

УДК 532.5.032

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-52-64>

## Влияние расположения источника неоднородного магнитного поля на интенсивность термомагнитной конвекции в замкнутом контуре

М. А. Косков<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук ул. Акад. Королёва, д. 1, г. Пермь 614013, Российская Федерация

✉ e-mail: koskov.m@icmm.ru

### Резюме

**Цель.** Получение информации о влиянии расположения источника неоднородного магнитного поля относительно нагреваемого участка вертикального гидродинамического контура, заполненного магнитной жидкостью, на интенсивность конвективного переноса тепла вдоль контура.

**Методы.** Проведены эксперименты с использованием гидродинамического контура, выполненного из тонкой трубки круглого сечения и расположенного в вертикальной плоскости. Подвод тепла осуществлялся нагревателем на коротком вертикальном участке контура, отвод – обдувом всей поверхности трубки термостатированным воздухом. Источником магнитного поля служили плоские полюсные наконечники ферритового магнитопровода, в зазоре между которыми располагался нагреватель. Расположение полюсных наконечников относительно нагревателя в экспериментах варьировалось по вертикали. При проведении контрольных опытов источник магнитного поля демонтировался. Контур был заполнен магнитной жидкостью типа «магнетит – керосин – олеиновая кислота» умеренной концентрации. Интенсивность стационарного конвективного теплового потока вдоль контура рассчитывалась по результатам измерения температуры поверхности трубки медь-константановыми термопарами. Результаты измерений представлялись в безразмерном виде – взаимосвязи числа Нуссельта и теплового числа Рэлея.

**Результаты.** Установившаяся смешанная, термомагнитная и гравитационная конвекция магнитной жидкости в контуре наблюдалась при любом расположении наконечников магнитопровода относительно нагревателя. При расположении полюсных наконечников выше нагревателя наблюдалась конкуренция гравитационной и термомагнитной конвекции, а поток тепла оказывался слабым. При размещении полюсных наконечников ниже нагревателя число Нуссельта было в 2–4 раза больше, чем в контрольных опытах (только гравитационная конвекция) при равных числах Рэлея. Наибольшие числа Нуссельта получены при размещении источника поля вблизи центра нагревателя.

**Заключение.** Информация о влиянии взаимного расположения источника магнитного поля и нагревателя на конвективный перенос тепла магнитной жидкостью в гидродинамическом контуре получена экспериментально. Найдено оптимальное, в смысле интенсивности теплопереноса, положение источника поля.

**Ключевые слова:** гидродинамический контур; магнитная жидкость; термомагнитная конвекция; неоднородное магнитное поле.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Российской академии наук (рег. № АААА-А20-120020690030-5).

**Конфликт интересов:** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Косков М. А., 2024

**Для цитирования:** Косков М. А. Влияние расположения источника неоднородного магнитного поля на интенсивность термомагнитной конвекции в замкнутом контуре // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 52–64. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-52-64>

Поступила в редакцию 03.07.2024

Подписана в печать 30.07.2024

Опубликована 24.09.2024

## Influence of inhomogeneous magnetic field source location on the intensity of thermomagnetic convection in a closed loop

Mikhail A. Koskov<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science

1 Koroleva Str., Perm 614013, Russian Federation

✉ e-mail: koskov.m@icmm.ru

### Abstract

**Purpose.** Obtaining information on the influence of the location of the inhomogeneous magnetic field source relative to the heated section of a vertical hydrodynamic loop filled with magnetic fluid on the intensity of convective heat transfer along the loop.

**Methods.** Experiments were carried out using a hydrodynamic loop made of a thin tube of circular cross-section and placed in a vertical plane. Heat source was carried out by a heater on a short vertical section of the loop, and heat removal was implemented by blowing the entire surface of the tube with thermostated air. The source of the magnetic field was the flat pole tips of the ferrite magnetic core, in the gap between which the heater was located. The position of the pole tips relative to the heater varied vertically in the experiments. In the control experiments, the source of the magnetic field was deleted. The circuit was filled with medium concentrated magnetic liquid of the type "magnetite - kerosene - oleic acid". The intensity of steady-state convective heat flow along the tube was calculated from the results of measuring the tube surface temperature by copper-constantane thermocouples. The measurement results were presented in dimensionless form - the relationship between the Nusselt number and Rayleigh number.

**Results.** The unfluctuating mixed, thermomagnetic and gravitational, convection of the magnetic fluid in the loop was observed at any location of the pole tips of the magnetic core relative to the heater. At location of pole tips above the heater, competition of gravitational and thermomagnetic convection was observed, and the heat flux was weak. When the pole tips were placed below the heater, the Nusselt number was 2 - 4 times higher than in the control tests (only gravitational convection) with equal Rayleigh numbers. The highest Nusselt numbers were obtained when the field source was placed in center of the heater.

**Conclusion.** Information on the influence of the relative location of the magnetic field source and the heater on convective heat transfer by magnetic fluid in a hydrodynamic loop is obtained experimentally. The optimal concerning of heat transfer intensity position of the field source was found.

