадратами показаны значения скорости, полученные при помощи МТК. По тому, насколько хорошо эти квадраты ложатся на синие пунктирные линии, можно судить о качестве работы МТК в различных ситуациях. Вторым в каждой строке представлен график профиля СКО всех трех компонент скорости вдоль оси канала ( $x$  – квадраты,  $y$  – треугольники,  $z$  – круги). Третьим в каждой строке представлен график профиля СКО температуры вдоль оси канала. Именно по нему можно судить о положении и протяженности зоны смешения. И последним в каждой строке приведен график спектров температурных пульсаций на виртуальных датчиках от 1 до 7.

Во всех рассмотренных случаях, судя по графикам СКО температуры, за магнитным препятствием возникает зона смешения, в которой отжатый к стенкам и охлажденный о них поток смешивается с горячим потоком, не взаимодействующим со стенками трубы. При этом, как было показано в работах других авторов, за магнитным препятствием формируется зона завихренности [13], характеризующаяся сильными пульсациями скорости, которые можно оценивать по графикам СКО компонент скорости (второй ряд на рис. 2). При  $k = 0,3$  зона смешения занимает практически всю область с 1 по 7 датчик, а зона завихренности захватывает лишь первый виртуальный датчик ( $z = 0,03$  м), поэтому уже со второго датчика средняя скорость потока приближается к исходной, а профиль скорости становится равномерным. Именно такие условия являются оптимальными для МТК, поскольку значения средней скорости, полученные с его помощью, хорошо согласуются с профилем скорости, полученным напрямую из расчета (левый верхний график). В этом случае можно говорить о магнитном препятствии именно как об источнике температурных пульсаций.

С возрастанием диаметра магнита зона смешения смещается вниз по потоку, а протяженность зоны завихренности возрастает. Эти обстоятельства негативно сказываются на работе МТК.

При  $k = 0,6$  зона смешения наблюдается в районе датчиков 4-6, а зона завихренности – до третьего датчика включительно. Таким образом, они по-прежнему не пересекаются, однако для пар датчиков 1-2 и 2-3 МТК дает ошибочные завышенные значения скорости, так как

в этой области наблюдаются сильные колебания как  $z$ -, так и  $y$ -компонент скорости. В области смешения МТК дает верные значения скорости (пары датчиков 3-4, 4-5, 5-6).

