

УДК 532.57/681.121.89.082.74
PACS 01.50.Pa

Апробация электромагнитной индукционной системы для измерения скорости движения жидкого металла

А. Д. Мамыкин^{1†}, С. И. Банщиков^{1,2}

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

†mad@icmm.ru

Проведена апробация двух конфигураций накладной индукционной системы измерения скорости трансформаторного типа, одна из которых позволяет получать информацию о линейной компоненте скорости жидкого металла, а другая – об азимутальной. Система успешно испытана на различных рабочих средах с разной проводимостью – твёрдом дюралюминии, жидком галлиевом сплаве и жидком натрии. Изучены чувствительность и погрешность измерительной системы, а также влияние перепадов температуры окружающей среды и эффекта сноса магнитного поля на её передаточную функцию. Достигнутой чувствительности достаточно для регистрации сигнала большинством современных цифровых вольтметров. Калибровка накладной измерительной системы произведена на натриевом испытательном стенде НИЦ МСС в диапазоне 0–4.42 м/с (0–120 м³/ч). Снос магнитного поля не повлиял на линейность полученной калибровочной характеристики системы. Итоговая относительная погрешность составила 6.5 % во всём диапазоне измерений. Система в линейном исполнении представляет собой практически готовый расходомер для жидких металлов. Для применения её в промышленных условиях достаточно доукомплектования защитным термокожухом с принудительным охлаждением. Накладная индукционная система измерения скорости признана эффективной и в закруглённом исполнении уже активно применяется, например, в корреляционном расходомере «ПИР».

Ключевые слова: измерение скорости; электромагнитный расходомер; жидкий металл

Поступила в редакцию 17.09.2025; после рецензии 07.11.2025; принята к опубликованию 07.11.2025

Approbation of an electromagnetic induction system for measuring the liquid metal velocity

A. D. Mamykin^{1†}, S. I. Banshchikov^{1,2}

¹ Institute of Continuous Media Mechanic UB RAS, Perm, Russia

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

†mad@icmm.ru

Two configurations of a transformer-based clamp-on induction system for velocity measurement were tested. One configuration provides information on the linear component of the liquid metal velocity, while the other – on the azimuthal component. The system was successfully tested on working media with different conductivities: solid duralumin, liquid gallium alloy, and liquid sodium. We studied the sensitivity and error of the measurement system as well as the effect of ambient temperature fluctuations and magnetic field drift on its transfer function. The achieved sensitivity is sufficient for signal recording by most modern digital voltmeters. Calibration of the clamp-on measurement system was carried out on the sodium test bench of the Scientific and Testing Center of Continuous Media Mechanics in the range of 0 – 4.42 m/s (0 – 120 m³/h). Magnetic field drift did not

affect the linearity of the obtained calibration characteristic of the system. The final relative error was 6.5 % over the entire measurement range. The inline system is a virtually ready-to-use flowmeter for liquid metals. For industrial use, it only requires the addition of a protective thermal box with forced cooling. The clamp-on induction system for velocity measurement has proven effective and, in a rounded version, is already actively used, for example, in the 'PIR' correlation flowmeter.

Keywords: velocity measurements; electromagnetic flowmeter; liquid metal

Received 17 September 2025; revised 07 November 2025; accepted 07 November 2025

doi: 10.17072/1994-3598-2025-4-24-32

1. Введение

Измерение скорости потоков жидких металлов является нетривиальной задачей из-за их непрозрачности и, зачастую, высокой температуры и химической активности. Однако эти недостатки компенсируются высокой электропроводностью жидких металлов, что позволяет применять индукционные и кондукционные методы измерения.

Существует большое количество типов датчиков измерения скорости жидких металлов [1]. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Основные области применения таких датчиков – металлургическая и атомная промышленности, а также научные лаборатории. Широкое распространение получили кондуктометрические датчики скорости [2, 3]. Их преимуществом является простота реализации и широкие возможности измерения характеристик пульсаций скорости. Недостатками являются инвазивность, необходимость хорошего электрического контакта с жидким металлом и уязвимость постоянных магнитов к высоким температурам. Существуют методы, основанные на измерении взаимных корреляций между сигналами термопар, установленных вдоль потока [4, 5]. Преимуществом корреляционного метода является прямое измерение скорости без необходимости периодической калибровки. Недостатками являются необходимость погружения термопар в поток жидкости, а также ограничения со стороны гипотезы Тейлора о вмерзновенности поля температуры в поле скорости [6, 7]. Можно также отметить современные бесконтактные методы, основанные на измерении силы Лоренца [8, 9] или вращении постоянного магнита [10]. Применение нашли и алгоритмы машинного обучения для вычисления расхода в неинвазивном термоконвективном расходемере, но только для узкого диапазона расходов [11].