**Keywords:** hydrodynamic loop; magnetic fluid; thermomagnetic convection; non-uniform magnetic field.

**Funding:** This work was performed within the framework of the Program of Fundamental Research of the Russian Academy of Sciences (registration number: AAAA-A20-120020690030-5).

**Conflict of interest:** The author declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Koskov M.A. Influence of inhomogeneous magnetic field source location on the intensity of thermomagnetic convection in a closed loop. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(3):52–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-52-64>

## Введение

Магнитные жидкости – коллоидные растворы ферро- или ферромагнитных частиц в жидкости носителя. Свободная конвекция в этих растворах возникает под действием двух механизмов [1]. Первый – гравитационная конвекция, возникающая в любой неоднородно нагретой жидкости в поле тяжести [2]. Второй – термомагнитная конвекция [3], возникающая под действием пондеромоторной силы [4], действующей на магнитную жидкость со стороны внешнего магнитного поля. Плотность пондеромоторной силы

$$\mathbf{f} = \mu_0 M \nabla H, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $M$  – модуль намагниченности жидкости;  $H$  – модуль напряжённости магнитного поля в жидкости. В общем случае  $M$ , и следовательно,  $H$  – функции температуры. При наличии температурного градиента в жидкости сила (1) не компенсируется гидростатическим давлением, что приводит к возникновению конвективного движения.

Исследования термомагнитной конвекции активно проводятся уже более полувека [5]. В теоретических работах: классических монографиях [6] и исследовательских статьях, большое внимание уделяется упрощению зависимости (1) от температуры. Часто зависимость намагниченности от температуры линеаризуют, вводя пиромангнитный коэффициент  $K = -(\partial M / \partial T)$  [1]. В рамках фундаментального вопроса конвективной устойчивости рассматриваются случаи однородного магнитного поля [3], при котором градиент напряжённости поля в жидкости возникает только вследствие температурной зависимости намагниченности [6].

Напротив, существуют практически ориентированные работы (например, [7]), в которых внешнее поле сильно неоднородно и  $\nabla H$  является независимым параметром. В последнем случае безындукционного приближения пондеромоторная сила (1) может быть представлена как

$$\mathbf{f} = \mu_0 M \nabla H - \mu_0 K T \nabla H, \quad (2)$$

где  $T$  – температурное возмущение,  $M$  и  $K$  рассчитываются при  $T = 0$ . Второе слагаемое отвечает за конвективное движение магнитной жидкости. Его модуль будет наибольшим, если наиболее нагретая жидкость окажется в области наиболее неоднородного магнитного поля. В этой ситуации следует ожидать максимально интенсивной термомагнитной конвекции.

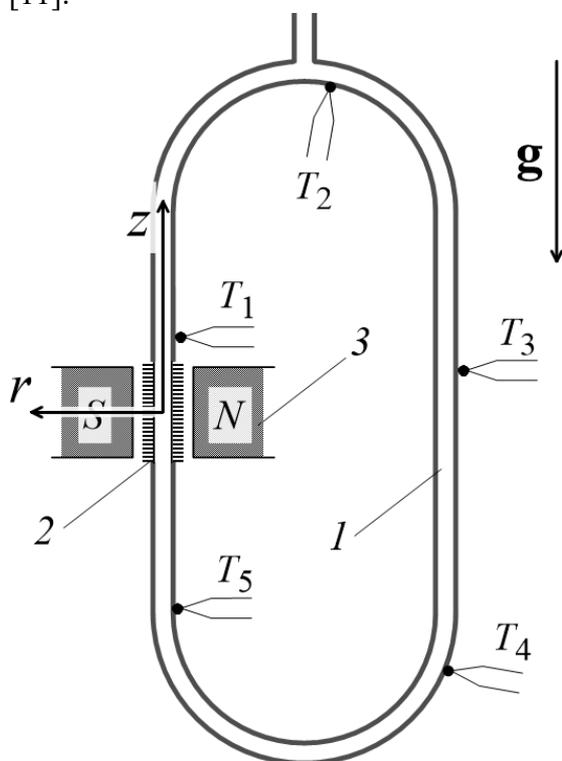
Интенсификации теплопереноса термомагнитной конвекцией посвящена работа [8], направленная на создание системы жидкостного охлаждения, в которой механический насос заменяется постоянным магнитом, а теплоносителем выступает магнитная жидкость. Сосуд с жидкостью представляет собой протяжённый гидродинамический контур [9]. Предпочтительным методом исследования таких систем является лабораторный эксперимент, поскольку вычисление пондеромоторной силы (1) наталкивается на существенные математические трудности (см., например, [10]).

В настоящей работе экспериментально исследуется усиление конвективного теплопереноса за счёт термомагнитной конвекции в вертикальном протяжённом гидродинамическом контуре, заполненном магнитной жидкостью. Рассматривается случай, в котором нагрев и магнитное поле локализованы на коротком вертикальном участке контура. *Цель работы* – получение информации о влиянии

взаимного расположения нагревателя и источника постоянного неоднородного магнитного поля на конвективный теплопоток вдоль контура.