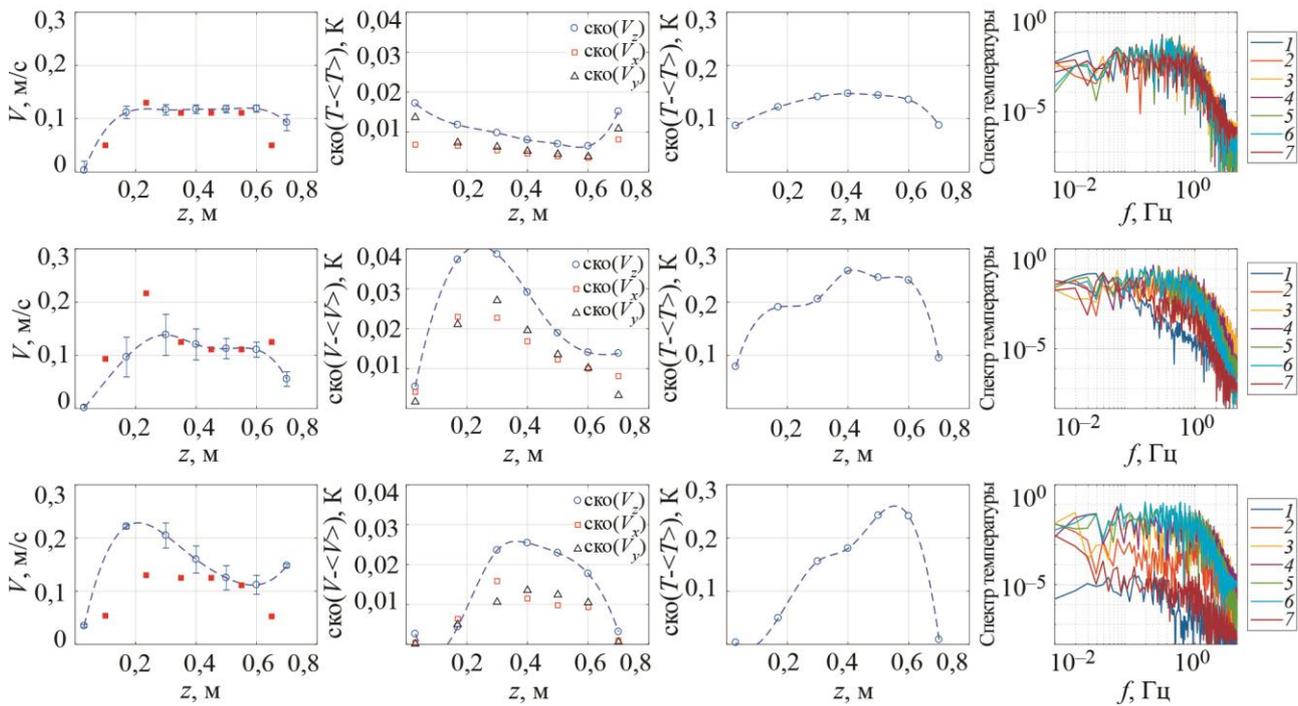


Рис. 3. Различные графики для трех значений параметра  $k$ : 0,3 (верхняя строка), 0,6 (средняя строка) и 1,2 (нижняя строка)

При  $k = 1,2$  зона смешения наблюдается уже в районе датчиков 5-6, а зона завихренности распространяется до пятого датчика включительно, частично перекрывая зону смешения. В этом, самом негативном для МТК, случае верное значение скорости метод дает только для пары датчиков 5-6. Для всех остальных пар метод либо занижает, либо завышает значения средней скорости.

Обратимся теперь к турбулентным характеристикам потока. Температура в нашем случае слабо влияет на поток и является пассивным скаляром. Ее турбулентные пульсации должны быть заморожены в поток для использования гипотезы Тейлора. Вмороженность турбулентности в поток приводит к сохранению ее энергии. Следовательно, спектр турбулентности температуры должен сохраняться. Если рассмотреть спектры температуры для разных значений диаметра магнита, то можно заметить, что при  $k = 0,3$  это условие выполняется для всех датчиков, и МТК работает хорошо. Начиная с  $k = 0,6$  спектры на первом и седьмом датчиках не удовлетворяют гипотезе Тейлора. Начиная с третьего датчика вмороженность турбулентности становится более очевидной. Это соответствует достаточно хорошему согласию модельных расчетов средней скорости с ее значениями, полученными по кросскорреляции. В случае, когда диаметр магнита соизмерим с диаметром канала ( $k = 1,2$ ), зона завихренности занимает более обширную зону, и в источник турбулентности значительный вклад вносят стенки канала. Поэтому, как видно из спектров температуры в разных точках, турбулентность перестает быть замороженной в поток – спектры «расслаиваются». Это отражается и в различии определения средней скорости по модели и по МТК.

В нашей лаборатории использовался расходомер, в котором применялся магнит большого диаметра [19], поэтому было интересно рассмотреть различные варианты величины магнитного поля для фиксированного  $k = 1,2$ . На рис. 4 приведены различные графики

для трех значений параметра  $N$ : 165, 1480 и 2850 (верхняя средняя и нижняя строки на рис. 4 соответственно). Графики скомпонованы так же, как и на рис. 3 (описание см. выше).