Существуют различные типы бесконтактных систем измерения скорости электропроводных сред, основанных на индукционном принципе работы [12, 13]. По типу преобразователей они могут быть разделены на две группы: в первой используются преобразователи трансформаторного/дифференциально-трансформаторного типа, во второй используются линейные индукторы. Измерительные системы с линейными индукторами используют бегущее и/или пульсирующее магнитные поля и, хотя

и обладают высокой чувствительностью (до 3 В·с/м), являются достаточно громоздкими по конструкции и сложными с электротехнической точки зрения [13]. Индукционные системы с преобразователями первого типа используют либо осесимметричные, либо радиальные поля возбуждения. Первые конструктивно являются «охватывающими» трубопровод [14–16], а вторые являются накладными [10, 17]. Простота конструкции датчиков и небольшое число катушек – основные достоинства измерительных систем с осесимметричным полем возбуждения. Существенными недостатками охватывающих датчиков является сложность их установки на жидкометаллическом контуре, требующей «врезания» участка контура с смонтированным датчиком, а также невысокая чувствительность. Также датчики такого типа трудно защитить от теплового воздействия контролируемой среды.

Преимуществом накладных индукционных систем перед охватывающими, является то, что их можно монтировать на уже введенные в эксплуатацию трубопроводы без необходимости демонтажа. Также несложно осуществить теплозащиту датчиков накладного типа, что необходимо при работе с большинством металлов в жидком состоянии. Важно и то, что такими датчиками можно осуществлять измерения при доступе к объекту с одной стороны – например, при перемешивании металла в резервуарах, определения скорости движения в лотках. Поскольку индуцированное при движении жидкого металла магнитное поле пропорционально магнитному числу Рейнольдса, то о скорости контролируемой среды можно судить по изменению одной из величин: суммарного магнитного поля, вторичного магнитного поля или тока возбуждения. Так как электрический сигнал полностью определяется амплитудой, частотой и фазой, то каждый из этих параметров может служить источником информации о скорости движения контролируемой среды. Основным параметром является амплитуда выходного сигнала, но во многих случаях с целью уменьшения влияния электромагнитных помех учитывается и фаза выходного сигнала [18].

При совмещении натурных измерений с численным моделированием возможно измерение индукционной системой не только скорости движения металла, но и его электропроводности [9].

Цель данного исследования состоит в апробации индукционной накладной системы измерения скорости (НИСИС) трансформаторного типа с радиальным полем для применения в различных условиях и с разными рабочими средами. В частности, рассмотрена возможность использования такой системы на установках лаборатории технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН и испытательной лаборатории МСС.

2. Экспериментальная установка и методы

Схемы НИСИС трансформаторного типа с радиальным полем в двух исполнениях (линейном и закруглённом) приведены на рис. 1. На зубцах Ш-образного ферромагнитного сердечника 1 размещены две генерирующие катушки 2 и 3 и одна измерительная 4. Генерирующие катушки создают переменное магнитное поле возбуждения и соединены таким образом, что магнитные потоки, возбуждённые в центральном зубце, направлены встречно. В магнитном поле системы расположен канал с жидким металлом 5. Если катушки 2 и 3 создают одинаковые и встречно направленные потоки, то остаточное напряжение в катушке 4 при отсутствии движения металла в канале будет минимальным, так как магнитные потоки вторичного вихревого поля также направлены встречно. Часть вторичного магнитного поля, возникающего при движении электропроводной среды, замыкается через средний зубец, а в измерительной катушке наводится ЭДС, пропорциональная скорости движения среды. Система в линейном исполнении является классической и позволяет измерять линейную скорость проводящей среды. В частном случае, при размещении системы вдоль трубы с проводящей средой (как показано на рис. 1 сверху), НИСИС позволяет измерять транзитную скорость потока в этой трубе. Система в закруглённом исполнении нужна для измерения азимутальной компоненты скорости движения электропроводной среды в более специфических задачах. Например, задача измерения скорости вращения жидкого металла в электромагнитном перемешивателе или задача о регистрации азимутального возмущения скорости в корреляционных расходомерах [19]. В таких расходомерах в качестве метки, перемещающейся вместе с потоком, используется сильная локальная неоднородность азимутальной компоненты скорости самого жидкого металла. Создаётся такая неоднородность при помощи импульсного воздействия вращающимся магнитным полем.

Предварительная апробация НИСИС в закруглённой конфигурации проводилась в цилиндрической постановке с использованием электромагнитного перемешивателя «Топаз» (рис. 2), подробно описанного в [20]. Данный перемешиватель состоит из шести уровней (колец) по шесть катушек

на каждом. Из них использовались только два соседних уровня: нижний включался в режиме вращающегося магнитного поля, а половина верхнего – в режиме измерительной системы (как показано синим на рис. 2 справа) по вышеописанной схеме.