## Материалы и методы

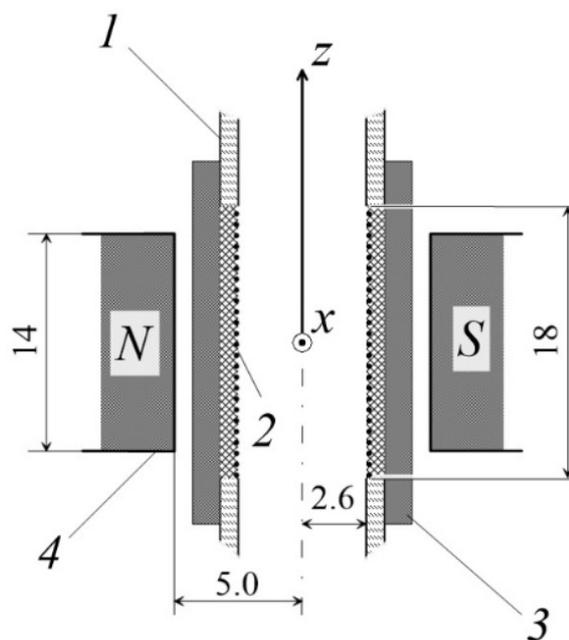
Эксперименты проводились с использованием гидродинамического контура овальной формы, изготовленного из тонкой стеклянной трубки круглого сечения (рис. 1). Внутренний радиус трубки  $r = 2,6$  мм, внешний – 3,6 мм, длина трубки вдоль оси  $L = 35$  см. В разрез вертикального участка контура клеивался нагреватель, представляющий собой однослойную катушку, выполненную бифилярно тонким нихромовым проводом (рис. 2). Отвод тепла от контура осуществлялся без использования теплообменников путём обдува всей поверхности трубки термостатированным воздухом. Конструкция устройства обдува описана в [11].



**Рис. 1.** Схема гидродинамического контура и система координат: 1 – стеклянная трубка; 2 – нагреватель; 3 – полюсные наконечники магнитопровода

**Fig. 1.** Scheme of hydrodynamic loop and coordinate system: 1 – glass tube; 2 – heater; 3 – pole tips of the magnetic core

Источником неоднородного магнитного поля служил ферритовый магнитопровод квадратного сечения, намагниченный постоянными магнитами. Нагреваемый участок контура размещался в зазоре между полюсными наконечниками магнитопровода (рис. 2).

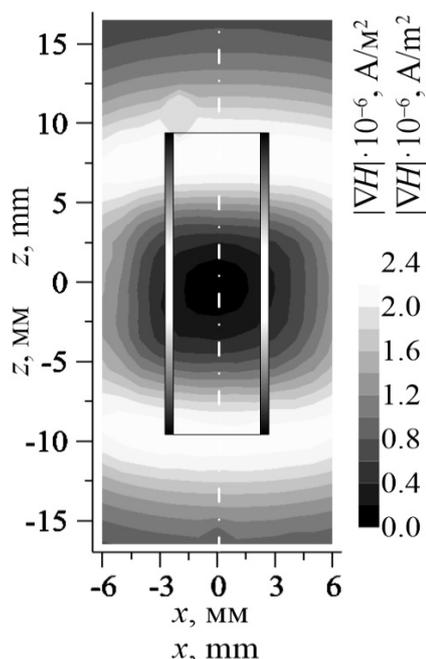


**Рис. 2.** Осевое сечение нагревателя в локальной системе координат: 1 – трубка контура; 2 – обмотка; 3 – пластиковая гильза; 4 – полюсные наконечники магнитопровода, размещённые на высоте  $z = 0$  (размеры указаны в миллиметрах)

**Fig. 2.** Axial section of the heater in the local coordinate system: 1 – tube, 2 – winding, 3 – plastic cylinder, 4 – pole lugs of the magnetic core placed at the height  $z = 0$  (dimensions are given in millimeters)

Амплитуда напряжённости поля в месте размещения нагревателя (без магнитной жидкости) не превышала 29 кА/м. В экспериментах расположение наконечников магнитопровода относительно нагревателя  $z$  менялось по вертикали в диапазоне от  $-10$  мм до  $+10$  мм с шагом 5 мм.

Горизонтальная компонента напряжённости магнитного поля в месте размещения нагревателя (см. рис. 2, плоскости  $xz$ ) измерялась тесламером до монтажа магнитопровода на контур. По результатам измерений был рассчитан градиент напряжённости поля, модуль которого показан на рисунке 3.



**Рис. 3.** Модуль градиента горизонтальной компоненты напряжённости магнитного поля в месте размещения нагревателя (обмотка нагревателя показана контрастными линиями)

**Fig. 3.** Modulus of gradient of horizontal component of magnetic field strength at the

heater location (the heater winding is shown by contrasting lines)

Для наглядности контрастными линиями обозначена внутренняя поверхность нагревателя при размещении полюсных наконечников в начале координат  $z = 0$ .