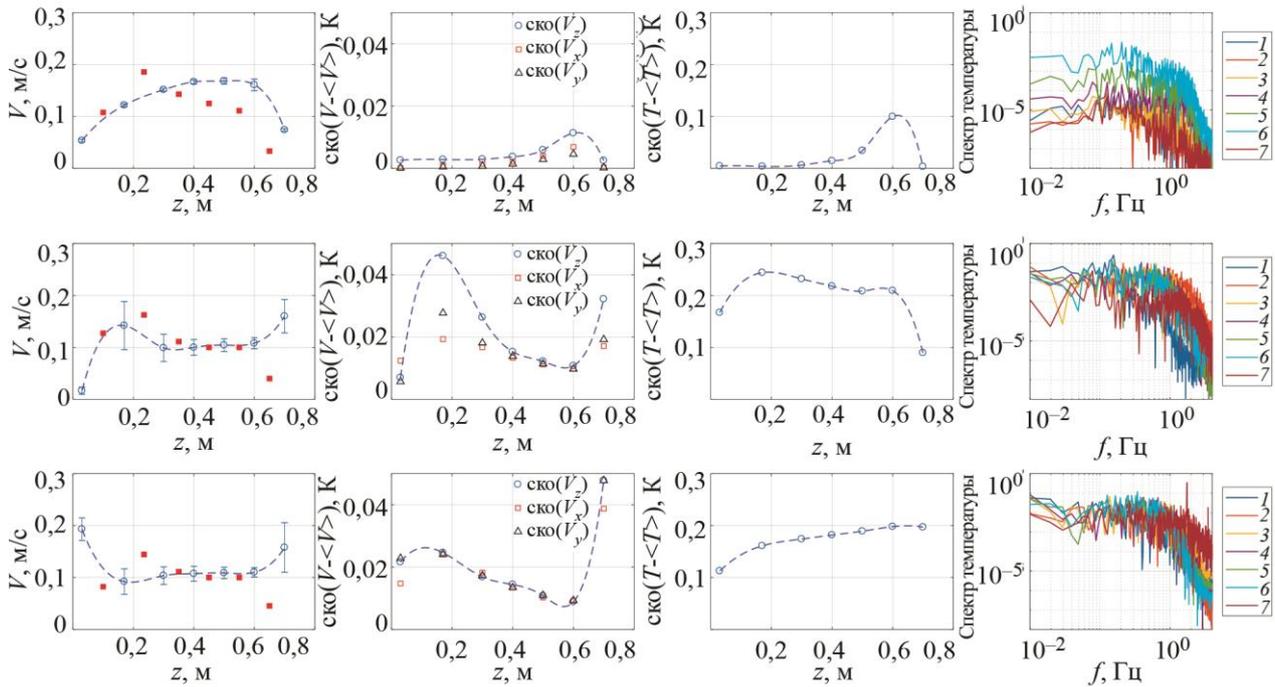


Рис. 4. Различные графики для трех значений параметра  $N$ :  
165 – верхняя строка, 1480 – средняя строка и 2850 – нижняя строка

В случае слабого магнитного поля (верхняя строка), судя по графикам СКО скорости и температуры, в потоке не образуется устойчивых зон завихренности и смешения. Спектры пульсации температуры при этом расслаиваются – энергия турбулентных пульсаций температуры вдоль потока не сохраняется. Следовательно, МТК работает плохо, то занижая, то завышая значения скорости. В случае сильного магнитного поля (почти вдвое большего, чем для рассмотренного случая в нижней строке на рис. 3) спектры стягиваются (турбулентная энергия сохраняется вдоль канала), зона завихренности смещается обратно к магнитному препятствию, а зона смешения расширяется. Метод температурных корреляций работает хорошо для пар датчиков 3-4, 4-5 и 5-6. Нужно отметить высокий уровень пульсаций скорости на 7 датчике. Увеличение магнитного поля еще примерно вдвое приводит к изменению картины течения (скорость на первом датчике становится вдвое выше, чем средняя). Спектры при этом практически накладываются друг на друга. Вблизи магнитного препятствия пульсации скорости ослабевают, зато на 7 датчике возрастают вдвое. При этом на седьмом датчике возникает выделенная частота 1,75 Гц на спектре температурных пульсаций, что соответствует колебаниям с периодом 0,57 с. Это может косвенно говорить о возникновении колеблющейся струи или нескольких струй. В таких условиях метод работает хорошо для пар 3-4, 4-5 и 5-6 и плохо для пары 6-7 (уровень пика ФКК около 0,1), так как мешает возникший колебательный процесс.