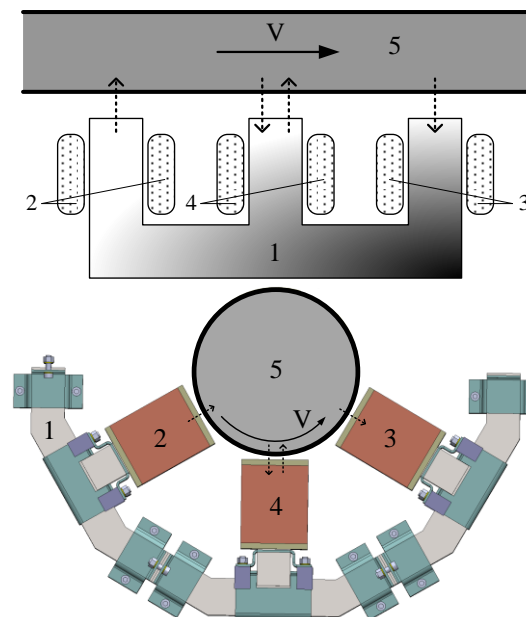


Рис. 1. Схемы НИСИС в линейном исполнении (сверху) и в закруглённом исполнении (снизу). Пунктирными стрелками показаны направления магнитных потоков

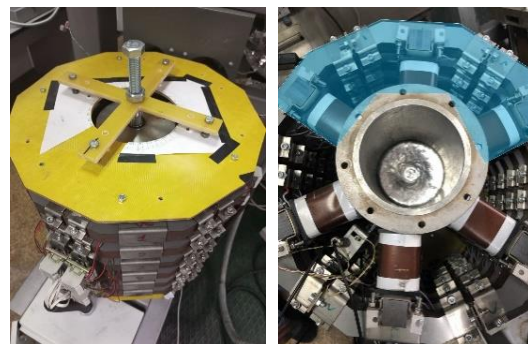


Рис. 2. Фотографии установки для предварительной апробации системы: на твёрдом металле (слева), на жидком металле (справа)

В качестве подвижной среды, скорость которой нужно измерить, брались последовательно диск из дюралюминия и жидкий галлиевый сплав $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$ (вес. %). Размеры диска и объём жидкого металла выбирались таким образом, чтобы попадать в область действия обоих задействованных индукторов перемешивателя. Однако стоит отметить, что диаметр диска составлял 150 мм, а внутренний диаметр цилиндра из нержавеющей стали, заполненного жидким сплавом – 98 мм.

Нижний индуктор подключался к трёхфазному источнику Hyundai N700E-110HF/150HFP и приводил во вращение рабочую среду с заданной интенсивностью и направлением. Катушки возбуждения

измерительной системы питались от однофазного источника Pacific Smart Source с частотами от 25 до 150 Гц (в экспериментах с диском) и от ЛАТР с частотой 50 Гц (в экспериментах с жидким металлом). Напряжение на регистрирующей катушке измерялось с высокой частотой (25 кГц) с помощью платы NI-9239 National Instruments. Обработка данных позволяла вычислить величину изменения амплитуды напряжения, вызванного азимутальным движением рабочей среды, путём вычисления среднеквадратичного значения (СКО) сигнала на последовательных отрезках в одну секунду.

Для измерения скорости движения жидкого металла в трубопроводе была создана измерительная система в линейном исполнении (рис. 3) и система крепления.



Рис. 3. Фотографии общего вида НИСИС в линейном исполнении (слева) и его сборки на испытательный стенд (справа)

Финальная апробация и калибровка накладной измерительной системы проводились на натриевом стенде НИЦ МСХ [21] в температурном диапазоне 140–210 °С. Натриевый испытательный стенд предназначен для испытаний электромагнитных насосов, расходомеров и запорного оборудования работающих на жидком натрии в качестве рабочей среды. Работу стенда обеспечивают следующие системы: система хранения натрия, система вакуумирования, аргоновая система, система измерения уровня в натриевых емкостях, система пожаротушения и система измерения (основная – ПЛК «Овен», RS-485; дополнительная – National Instruments).

Калибровка измерительной системы производилась по эталонному фабричному расходомеру ЭЛ-МЕТРО S080. Данный эталонный расходомер относится к классу кориолисовых и имеет класс точности 0.5, номинальный и максимальный расходы 150 и 210 т/ч соответственно. При апробации НИСИС также учитывался эффект сноса магнитного поля, который начинает проявляться, когда магнитное число Рейнольдса приближается к единице. Определим магнитное число Рейнольдса как:

$$Re_m = \mu \mu_0 \sigma R V,$$

где μ , μ_0 – относительная и абсолютная магнитные проницаемости, σ – электропроводность, R – характерный размер, V – скорость. При $Re_m \geq 1$ магнит-

ные линии поля катушек и линии вторичного магнитного поля будут искажаться, что может сказаться на работе НИСИС (линейности калибровочной зависимости).