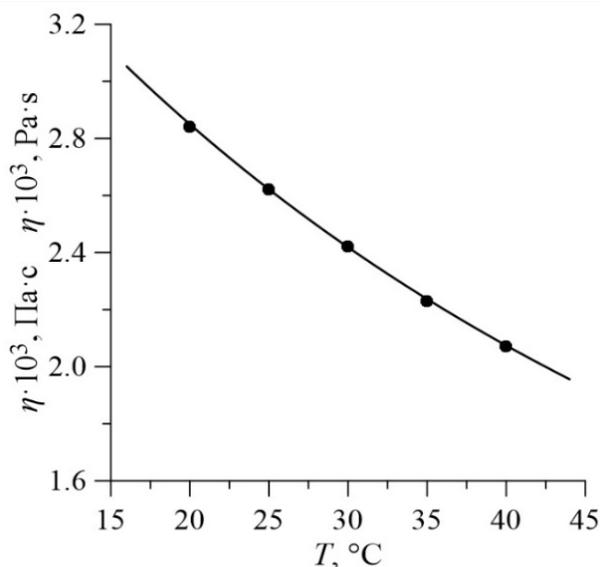
В качестве теплоносителя в контуре использовалась магнитная жидкость на основе керосина и магнетита, стабилизированная олеиновой кислотой. Плотность жидкости  $\rho$  при комнатной температуре измерялась пикнометром. По известным формулам [12] были рассчитаны теплофизические параметры жидкости: коэффициенты объёмного расширения  $\beta$  и теплопроводности  $\lambda$ , удельная теплоёмкость  $C$ , температуропроводность  $a = \lambda C^{-1} \rho^{-1}$ . Эти параметры представлены в таблице 1 в сравнении со свойствами чистого керосина [13]. Динамическая вязкость жидкости  $\eta$  измерялась ротационным вискозиметром в диапазоне температур 20...40°C (рис. 4).

Кривая намагничивания образца жидкости, полученная методом дифференциальной прогонки [14], показана на рисунке 5. Средний магнитный момент наночастиц образца  $1,94 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  и намагниченность насыщения 20,7 кА/м рассчитывались по кривой намагничивания методом магнитогранулометрического анализа [15].

**Таблица 1.** Свойства магнитной жидкости при 25°C в сравнении со свойствами керосина

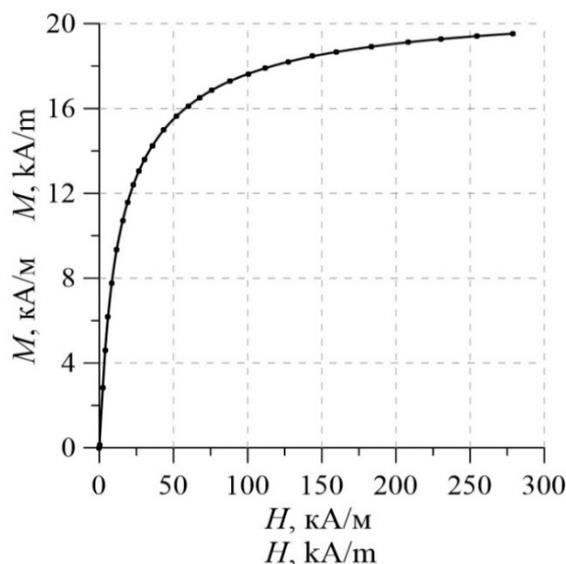
**Table 1.** Properties of magnetic fluid at 25°C in comparison with properties of kerosene

| Показатели<br>Indicators          | $\rho$ , г/см <sup>3</sup><br>$\rho$ , g/cm <sup>3</sup> | $\beta$ , °C <sup>-1</sup> | $\lambda$ , Вт/(м·°C)<br>$\lambda$ , W/(m·°C) | $C$ , Дж/(г·°C)<br>$C$ , J/(g·°C) | $a$ , м <sup>2</sup> /с<br>$a$ , m <sup>2</sup> /s |
|-----------------------------------|--|----------------------------|---|-----------------------------------|--|
| Керосин<br>Kerosene               | 0,78   | $8,8 \cdot 10^{-4}$        | 0,11  | 2,0                               | $7,0 \cdot 10^{-8}$                                |
| Магнитная жидк.<br>Magnetic fluid | 1,11   | $6,7 \cdot 10^{-4}$        | 0,13  | 1,5                               | $8,0 \cdot 10^{-8}$                                |



**Рис. 4.** Вязкость магнитной жидкости в зависимости от температуры: точки – измеренные значения; сплошная линия – аппроксимация по Аррениусу

**Fig. 4.** Viscosity of magnetic fluid as a function of temperature: dots – measured values; solid line – Arrhenius approximation



**Рис. 5.** Кривая намагничивания магнитной жидкости

**Fig. 5.** Magnetization curve of magnetic fluid

Для получения информации о конвективном теплотоке вдоль контура производились температурные измерения. На поверхность контура приклеивались горячие спаи медь-константовых термопар (см. рис. 1,  $T_1 - T_5$ ). Холодные спаи поддерживались при температуре охлаждающего контура воздуха. Перепад температуры на нагревателе  $\Delta T$  измерялся до-