Наконец рассмотрим влияние градиента температур на процесс. На рис. 5 приведены графики СКО и профилей температуры для трех значений параметра  $\theta$ : 0,9, 0,75 и 0,6 (слева направо). Параметры  $N$  и  $k$  при этом постоянны и составляют 455 и 1,2 соответственно.

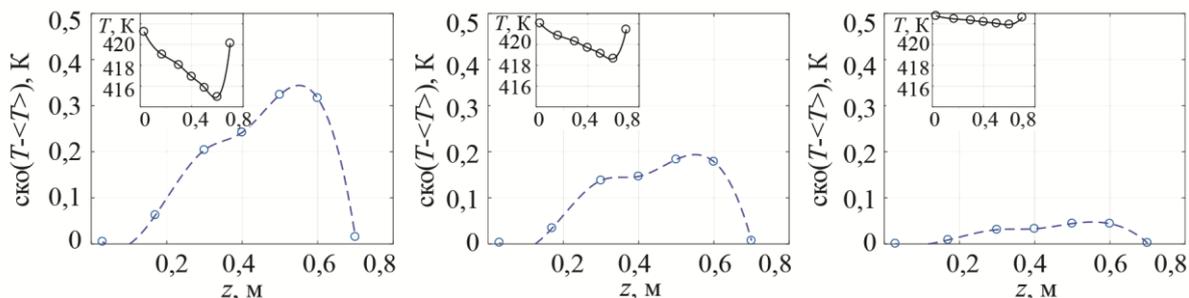


Рис. 5. Графики СКО и профилей температуры для трех значений параметра  $\theta$ : 0,6 (слева), 0,75 (посередине), 0,9 (справа)

Изменение температуры стенки ожидаемо приводит к изменению уровня пульсаций температуры, а также степени вмешивания холодных струй в поток около оси трубы (где расположены датчики). С уменьшением параметра  $\theta$  СКО температуры уменьшается с 0,3 до 0,05 К, а неравномерность профиля – с 7 до 1 К. При этом положение и протяженность зоны смещения сохраняются. Зона завихренности также не меняется, поэтому и МТК работает практически одинаково (как показано на рис. 3 в левом нижнем углу).

#### 4. Заключение

В результате вариации параметров в численном счете было получено, что метод работает в достаточно большом диапазоне величин пульсаций температуры и скорости. Наибольшую опасность для метода представляют ситуации, когда зоны завихренности и смещения накладываются – сильные продольные и поперечные пульсации скорости размывают функции кросскорреляции. Магнит малого диаметра (менее половины диаметра трубы) предпочтителен, так как его более концентрированное магнитное поле создает турбулизированный поток сразу за магнитным препятствием и протяженную зону смещения. В этом случае можно говорить о магнитном препятствии именно как об источнике температурных пульсаций. Вариация величины магнитного воздействия позволяет эффективно изменять и задавать уровень пульсаций температуры и скорости, а также управлять протяженностью и положением зоны смещения. Вариация температуры стенки приводит в основном к изменению величины пульсаций температуры в потоке, однако это практически не влияет на работоспособность и точность метода.

#### Благодарность

*Работа выполнена в соответствии с госбюджетным планом № 122030200191-9, а также при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».*

#### Литература

1. Some recent developments in the field of measuring techniques and instrumentation for liquid metal flows / S. Eckert, D. Buchenau, G. Gerbeth, F. Stefani & F.-P. Weiss // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2011. – Vol. 48, No. 4. – P. 490–498. – DOI: 10.1080/18811248.2011.9711724.
2. Electromagnetic flowmeter for wide-temperature range intensive liquid metal flows / A. Pavlinov, R. Khalilov, A. Mamykin, I. Kolesnichenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 581. – P. 012011. – DOI: 10.1088/1757-899X/581/1/012011.