3. Результаты

Рассмотрим последовательно все этапы апробации НИСИС: предварительные на установке «Топаз» и финальный на натриевом контуре.

3.1. Вращение твёрдого диска

Типовой эксперимент проходил следующим образом. На катушки возбуждения подавалось переменное напряжение от источника Pacific Smart Source с заданной частотой от 25 до 150 Гц и напряжением от 50 до 220 В. Затем на фиксированное время от 15 до 55 секунд включался трёхфазный источник Hyundai, питающий нижнее кольцо напряжением 180 В с частотой 50 Гц. Возникающее при этом вращающееся магнитное поле раскручивало диск. После отключения питания Hyundai включалась запись в файл напряжения регистрирующей катушки. Пример эволюции амплитуды (СКО) напряжения на измерительной катушке (далее – сигнал НИСИС) в течение эксперимента для разных значений напряжения возбуждения приведён на рис. 4.

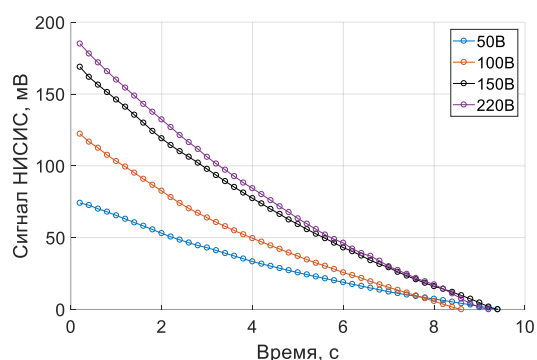


Рис. 4. Эволюция СКО сигнала для разных значений напряжения возбуждения. Твёрдый металл. Частота – 50 Гц

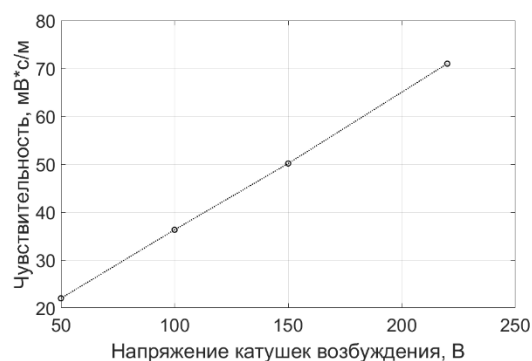


Рис. 5. Зависимость чувствительности НИСИС от напряжения возбуждения. Твёрдый металл. Частота – 50 Гц

Видно, что с увеличением питающего напряжения отклик системы улучшается. График зависимости чувствительности измерительной системы от напряжения возбуждения приведён на рис. 5.

Цилиндр из дюралюминия был снабжён оптической системой для измерения частоты его вращения. На рисунке 6 приведены примеры эволюций частоты вращения, линейной скорости боковой поверхности диска и сигнала системы измерения (напряжение возбуждения 220 В, частота 50 Гц, время разгона 35 секунд).

Кривые, полученные с помощью оптической системы, не доходят до оси абсцисс по причине того, что на диске имела только одна отражающая метка и остановка диска не фиксировалась. Система также зеркально чувствительна к направлению вращения металлического диска.

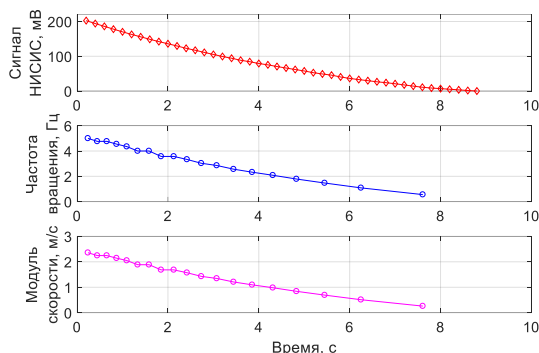


Рис. 6. Эволюция СКО напряжения, частоты вращения диска и линейной скорости на радиусе 75 мм

Изучался отклик НИСИС при различных частотах напряжения возбуждения системы регистрации. Для этого сначала фиксировалось напряжение и менялась частота (при этом менялся и ток в катушках возбуждения), а затем фиксировался ток и менялась частота (при этом менялось и напряжение в катушках возбуждения). Был сделан вывод о том, что система чувствительна именно к изменению напряжения. При фиксированном напряжении на катушках возбуждения чувствительность системы практически не изменяется с изменением частоты. Это позволит при необходимости повысить дискретизацию сигнала НИСИС с помощью повышения частоты на катушках возбуждения (можно будет вычислять СКО на отрезках меньше 1 секунды).