полнительной термопарой, горячий и холодный спаи которой находились соответственно выше и ниже нагреваемого участка. Метод анализа результатов температурных измерений основан на том, что в режиме стационарной конвекции вдоль трубки устанавливается экспоненциальное распределение температуры

$$T \propto \exp\left(-\frac{kz}{L}\right).$$

За ноль принята температура охлаждающего воздуха. Безразмерный теплопоток – число Нуссельта – отношение конвективного теплового потока вдоль контура к молекулярному теплопотoku – пропорционально обратному квадрату пространственного декремента затухания  $k$

$$\text{Nu} = \frac{A}{b^2 k^2}, \quad (3)$$

где  $b = r/L = 0,0074$ . Коэффициент пропорциональности  $A$ , для магнитной жидкости равный 0,89, для керосина – 1,05, зависит от свойств жидкости. Тепловое число Рэлея [2] пропорционально перепаду температуры  $\Delta T$  на нагревателе:

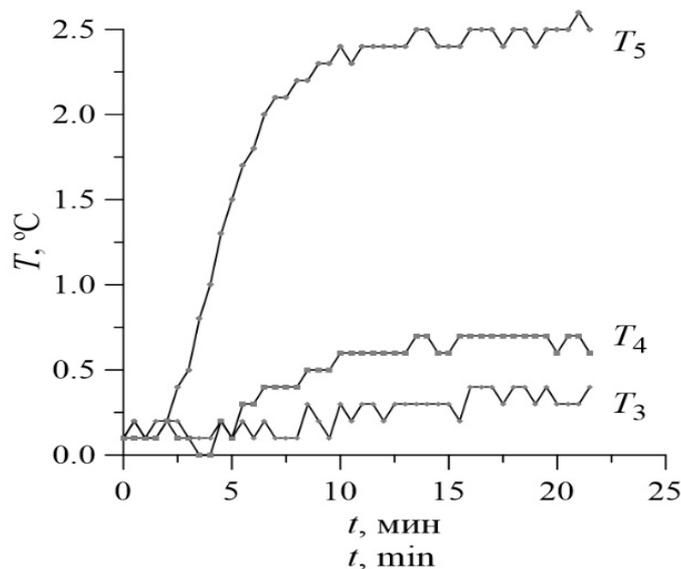
$$\text{Ra} = \frac{g\beta\rho r^3}{a\eta} \Delta T, \quad (4)$$

где  $g$  – модуль ускорения свободного падения. Результаты экспериментов представлялись в виде зависимости  $\text{Nu} = \text{Nu}(\text{Ra})$ . Подробно метод измерения

теплопоток в протяжённом замкнутом контуре описан в ранее опубликованной работе [16].

## Результаты и их обсуждение

В экспериментах стационарное распределение температуры вдоль контура с магнитной жидкостью устанавливалось через  $\approx 20$  мин после включения нагревателя. При размещении полюсных наконечников магнитопровода выше центра нагревателя температурное возмущение распространялось от нагревателя вниз, противоположно направлению оси  $z$  (см. рис. 1). Зависимость температуры поверхности контура от времени работы нагревателя при расположении источника магнитного поля на высоте  $z = +10$  мм приведена на рисунке 6. Аналогичный результат наблюдается и при размещении магнитопровода на высоте  $z = +5$  мм. Термомагнитная конвекция приводит к течению жидкости из нагревателя вниз, в то время как гравитационная конвекция имеет противоположное направление.



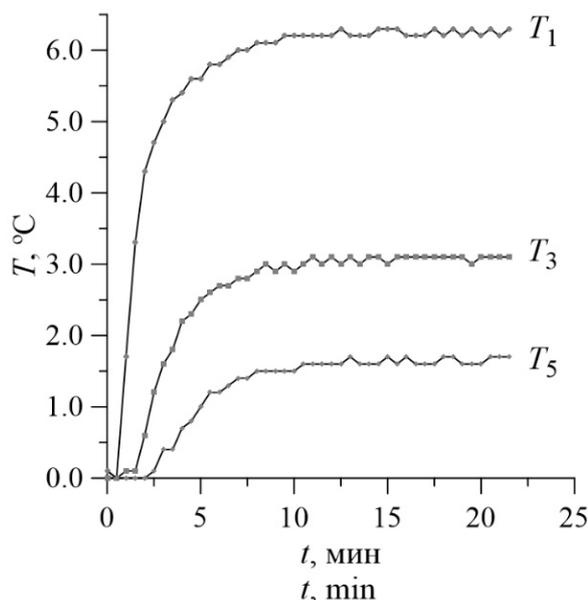
**Рис. 6.** Температура поверхности контура в зависимости от времени нагрева при размещении источника магнитного поля выше нагревателя (обозначения кривых соответствуют обозначениям термопар на рисунке 1)

**Fig. 6.** Contour surface temperature as a function of heating time when the magnetic field source is placed above the heater (the curve designations correspond to the thermocouple designations in Figure 1)

В рамках задачи об усилении конвективного теплопотока конкуренция гравитационной и термомагнитной конвекции не представляет интереса, а формула (3) несправедлива. Дальнейший анализ температурных профилей (см. рис. 6) не проводился.