3. Measurement techniques for liquid metals / M. Ratajczak, D. Hernández, T. Richter, D. Otte, D. Buchenau, N. Krauter, T. Wondrak // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 228. – P. 012023. – DOI: 10.1088/1757-899X/228/1/012023.
4. An improved electromagnetic flowmeter / X. Li, X. Yao, C. Wang, L. Zhu // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1584. – P. 012068. – DOI: 10.1088/1742-6596/1584/1/012068.
5. ICMC's two-loop liquid sodium facility / I. Kolesnichenko, R. Khalilov, A. Shestakov, P. Frick // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Vol. 52, Nos. 1–2. – P. 87–94. – DOI: 10.22364/mhd.52.1-2.11.
6. A combined liquid sodium flow measurement system / R. Khalilov, I. Kolesnichenko, A. Mamykin, A. Pavlinov // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Vol. 52, Nos. 1–2. – P. 53–60. – DOI: 10.22364/mhd.52.1-2.7.
7. Taylor G. I. The spectrum of turbulence // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences. – 1938. – Vol. 164, No. 919. – P. 476–490. – DOI: 10.1098/rspa.1938.0032.
8. Determination of thermocouple transfer-functions and fluid-flow velocities by temperature-noise measurements in liquid sodium / J. Benkert, C. Mika, K. H. Raes, D. Stegemann // Progress of Nuclear Energy. – 1977. – Vol. 1, iss. 2–4. – P. 553–563. – DOI: 10.1016/0149-1970(77)90105-6.
9. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals / I. A. Belyaev, N. G. Razuvanov, V. G. Sviridov, V. S. Zagorsky // Flow Measurement and Instrumentation. – 2017. – Vol. 55. – P. 37–43. – DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.05.004.
10. Votyakov E. V., Kassinos S. C. On the analogy between streamlined magnetic and solid obstacles // Physics of Fluids. – 2009. – Vol. 21, iss. 9. – P. 097102. – DOI: 10.1063/1.3231833.
11. Cuevas S., Smolentsev S., Abdou M. On the flow past a magnetic obstacle // Journal of Fluid Mechanics. – 2006. – Vol. 553. – P. 227–252. – DOI: 10.1017/S0022112006008810.
12. Votyakov E., Zienicke E., Kolesnikov Yu. Constrained flow around a magnetic obstacle // Journal of Fluid Mechanics. – 2008. – Vol. 610. – P. 131–156. – DOI: 10.1017/S0022112008002590.
13. Structure of the wake of a magnetic obstacle / E. V. Votyakov, Yu. Kolesnikov, O. Andreev, E. Zienicke, A. Thess // Physical Review Letters. – 2007. – Vol. 98, iss. 14. – P. 144504. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.144504.
14. Kenjereš S., Ten Cate S., Voesenek C. J. Vortical structures and turbulent bursts behind magnetic obstacles in transitional flow regimes // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2011. – Vol. 32, No. 3. – P. 510–528. – DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.02.011.
15. Kenjereš S. Energy spectra and turbulence generation in the wake of magnetic obstacles // Physics of Fluids. – 2012. – Vol. 24, iss. 11. – P. 115111. – DOI: 10.1063/1.4767726.
16. Numerical and experimental study of electromagnetically driven vortical flows / S. Kenjereš, J. Verdoold, M. J. Tummers, K. Hanjalić, C. R. Kleijn // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2009. – Vol. 30, iss. 3. – P. 494–504. – DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.02.014.
17. Zhang X., Huang H. Effect of magnetic obstacle on fluid flow and heat transfer in a rectangular duct // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 51. – P. 31–38. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.011.
18. Votyakov E. V., Kassinos S. C. Core of the magnetic obstacle // Journal of Turbulence. – 2010. – Vol. 11. – Article No. 49. – DOI: 10.1080/14685248.2010.524220.
19. Application of the temperature correlation method to measuring the flow rate of liquid sodium / I. Kolesnichenko, A. Mamykin, E. Golbraikh, A. Pavlinov // Magnetohydrodynamics. – 2021. – Vol. 57, No. 4. – P. 547–557. – DOI: 10.22364/mhd.57.4.9.