3.2. Вращение галлиевого сплава

Замеры производились по такой же схеме, как и в случае с металлическим диском. На рис. 7 приведён пример отклика системы для различных значений напряжения возбуждения.

Интересно отметить, что замедление жидкого галлиевого сплава происходит иначе, чем торможение твёрдого диска. В первом случае скорость падает по закону, близкому к квадратичному, а во втором – к линейному. При этом НИСИС фиксирует колебания жидкой среды, которые становятся

лучше различимыми с повышением напряжения возбуждения. Чувствительность системы в случае жидкого металла оказалась примерно в семь раз ниже, чем для диска (рис. 8). Тому есть две причины. Во-первых, проводимость галлиевого сплава в 9 раз меньше, чем у дюралюминия. А во-вторых, диаметры вращающихся сред отличаются в полтора раза, а значит, измерительная система больше удалена от рабочей среды в случае жидкой среды.

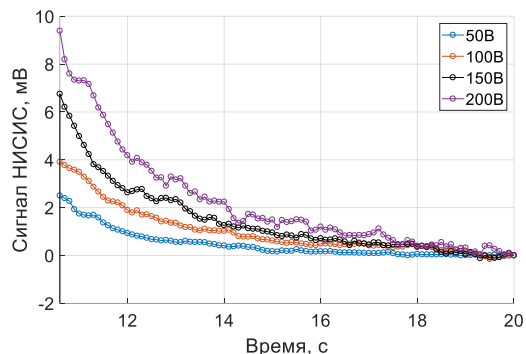


Рис. 7. Эволюция СКО сигнала для разных значений напряжения возбуждения. Жидкий металл. Частота – 50 Гц

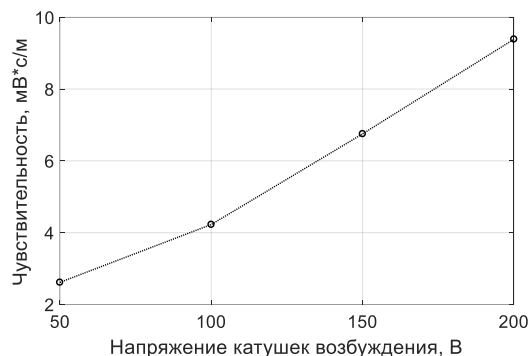


Рис. 8. Зависимость чувствительности НИСИС от напряжения возбуждения. Жидкий металл. Частота – 50 Гц

3.3. Транзитное течение натрия

Финальная апробация и калибровка НИСИС проводились на натриевом стенде НИЦ МСС в температурном диапазоне по натрию 140 – 210 °С. Напряжение на катушках возбуждения НИСИС задавалось равным 150 В для предотвращения их нагрева за счёт Джоулева тепла.

На рисунке 9 приведён пример сигнала измерительной системы и показания расхода в м³/ч опорного расходомера. Видно, что НИСИС чувствителен к изменению расхода, однако с увеличением расхода растут колебания его сигнала. Диапазон расхода натрия составил от 0 до 120 м³/ч. При этом средняя по сечению скорость внутри трубы составила от 0 до 4.42 м/с, а магнитное число Рейнольдса, посчитанное через радиус трубы (49 мм), достигало значения 2.1. Таким образом, уже начиная с расхода 60 м³/ч мог происходить снос магнитного поля.