При размещении полюсных наконечников магнитопровода в центре нагревателя и ниже температурное возмущение распространялось вверх, вдоль направле-

ния  $z$  (см. рис. 1). Температура поверхности контура в зависимости от времени, прошедшего с начала эксперимента, при расположении магнитопровода на высоте  $z = -10$  мм показана на рисунке 7. Аналогичный вид этой зависимости наблюдался при  $z = -5$  и  $z = 0$  мм. В этих случаях термомагнитная и гравитационная конвекции сонаправлены, что приводит к усилению конвективного теплопереноса



**Рис. 7.** Температура поверхности контура в зависимости от времени нагрева при размещении источника магнитного поля ниже нагревателя (обозначения кривых соответствуют обозначениям термодпар на рисунке 1)

**Fig. 7.** Contour surface temperature as a function of heating time when the magnetic field source is placed below the heater (the curve designations correspond to the thermocouple designations in Figure 1)

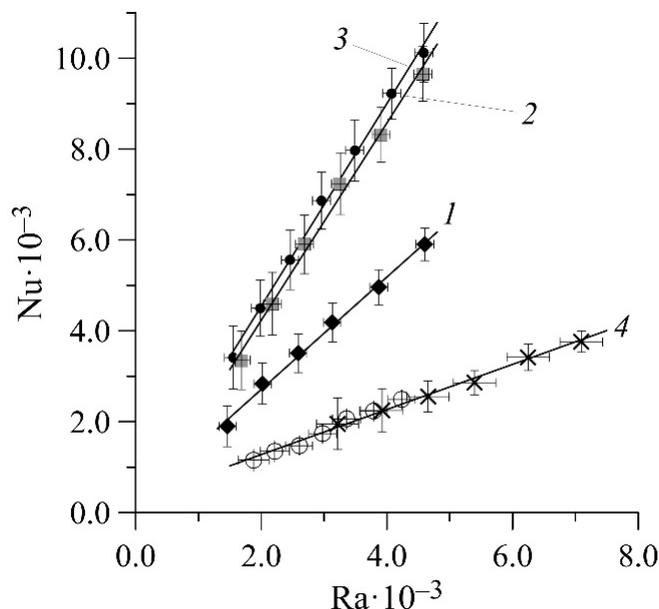
Для оценки вклада непосредственно термомагнитной конвекции в теплоперенос проводились контрольные опыты. Магнитопровод был демонтирован и, следовательно, теплоперенос осуществлялся только гравитационной конвекцией. В дополнение к контрольным опытам с магнитной жидкостью была проведена серия измерений, в которых контур заправлялся чистым керосином.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 8 в виде зависимости числа Нуссельта  $3$  от теплового числа  $Рэ$ -

ля 4. Кривая 1 соответствует опытам с размещением полюсных наконечников магнитопровода ниже центра нагревателя, на высоте  $z = -10$  мм, при различных мощностях нагрева, кривые 2 и 3 – опытам с размещением источника поля в точках  $z = -5$  и  $z = 0$  мм. Наконец, контрольным опытам без магнитного поля соответствует кривая 4, правая часть которой (крестики) – эксперименты с керосином, левая (круги) – с магнитной жидкостью. Доверительные интервалы соответствуют

ошибкам, обусловленным приборной погрешностью вольтметра, измеряющего термоЭДС, и равной  $0,2^{\circ}\text{C}$  для всех термопар. Учёт этой погрешности приводит к относительному среднеквадратичному от-

клонению пространственного декремента затухания температуры вдоль контура  $k$  не более 10% (в большинстве измерений не более 6%).



**Рис. 8.** Число Нуссельта в зависимости от теплового числа Рэлея: 1–3 – опыты с расположением источника магнитного поля на 10, 5 и 0 мм ниже нагревателя соответственно; 4 – опыты без магнитного поля

**Fig. 8.** Nusselt number as a function of Rayleigh number; 1–3 experiments with the location of the magnetic field source at 10, 5 and 0 mm below the heater, respectively; 4 – experiments without magnetic field

Как следует из формулы (3), соответствующая ошибка в числе Нуссельта не превышала 20%. Учёт приборной погрешности измерения перепада температуры на контуре  $\Delta T$  приводит к абсолютной ошибке теплового числа Рэлея (4) около  $0,1 \cdot 10^3$  для магнитной жидкости и  $0,3 \cdot 10^3$  для чистого керосина. Случайная ошибка температурных измерений, небольшой «дребезг» термограмм (см. рис. 7), не учитывалась. Величина случайной погрешности, оценённая по несмещённой дисперсии температуры в режиме стационарной конвекции, не превышала  $0,05^{\circ}\text{C}$ , что вчетверо меньше приборной погрешности. Систематические ошибки в свойствах жидкости и неточности геометрических параметров установки также не принима-

лись в расчёт. Учёт систематических ошибок привёл бы к пропорциональному смещению всех точек на рисунке 8, но не отразился на их взаимном расположении.