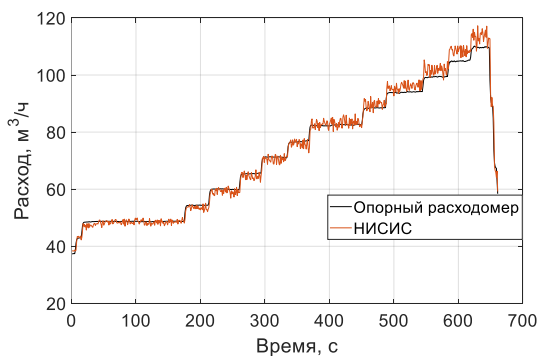


Рис. 9. Пример сигнала НИСИС в сравнении с показаниями опорного расходомера

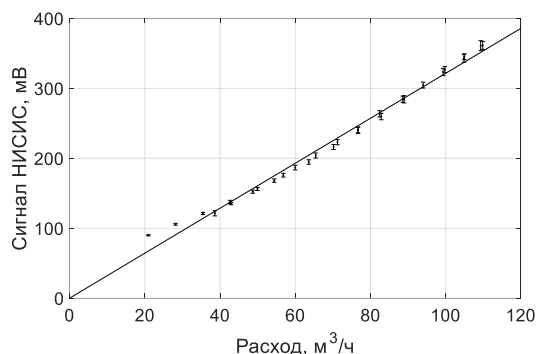


Рис. 10. Калибровочная прямая НИСИС

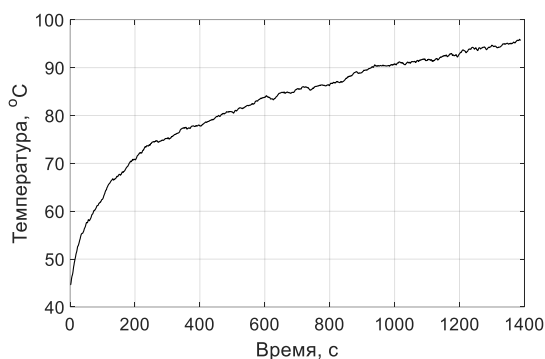


Рис. 11. График температуры НИСИС во время калибровочных испытаний

На рисунке 10 приведена полученная калибровочная характеристика измерительной системы по опорному расходомеру. Вертикальными отрезками показаны СКО сигнала для данного расхода. Если теперь провести линейную аппроксимацию полученных точек, можно получить результирующую калибровочную прямую (чёрная прямая на рисунке). Видно, что точки хорошо ложатся на прямую, существенной нелинейности не наблюдается даже в области $Re_m \geq 1$.

Итоговая чувствительность прибора составила $3.3 \text{ мВ} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ или $90 \text{ мВ} \cdot \text{с}/\text{м}$. Калибровочный коэффициент, таким образом, получился равным $302.5 \text{ м}^3/(\text{В} \cdot \text{ч})$. Максимальная относительная погрешность измерений составила 6.5% . В составе

НИСИС линейного исполнения был также предусмотрен датчик температуры. Он представлял собой хромель-алюмелевую термопару, установленную вплотную к измерительной катушке. С помощью этого датчика производился контроль перегрева расходомера. На рисунке 11 приведён график температуры НИСИС во время калибровочных испытаний.

Видно, что во время калибровочной сессии температура НИСИС менялась примерно на 50°C , что не приводило к нарушению её работы (изменению чувствительности и разброса показаний), что выражается в том, что его показания хорошо ложатся на калибровочную прямую (рис. 10). Соответственно, можно сделать вывод, что за счёт балансной измерительной схемы показания НИСИС не чувствительны к изменению температуры окружающей среды.

4. Заключение

В рамках данной работы проведена апробация накладной индукционной системы измерения скорости трансформаторного типа двух конфигураций — линейной и закруглённой. Система успешно испытана на различных рабочих средах с разной проводимостью — твёрдом дюралюминии ($26 \text{ МСм}/\text{м}$), жидком галлиевом сплаве ($2.9 \text{ МСм}/\text{м}$) и жидком натрии ($7.8 \text{ МСм}/\text{м}$). Чувствительность системы в закруглённой конфигурации составила $50 \text{ мВ} \cdot \text{с}/\text{м}$ для твёрдого дюралюминия и $7 \text{ мВ} \cdot \text{с}/\text{м}$ для жидкого галлия. Для жидкого натрия была достигнута чувствительность $90 \text{ мВ} \cdot \text{с}/\text{м}$ при использовании системы в линейной конфигурации. Такой чувствительности достаточно для регистрации большинством современных цифровых вольтметров. Примечательно, что чувствительность НИСИС в линейном исполнении применительно к жидким металлам на порядок выше, чем в закруглённом, несмотря на то что проводимость отличается только в 2.7 раз. Авторы связывают это с тем, что объём металла, попадающего в область действия системы, существенно больше в случае транзитного течения металла по трубе, чем в случае его азимутального вращения.

Система в линейном исполнении представляет собой практически готовый расходомер для жидких металлов. Для применения его в промышленных условиях достаточно будет добавить защитный термокожух с принудительным охлаждением. Диапазон работы такого расходомера с относительной погрешностью 6.5% составил $20\text{--}120 \text{ м}^3/\text{ч}$. Снос магнитного поля не повлиял на линейность калибровочной характеристики системы.

Таким образом, накладная индукционная система измерения скорости признана эффективной и уже активно применяется, например, в корреляционном расходомере «ПИР» (Пермский индукционный расходомер) [19].

Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124012300246-9.

Список литературы

1. Shercliff J. A. *Theory of Electromagnetic Flow Measurement*. Cambridge: Cambridge University Press. 1962. 164 p.
2. Von Weissenfluh T. Probes for local velocity and temperature measurements in liquid metal flow // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1985. Vol. 28. P. 1563–1574.
3. Ricou R., Vives C. Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated magnet probe // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1982. Vol. 25. P. 1579–1588. DOI: 10.1016/0017-9310(82)90036-9
4. Belyaev I. A., Razuvaev N. G., Sviridov V. G., Zagorsky V. S. Liquid metal downflow in an inclined heated tube affected by a longitudinal magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 2015. Vol. 51, № 4. P. 673–684.
5. Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // *Europhysics Letters*. 2015. Vol. 109, № 1, 14002. DOI: 10.1209/0295-5075/109/14002
6. Мамыкин А. Д., Халилов Р. И., Голбрайт Е., Колесниченко И. В. Применение магнитного препятствия для генерации пульсаций при расходомерии жидкометаллического теплоносителя, основанное на принципе температурных корреляций // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2023. № 3. P. 14–28. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.017-028
7. Мамыкин А. Д. Метод температурных корреляций для оценки скорости крупномасштабной циркуляции при турбулентной конвекции жидкого металла в наклонном цилиндре // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2025. № 1. С. 161–173. DOI: 10.31857/S1024708425010083
8. Thess A., Votyakov E., Kolesnikov Y. Lorentz force velocimetry // *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 96, 164501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.164501
9. Krauter N., Stefani F. Simultaneous measurement of flow velocity and electrical conductivity of a liquid metal using an eddy current flow meter in combination with a look-up-table method // *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 22, 9018. DOI: 10.3390/s23229018
10. Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Force-free and contactless sensor for electromagnetic flowrate measurements // *Magnetohydrodynamics*. 2009. Vol. 45. P. 451–458.
11. Amaral J., Silva J. R. C., de Andrade D. S. M., Ferreira L. T., Quirino T. M., Quirino J. M. Machine learning algorithms applied to the inference of the flow rate in a non-intrusive thermal flow meter //

- Abstr. of the 4th Int. Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). Sao Paulo, Brazil. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/INSCIT.2019.8868345
12. Ratajczak M., Hernández D., Richter T., Otte D., Buchenau D., Krauter N., Wondrak T. Measurement techniques for liquid metals // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 228, 012023. DOI:10.1088/1757-899X/228/1/012023
13. Циркунов В. Э., Жейгур Б. Д., Сермонс Г. Я., Калинин Р. К. Бесконтактный контроль потока жидких металлов. Рига: «Зинатне», 1973. 252 с.
14. Kumar M., Tordjeman P., Bergez W., Cavarero M., Paumel K., Jeannot J. P. Towards quantitative void fraction measurement with an eddy current flowmeter for fourth generation sodium cooled fast reactors: a simplified model // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2016. Vol. 63, № 3. P. 1471–1476. DOI: 10.1109/TNS.2016.2542191
15. Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Contactless electromagnetic phase-shift flowmeter for liquid metals // *Measurement Science and Technology*. 2011. Vol. 22, 055402. DOI: 10.1088/0957-0233/22/5/055402
16. Pavlinov A., Khalilov R., Mamykin A., Kolesnichenko I. Eddy current flowmeter for sodium flow // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 208, 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/208/1/012031
17. Forbriger J., Stefani F. Transient eddy current flow metering // *Measurement Science and Technology*. 2015. Vol. 26, 105303. DOI: 10.1088/0957-0233/26/10/105303
18. Looney R., Priede J. Concept of a next-generation electromagnetic phase-shift flowmeter for liquid metals // *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019. Vol. 65. P. 128–135, DOI: 10.1016/j.flow-measinst.2018.11.019
19. Колесниченко И. В., Халилов Р. И., Мамыкин А. Д. Корреляционный способ определения расхода жидкого металла и безэлектродный электромагнитный расходомер жидкого металла для его осуществления. Патент РФ № 2791036. Приоритет от 24.06.2022.
20. Мамыкин А. Д., Голбрайт Е. Особенности турбулентности в электромагнитном перемешивателе жидкого металла // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2023. № 4. С. 62–68. DOI: 10.17072/1994-3598-2023-4-62-68
21. Халилов Р. И., Балашов В. А. Натриевый испытательный стенд // *Тезисы докладов XXIV Зимней Школы по механике сплошных сред*. 2025. С. 311.