Из взаимного расположения экспериментальных кривых на рисунке 8 видно, что наибольшее (в 3–4 раза), усиление теплообмена в сравнении с гравитационной конвекцией наблюдалось при расположении полюсных наконечников магнитопровода на одной высоте с нагревателем и на 5 мм ниже нагреваемого участка. Соответствующие кривые 2 и 3 совпадают в пределах погрешности. Этого следовало ожидать из качественного анализа формулы (2). В этих ситуациях (см. рис. 3) область наиболее градиентного поля накла-

дывается на выходное сечение нагревателя, где магнитная жидкость имеет наибольшую температуру. По мере опускания полюсных наконечников вниз (кривая 1) градиентная область поля спускается к нижней части нагревателя, где температура жидкости меньше. Вклад термомагнитной конвекции в теплоток уменьшается.

Результат настоящей работы согласуется с исследованиями, выполненными в последние два десятилетия. В [17] гидродинамический контур с магнитной жидкостью использовался для охлаждения электронного чипа. Размещение одиночного цилиндрического постоянного магнита ниже по потоку относительно чипа привело к незначительному снижению температуры последнего с  $\approx 60$  до  $\approx 50^\circ\text{C}$ . Напротив, в [18] постоянный магнит в форме параллелепипеда был расположен так, что градиентное поле накладывалось на тепловой источник. Это приводило к уменьшению температуры нагревателя, например, мощного светодиода [19] в

2–4 раза по отношению к опытам в нулевом поле.

## Выводы

Проведены эксперименты, направленные на получение информации о влиянии относительного расположения источника неоднородного магнитного поля и нагревателя на интенсивность конвективного теплового потока вдоль вертикального гидродинамического контура, заполненного магнитной жидкостью. Показано, что теплоток может ослабевать или усиливаться в зависимости от положения источника поля. Ослабление потока связано с конкуренцией термомагнитной и гравитационной конвекции. Усиление отмечается, когда термомагнитная и гравитационная конвекции сонаправлены. Наибольшая интенсивность конвективного теплопереноса наблюдается в случае, когда область наиболее неоднородного магнитного поля накладывается на выходное сечение нагревателя.

## Список литературы

1. Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.
2. Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H. A heat transfer textbook. Cambridge MA, USA: Phlogiston Press, 2019. 784 p.
3. Finlayson B. A. Convective instability of ferromagnetic fluids // Journal of Fluid Mechanics. 1970. Vol. 40, no. 4. P. 753–767. <https://doi.org/10.1017/S0022112070000423>
4. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 356 с.
5. Matsuki H., Yamasava K. Experimental considerations on a new automatic cooling device using temperature-sensitive magnetic fluid // IEEE Transactions on Magnetics. 1977. Vol. 13, no. 5. P. 926–940. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1977.1059679>
6. Belyaev A. V., Smorodin B. L. The stability of ferrofluid flow in a vertical layer subject to lateral heating and horizontal magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2010. Vol. 322. P. 2596–2606. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.03.028>
7. Краков М. С., Никифоров И. В. Влияние меридионального течения и термомагнитной конвекции на характеристики магнитожидкостного уплотнения // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, № 12. С. 47–55.
8. Fumoto K., Yamagishi H., Ikegava M. A mini heat transport device based on thermo-sensitive magnetic fluid // Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering. 2007. Vol. 11. P. 201–210. <https://doi.org/10.1080/15567260701333869>

9. Optimal ferrofluids for magnetic cooling devices / M. S. Pattanaik, V. B. Varma, S. K. Cheekati, V. Chaudhary, R. V. Ramanujan // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, no. 24167. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03514-2>
10. Свободные колебания магнитной жидкости в сильном магнитном поле / В. М. Полунин, П. А. Ряполов, В. Б. Платонов, А. Е. Кузько // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62, № 3. С. 302–307. <https://doi.org/10.7868/S0320791916030138>
11. Косков М. А., Пшеничников А. Ф. Терромагнитная конвекция феррожидкости в вертикальном гидродинамическом контуре: интенсификация теплообмена в магнитном поле // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2022. Т. 162, № 6(12). С. 926–940. <https://doi.org/10.31857/S0044451022120136>
12. Lian W., Xuan Y., Li Q. Design method of automatic energy transport devices based on the thermomagnetic effect of magnetic fluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. P. 5451–5458. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.031>
13. Vargaftic N. B., Vinogradov Y. K., Yargin V. S. Handbook of physical properties of liquids and gases. 3 rd. augm. and rev. ed. New York, USA: Begel House, Inc., 1996. 1358 p.
14. Косков М. А., Лебедев А. В., Иванов А. С. О методе дифференциальной прогонки для получения кривых намагничивания ферроколлоидов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 3. С. 89–104. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-89-104>
15. Pshenichnikov A. F., Mekhonoshin V. V., Lebedev A. V. Magneto-granulometric analysis of concentrated ferroc colloids // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996. Vol. 161. P. 94–102. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(96\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(96)00067-4)
16. Косков М. А. Конвекция феррожидкости в замкнутом контуре: анализ температурного поля // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022. Т. 12, № 2. С. 166–182. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-2-166-182>
17. Xuan Y., Lian W. Electronic cooling using an automatic energy transport device based on thermomagnetic effect // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31, no. 8/9. P. 1487–1494. <https://doi.org/10.1016/j.apptthermaleng.2011.01.033>
18. A novel magnetic cooling device for long distance heat transfer / M. S. Pattanaik, S. K. Cheekati, V. B. Varma, R. V. Ramanujan // *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 201, no. 117777. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117777>.
19. A magnetic nanofluid device for excellent passive cooling of light emitting diodes / V B. Varma, S. K. Cheekati, M. S. Pattanaik, R. V. Ramanujan // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 7401–7419. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.237>

## References

1. Berkovsky B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnetic fluids: Engineering applications*. Oxford: Oxford University Press; 1985. 243 p.
2. Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H. *A heat transfer textbook*. Cambridge, MA: Phlogiston Press; 2019. 784 p.
3. Finlayson B.A. Convective instability of ferromagnetic fluids. *Journal of Fluid Mechanics*. 1970;40(4):753–767. <https://doi.org/10.1017/S0022112070000423>
4. Rosensweig R.E. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press; 1985. 344 p.
5. Matsuki H., Yamasava K. Experimental considerations on a new automatic cooling device using temperature-sensitive magnetic fluid. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1977;13(5):926–940. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1977.1059679>

6. Belyaev A.V., Smorodin B.L. The stability of ferrofluid flow in a vertical layer subject to lateral heating and horizontal magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010;322: 2596–2606. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.03.028>
7. Krakov M.S., Nikiforov I.V. Influence of the meridional flow and thermomagnetic convection on characteristics of magnetic fluid seal. *Technical Physics*. 2011;56(12):1745–1753. <https://doi.org/10.1134/S1063784211120103>
8. Fumoto K., Yamagishi H., Ikegava M. A mini heat transport device based on thermo-sensitive magnetic fluid. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*. 2007;11:201–210. <https://doi.org/10.1080/15567260701333869>
9. Pattanaik M.S., Varma V.B., Cheekati S.K., Chaudhary V., Ramanujan R.V. Optimal ferrofluids for magnetic cooling devices. *Scientific Reports*. 2021;11(24167). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03514-2>
10. Polunin V.M., Ryapolov P.A., Platonov V.B., Kuzko A.E. Free oscillations of magnetic fluid in strong magnetic field. *Acoustical Physics*. 2016;62(3):313–318. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1063771016030131>
11. Koskov M.A., Pshenichnikov A.F. Thermomagnetic convection of a ferrofluid in a vertical hydrodynamic loop: intensification of heat exchange in magnetic field. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2022;135(6):884–896. <https://doi.org/10.1134/S1063776122120044>
12. Lian W., Xuan Y., Li Q. Design method of automatic energy transport devices based on the thermomagnetic effect of magnetic fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52:5451–5458. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.031>
13. Vargaftic N.B., Vinogradov Y.K., Yargin V.S. Handbook of physical properties of liquids and gases. 3rd. augm. and rev. ed. New York: Begel House, Inc.; 1996. 1358 p.
14. Koskov M.A., Lebedev A.V., Ivanov A.S. About the differential sweep method for measuring of ferrocolloids magnetization curves. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologie*. 2023;13(3):89–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-89-104>
15. Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V. Magneto-granulometric analysis of concentrated ferrocolloids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996;161:94–102. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(96\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(96)00067-4)
16. Koskov M.A. Ferrofluid convection in a hydrodynamic loop: analysis of temperature field. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologie*. 2022; 12(2):166–182. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-2-166-182>
17. Xyan Y., Lian W. Electronic cooling using an automatic energy transport device based on thermomagnetic effect. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(8/9):1487–1494. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.033>
18. Pattanaik M.S., Cheekati S.K., Varma V.B., Ramanujan R.V. A novel magnetic cooling device for long distance heat transfer. *Applied Thermal Engineering*. 2022;201(1):117777. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117777>
19. Varma V.B., Cheekati S.K., Pattanaik M.S., Ramanujan R.V. A magnetic nanofluid device for excellent passive cooling of light emitting diodes. *Energy Reports*. 2022;8:7401–7419. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.237>

---

**Информация об авторе / Information about the Author**

**Косков Михаил Андреевич**, младший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: koskov.m@icmm.ru, ORCID: 0000-0001-8140-7774, Researcher ID: AAN-7092-2020

**Mikhail A. Koskov**, Junior researcher, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russian Federation, e-mail: koskov.m@icmm.ru, ORCID: 0000-0001-8140-7774, Researcher ID: AAN-7092-2020