References

1. Shercliff J. A. *Theory of Electromagnetic Flow Measurement*. Cambridge: Cambridge University Press, 1962. 164 p.

2. Von Weissenfluh T. Probes for local velocity and temperature measurements in liquid metal flow. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 1985, vol. 28, pp. 1563–1574.
3. Ricou R., Vives C. Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated magnet probe. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 1982, vol. 25, pp. 1579–1588. DOI: 10.1016/0017-9310(82)90036-9
4. Belyaev I. A., Razuvaev N. G., Sviridov V. G., Zagorsky V. S. Liquid metal downflow in an inclined heated tube affected by a longitudinal magnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 673–684.
5. Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium. *Europhysics Letters*, 2015, vol. 109, no. 1, 14002. DOI: 10.1209/0295-5075/109/14002
6. Mamykin A. D., Khalilov R. I., Golbraikh E., Kolesnichenko I. V. Based on the temperature correlation principle, the use of a magnetic obstacle to generate pulsations in the flow measurement of a liquid metal coolant. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2023, no. 3, pp. 14–28. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.3.017-028
7. Mamykin A. D. Method of temperature correlations for estimating the large-scale circulation rate in the case of turbulent convection of liquid metals in an inclined cylinder. *Fluid Dynamics*, 2025, vol. 60, 11. DOI: 10.1134/S0015462824604376
8. Thess A., Votyakov E., Kolesnikov Y. Lorentz force velocimetry. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, 164501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.164501
9. Krauter N., Stefani F. Simultaneous measurement of flow velocity and electrical conductivity of a liquid metal using an eddy current flow meter in combination with a look-up-table method. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 22, 9018. DOI: 10.3390/s23229018
10. Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Force-free and contactless sensor for electromagnetic flowrate measurements. *Magnetohydrodynamics*, 2009, vol. 45, pp. 451–458.
11. Amaral J., Silva J. R. C., de Andrade D. S. M., Ferreira L. T., Quirino T. M., Quirino J. M. Machine learning algorithms applied to the inference of the flow rate in a non-intrusive thermal flowmeter. *Abstr. of the 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IN-SCIT.2019.8868345
12. Ratajczak M., Hernández D., Richter T., Otte D., Buchenau D., Krauter N., Wondrak T. Measurement techniques for liquid metals. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 228, 012023. DOI:10.1088/1757-899X/228/1/012023
13. Tsirkunov V. A., Zheigur B. D., Sermons G. Ya., Kalnin R. K. *Beskontaktnyi kontrol potoka zhidkikh metallov* [Non-contact control of liquid metals flow]. Riga: Zinatne, 1973. 252 p. (In Russian).
14. Kumar M., Tordjeman P., Bergez W., Cavarro M., Paumel K., Jeannot J. P. Towards quantitative void fraction measurement with an eddy current flowmeter for fourth generation sodium cooled fast reactors: a simplified model. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, vol. 63, no. 3, pp. 1471–1476. DOI: 10.1109/TNS.2016.2542191
15. Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Contactless electromagnetic phase-shift flowmeter for liquid metals. *Measurement Science and Technology*, 2011, vol. 22, 055402. DOI: 10.1088/0957-0233/22/5/055402
16. Pavlinov A., Khalilov R., Mamykin A., Kolesnichenko I. Eddy current flowmeter for sodium flow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 208, 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/208/1/012031
17. Forbriger J., Stefani F. Transient eddy current flow metering. *Measurement Science and Technology*, 2015, vol. 26, 105303. DOI 10.1088/0957-0233/26/10/105303
18. Looney R., Priede J. Concept of a next-generation electromagnetic phase-shift flowmeter for liquid metals. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, vol. 65, pp. 128–135, DOI: 10.1016/j.flow-measinst.2018.11.019
19. Kolesnichenko I. V., Khalilov R. I., Mamykin A. D. *Korrelyatsionnyi sposob opredeleniia raskhoda zhidkogo metalla i bezelektrodnyi elektromagnitnyi raskhodomer dlia ego osushchestvleniia* [A correlation method for determining the flow rate of liquid metal and an electrodeless electro-magnetic liquid metal flow meter for its implementation]. Patent RU no. 2791036, 2022.
20. Mamykin A. D., Golbraikh E. Features of turbulence in the electromagnetic liquid metal stirrer. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 4, pp. 62–68. DOI: 10.17072/1994-3598-2023-4-62-68
21. Khalilov R. I., Balashov V. A. Natrievyi ispytatel'nyj stend [A sodium test bench]. *Abstr. of XXIV Perm Winter School on Continuous Media Mechanics*, 2025, p. 311 (In Russian).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Мамыкин А. Д., Банщикова С. И. Апробация электромагнитной индукционной системы для измерения скорости движения жидкого металла // Вестник Пермского университета. Физика. 2025. № 4. С. 24–32. doi: 10.17072/1994-3598-2025-4-24-32

Please cite this article in English as:

Mamykin A. D., Banshchikov S. I. Approbation of an electromagnetic induction system for measuring the liquid metal velocity. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2025, no. 4, pp. 24–32. doi: 10.17072/1994-3598-2025-4-24-32

Сведения об авторах

1. *Андрей Дмитриевич Мамыкин*, к.ф.-м.н., н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королёва 1, 614013, г. Пермь.
2. *Семён Игоревич Банищиков*, лаборант, лаборатория технологической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королёва, 1, Пермь, 614013; студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Комсомольский пр., 29, Пермь, Пермский край, 614990.

Author information

1. *Andrey D. Mamykin*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
2. *Semyon I. Banshchikov*, Laboratory Assistant, Laboratory of Technological Hydrodynamics, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia; Student, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia