

СТАЦИОНАРНОЕ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО НАТРИЯ В КАНАЛЕ*

Р.И. Халилов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.Ю. Васильев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

И.В. Колесниченко, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.Д. Мамыкин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.М. Павлинов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.В. Шестаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Рассматривается несколько МГД-устройств, работающих в жидкометаллическом натриевом контуре. Объединяющая особенность этих устройств – цилиндрический канал диаметром 68 мм, а также взаимодействие потока жидкого натрия с магнитными полями. Первым устройством является линейный цилиндрический МГД-насос для перекачивания жидкого натрия в контуре. Следующее МГД-устройство – расходомер для потока жидкого натрия. Рассматриваются несколько способов измерения расхода жидкого натрия: кондукционный, индукционный и кросс-корреляционный на основе сигналов с малоинерционных термопар. Приводятся результаты численных расчетов, экспериментальные данные.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, турбулентность, жидкий натрий, магнитное поле.

Одним из рассматриваемых МГД-устройств является индукционный цилиндрический насос для жидкого натрия. В работе описаны три варианта индукционного насоса бегущего магнитного поля. Бегущее магнитное поле генерируется кольцевыми катушками, расположенными вдоль канала. Канал представляет собой цилиндр с вставкой в центральной части. Вставка необходима для подавления возвратных течений в канале. Количество кольцевых катушек в насосе определяет вариант насоса. Минимальный по габаритам и производительности насос содержит 6 кольцевых катушек для генерации магнитного поля.

Средний насос содержит 18 катушек, в максимальной версии насоса 24 катушки.

Следующее МГД-устройство – расходомер для потока жидкого натрия. Рассматриваются несколько способов измерения расхода жидкого натрия: кондукционный, индукционный и кросс-корреляционный на основе сигналов с малоинерционных термопар.

Все системы расходомера смонтированы на прямом отрезке трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 68 мм и длиной 500 мм, которая встраивается в общий контур с помощью фланцевого соединения.

Кондукционная система измерения рас-

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ 14-08-96014.

хода представляет собой 2 неодимовых магнита, охватывающих трубу и создающих магнитное поле поперёк направления течения величиной до 0,3 Тл, а также 4 симметричных пары электродов, регистрирующих величину электродвижущей силы, возникающей при взаимодействии течения проводящей среды с магнитным полем. Электроды расположены в одном круговом сечении трубы под разными углами к направлению магнитного поля: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°. Использование нескольких пар электродов позволяет учитывать несимметричность профиля скорости [2].

Индукционная система измерения расхода жидкого металла работает на явлении сноса электромагнитного поля течением проводящей среды: переменное магнитное поле, соосное с направлением течения создаётся при помощи центральной катушки, содержащей 260 витков. Симметрично по обе стороны от генерирующей катушки размещены 2 измерительных катушки, соотношение амплитуд ЭДС на которых зависит от направления и скорости течения.

Термокорреляционная система измерения расхода потока жидкого металла состоит из двух малоинерционных термопар, спаи которых размещены в потоке металла на оси трубы. При наличии пульсаций температуры, анализируя сигнал термопар, можно получить время прохождения температурных неоднородностей от одной термопары до другой и, зная расстояние между ними, восстановить среднюю скорость течения в центре профиля течения.

Для тарировки расходомеров был проведён эксперимент по перекачке жидкого натрия из одной ёмкости в другую за счёт перепада давления. Для тарировки использовался интегральный расход, который определялся по кондукционной системе измерения уровня жидкого натрия в емкостях.

Выбор конструкции МГД-насоса

Существует немало разновидностей электромагнитных насосов для перекачивания жидких металлов. Их особенно-

стью является уникальность конструкции под требуемые технические условия. Каждая конструкция имеет свои положительные и отрицательные характеристики. Для условий, требующих значительного расхода при малом внутреннем гидравлическом сопротивлении, подходит насос с каналом, также имеющим малое внутреннее гидравлическое сопротивление. Таким характеристикам удовлетворяют прямооточные каналы. Кондукционный насос в своей конструкции должен иметь электрические контакты для пропуска электрического тока, следовательно, встает вопрос о контактном сопротивлении между стенкой канала и жидким металлом. В некоторых случаях это невозможно, например при использовании непроводящего керамического канала для работы с жидким алюминием. В нашем случае используется канал из нержавеющей стали, проводимость которой ниже на порядок проводимости рабочего тела – жидкого натрия. Из-за высокого сопротивления канала, а также возможных проблем с электрическим контактом стенка канала – жидкий металл, решили сделать выбор в пользу индукционного типа насоса.

Среди индукционных насосов для перекачивания жидкого натрия рассматривались две конструкции: цилиндрический насос с бегущим магнитным полем [3] и насос с вращающимся магнитным полем и спиральным каналом [1]. Насос с вращающимся магнитным полем имеет преимущества в производительности, однако существует сложность изготовления спирального канала и трудоемкость его промывки в случае необходимости. Все эти факторы приводят к выбору конструкции цилиндрического индукционного насоса с бегущим магнитным полем. Особенно привлекательной является простота изготовления канала (цилиндрическая труба) и возможность увеличивать производительность, изменяя длину насоса (соответственно изменяя количество индукторов, генерирующих бегущее магнитное поле).

Конструкция МГД-насоса

Цилиндрический индукционный насос с бегущим магнитным полем состоит из следующих элементов: цилиндрический канал, магнитная система и корпус с системой охлаждения (рис. 1). Канал представляет собой трубу из нержавеющей стали с центральной цилиндрической вставкой. Она служит для минимизации возвратных гидродинамических течений, т.к. область генерации объемных электромагнитных сил сконцентрирована у внутренних стенок канала (толщина скин-слоя зависит от проводимости рабочего тела и частоты магнитного поля).

Магнитная система насоса содержит кольцевые катушки подмагничивания и магнитопровод. Катушки расположены соосно с каналом, их количество кратно 6 и определяет производительность насоса. Магнитопровод набран из пластин трансформаторной стали толщиной 0,5 мм. Корпус насоса выполнен в виде параллелепипеда (рис. 2): боковые стенки и дно из текстолита толщиной 20 мм, а верхняя и боковые стенки из стали толщиной 1 мм со встроенными вентиляторами воздушной системы охлаждения.

Интенсивностью работы вентиляторов управляет терморегулирующая аппаратура.

Насосы подключены к трехфазному источнику питания, который регулирует напряжение и частоту тока. Катушки установлены таким образом, что разность фаз между соседними катушками составляет $\pi/3$.

МГД-насос. Численные расчеты

Для получения требуемых расходно-напорных характеристик насосов, оптимальных, с точки зрения технологии изготовления и геометрических параметров – были выполнены предварительные численные расчеты.

Построена трехмерная электродинамическая модель, позволяющая вычислять распределение переменных магнитных полей, в том числе и внутри магнитопровода. Это необходимо для подбора поперечного сечения магнитопровода с целью минимизации зон с насыщением по магнитному полю (рис. 3). И самое главное, были вычислены объемные электромагнитные силы, возникающие в жидком металле внутри канала.

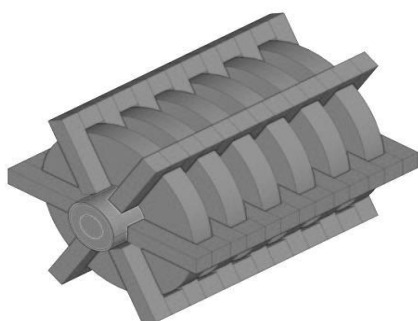


Рис. 1. Индукционный насос (корпус не показан)

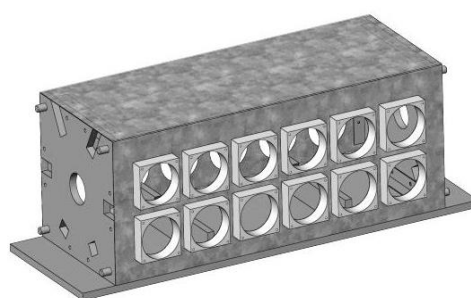


Рис. 2. Корпус насоса (вентиляторы не показаны)

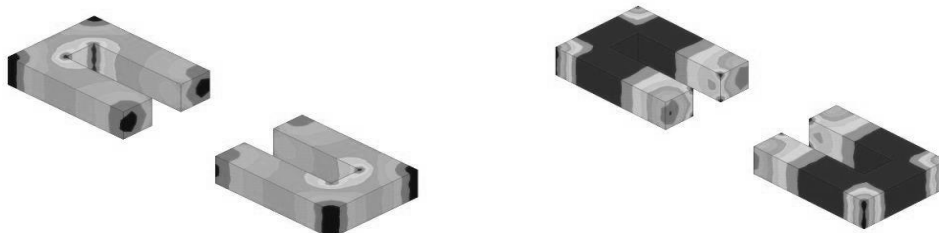


Рис. 3. Магнитное поле в магнитопроводе (фрагмент) для разных токов в катушке подмагничивания

Проведены численные исследования зависимости результирующей электромагнитной силы, возникающей в проводящем жидком металле канала, от следующих характеристик: различных геометрических параметров магнитопроводов (сердечников); размеров канала; величины немагнитного зазора между каналом и магнитопроводом; различных параметров питающего тока; расстояния между катушками и их количества. Для изготовления были выбраны три конструкции насоса с разным количеством катушек: шестью, восемнадцатью и двадцатью четырьмя (рис. 4). Все три насоса имеют разную производительность, примерно линейно зависящую от числа катушек.

МГД-насос. Эксперимент

Для проверки адекватности численного расчета было принято решение экспериментально исследовать расходно-напорные характеристики одного из насосов. На галлиевый контур был установлен насос с шестью катушками. Галлиевый контур имеет электромагнитный расходомер, сис-

тему манометров, а также узел, позволяющий изменять внутреннее гидравлическое сопротивление контура. Были проведены две серии экспериментальных измерений: расходно-напорной характеристики при токе на катушках подмагничивания 23 А; зависимости давления от тока в стопорном режиме (рис. 5).

Для сравнения численного расчета и эксперимента проведен дополнительный расчет для насоса с 6 катушками при работе с жидким галлиевым сплавом; было вычислено значение давления в стопорном режиме при силе тока 20 А. Отличие экспериментально полученных данных от численных составляет менее 1%. Это дает уверенность в правильности расчета характеристик остальных насосов для работы с жидким натрием.

Расходомеры

Измерительный участок содержит систему измерений характеристик потока жидкого натрия, основанные на независимых методах: два электромагнитных и

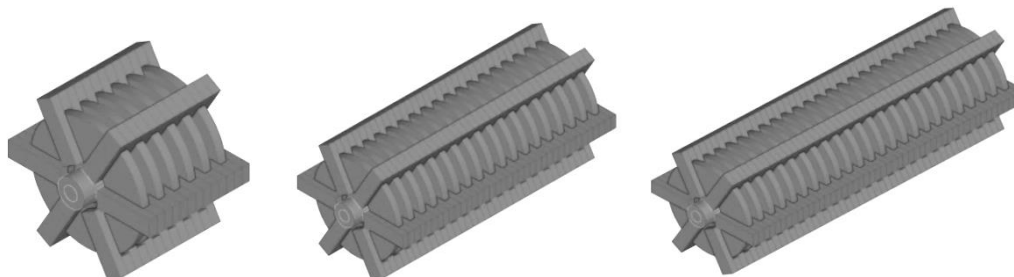


Рис. 4. Насосы с разным количеством катушек подмагничивания: 6, 18 и 24

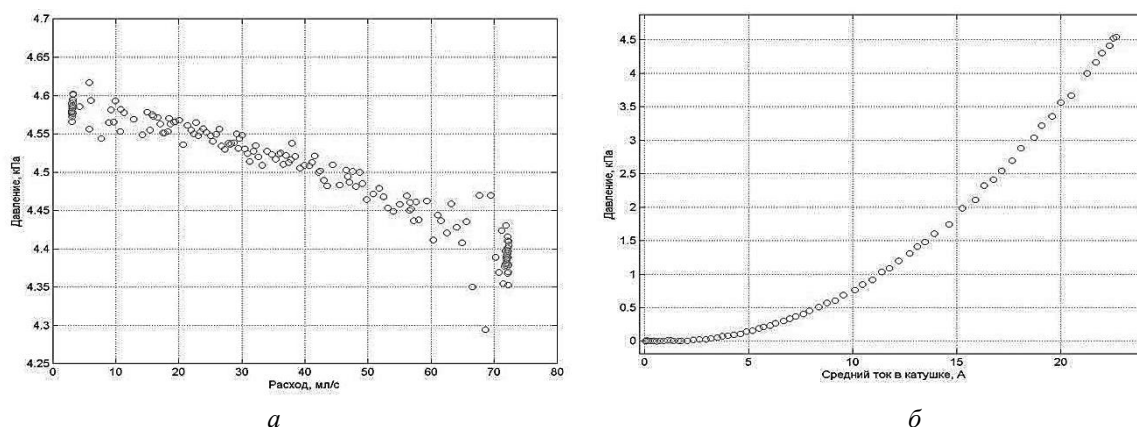


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования насоса: а – расходно-напорная характеристика, б – давление в стопорном режиме

один, использующий кросс-корреляционный анализ данных сигналов с термопар. По сути измерительный участок представляет собой расходомер для измерения расхода потока жидкого натрия. Все три расходомера смонтированы на цилиндрическом участке контура, имеющем длину 500 мм и внутренний диаметр 68 мм. На концах измерительного участка расположены фланцы для возможности демонтажа. В контуре имеются два измерительных участка. Их работа осуществляется с помощью специально разработанного оборудования, включающего источники питания для индукционных расходомеров и систему сбора данных. Рассмотрим все три типа расходомеров, входящих в состав измерительного участка.

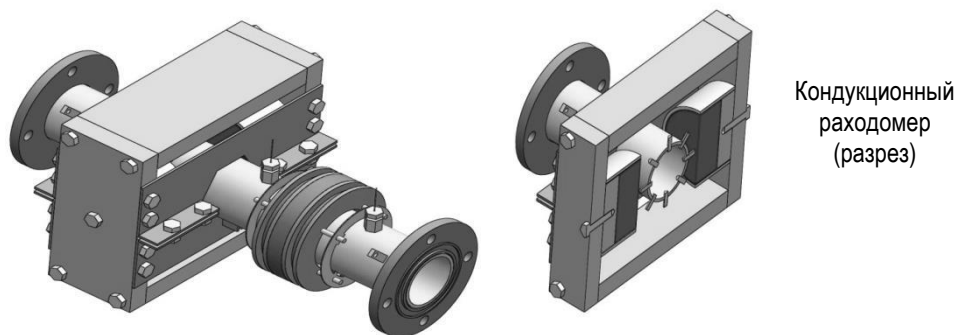
Расходомеры горячей и холодной ветвей натриевого контура включают три отдельных расходомера разного типа: кондукционный, индукционный и кросс-корреляционный. Все три расходомера установлены последовательно на отдельном съемном (фланцевое соединение) участке канала длиной 500 мм. Расходомеры для холодного и горячего участков абсолютно одинаковые. Их работа

осуществляется с помощью специально разработанного оборудования, включающего источники питания для индукционных расходомеров и систему сбора данных.

Кондукционный расходомер. Расходомер состоит из магнитной системы, содержащей два неодимовых магнита цилиндрической формы (диаметр 100 мм, высота 40 мм). Магниты расположены с двух сторон канала таким образом, что их поле направлено перпендикулярно потоку жидкого натрия. Схема и фото кондукционного расходомера представлены на рис. 6.

В канал установлены 4 пары контактов из нержавеющей стали: одна расположена перпендикулярно направлению магнитного поля, вторая соосна с магнитным полем и две последние пары – под углом 45°. Четыре пары контактов используются для ослабления влияния асимметрии гидродинамического профиля скорости на характеристики преобразователя. Электроды вварены в канал на такую глубину, что расстояние между ними составляет 60 мм.

При взаимодействии магнитного поля с течением натрия в нём возбуждаются электрические токи, которые,



Кондукционный расходомер (разрез)

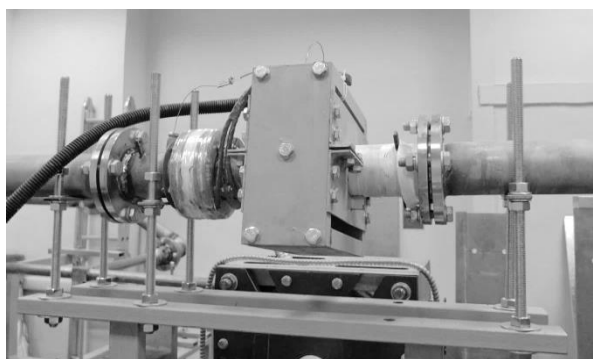


Рис. 6. Кондукционный расходомер (схема и фотография)

взаимодействуя с магнитным полем, приводят к появлению электродвижущей силы. Величина разности потенциалов, снимаемая с пары электродов U_i , в случае симметричного течения пропорциональна синусу угла между вектором индукции магнитного поля и линией, соединяющей электроды. Использование нескольких пар электродов позволяет увеличить точность измерения полного расхода в случае несимметричного течения. В нашем случае расход выражается следующим образом:

$$Q = a \cdot U_0 + b \pm \Delta q, \quad (1)$$

где $U_0 = (U_1 \sin 90^\circ + U_2 \sin 45^\circ + U_3 \sin 0^\circ + U_3 \sin 135^\circ) / (\sin 0^\circ + \sin 45^\circ + \sin 90^\circ + \sin 135^\circ)$ (синус угла определяет вклад каждой пары контактов в значение расхода), a , b , Δq – коэффициенты, получаемые с помощью эксперимента по тарировке.

Индукционный расходомер. Индукционный расходомер состоит из трех катушек, одетых на канал круглого сечения. Центральная катушка является возбуждающей магнитное поле, две крайние – регистрирующими магнитное поле (рис. 7). Принцип измерения основан на искажении результирующего магнитного поля движущимся проводящим потоком жидкого металла. Катушки намотаны высокотемпературным эмальпроводом ПЭТ-155. Центральная возбуждающая катушка имеет 250 витков, регистрирующие катушки – по 500 витков.

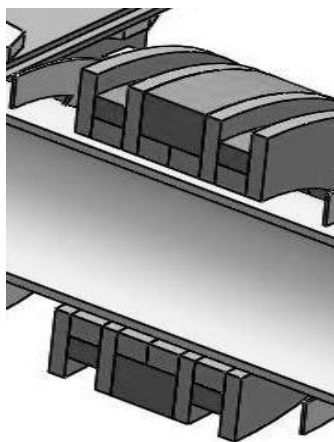


Рис. 7. Схема индукционного расходомера (разрез)

Кросс-корреляционный расходомер. Кросс-корреляционный расходомер состоит из двух термопар, которые пронизывают поток поперек течения (рис. 6). Концы термопар расположены на оси канала. Эти две термопары находятся вдоль оси трубопровода на фиксированном расстоянии. При наличии в потоке пульсаций температуры кросс-корреляционный анализ сигналов этих двух термопар выдает время между фиксацией пульсации температуры. Зная расстояние между термопарами, легко вычислить скорость течения жидкого металла.

Экспериментальная схема тарировки расходомеров

Поток натрия через расходомеры осуществляется переливанием натрия из одной емкости хранения натрия в другую (натриевый танк). В пустом танке создается вакуум, в полном – избыточное давление аргона, около 0,3–0,8 атм. Регулирование интенсивности потока происходит штатным вентилем одного из танков (рис. 8).

При тарировке поток натрия протекает последовательно через все расходомеры и одновременно ведется запись сигналов (рис. 9). Каждый из танков имеет систему контактных уровнемеров, по показаниям которых можно сравнивать интегральные характеристики расходомеров. Погрешность установки контактных датчиков уровня в каждом танке составляет не более 1 мм. При внутреннем диаметре танка в 530 мм изменение уровня в 1 мм соответствует изменению объема в 220 мл. Контрольными отсечками, по которым ведется сравнение интегральных характеристик уровнемеров, являются соседние положения датчиков уровня в танке. Это значение составляет 180 мм. Таким образом, относительная точность определения уровня в танке составляет 0,55%.

Если добавить погрешность от колебания поверхности натрия в танке при переливании, то общая погрешность составит

порядка 1–2% (не более). Погрешность измерения отсечек по времени ничтожно мала по сравнению с остальной погрешностью, поскольку измеряется в автоматическом режиме с помощью высокочастотной платы сбора банных (частота дискретизации до 50 кГц). При рабочей частоте 2 кГц и расходе 1 л/с относительная погрешность составит порядка 0,001%.

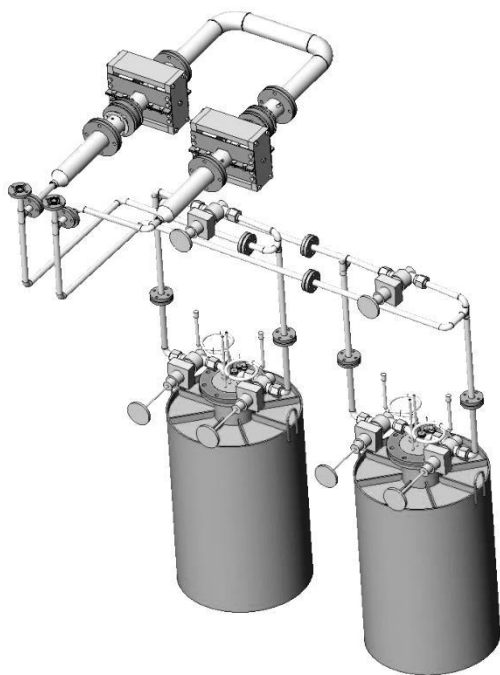


Рис. 8. Схема участка тарировки расходомеров

Результаты тарировки расходомеров.

Кондукционные расходомеры. В тарировочных экспериментах для каждого перелива натрия из одного резервуара в другой проводились измерения скорости перелива (расхода) и напряжения U_0 , представляющего собой комбинацию (1) из разностей потенциалов, возникающих на различных парах электродов. Напряжения U_0 регистрировались одновременно для обоих расходомеров. Полученные для каждого расходомера зависимости напряжения U_0 от расхода показаны на рис. 10. Отметим, что различие между возникающими напряжениями составляет порядка 3%, что объясняется точностью установки электродов и магнитопроводов, а также допускаемыми отличиями в величине магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами.

В результате были получены следующие значения коэффициентов тарировки для каждого расходомера:

Номер расходомера	a , л/(с В)	b , мл/с	Δq , мл
1	348	7	18
2	359	52	21

Индукционные расходомеры. В ходе экспериментов получены мгновенные значения электродвижущей силы в обеих

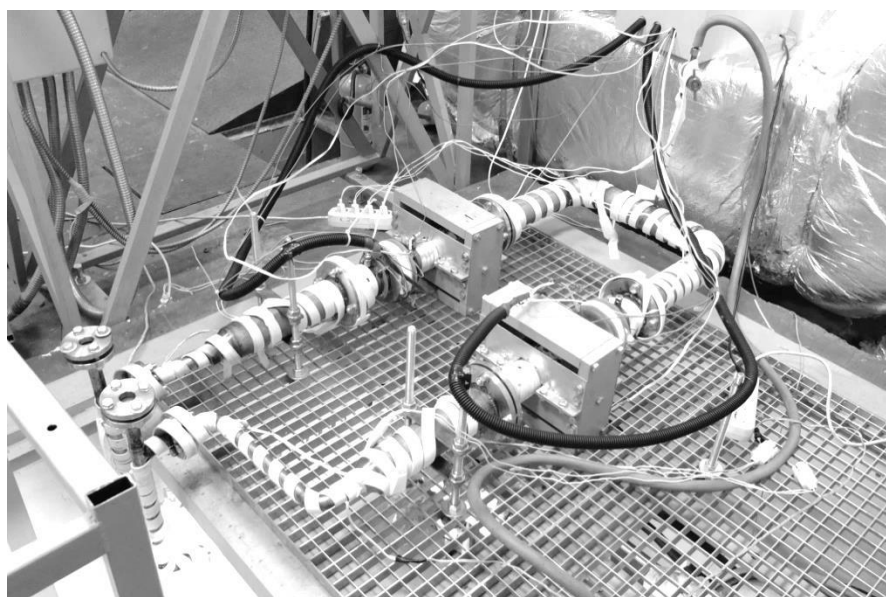


Рис. 9. Участок тарировки расходомеров (верхняя часть)

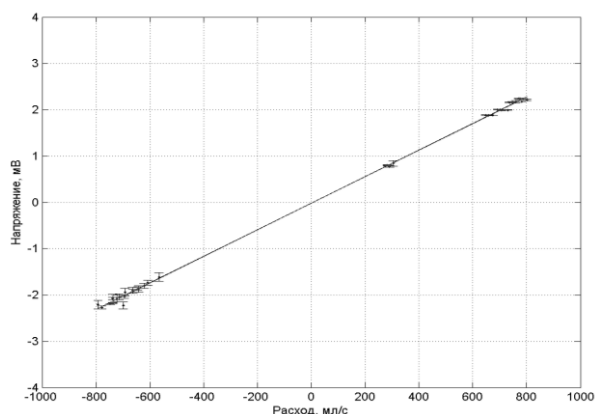


Рис. 10. Результат тарировки кондукционных расходомеров

измерительных катушек каждого расходомера. В результате взаимодействия генерируемого первичной катушкой переменного магнитного поля (с частотой 50 Гц) с течением жидкого натрия потоки в симметричных измерительных катушках становятся несимметричными. Сигналы каждого индукционного расходомера поступают по экранированной витой паре на высокоомные входы 24-битной платы сбора данных NI 9239 с частотой 2000 значений в секунду. Величина, характеризующая расход натрия, определяется для каждого расходомера через амплитуды сигналов (A_1 и A_2) измерительных катушек следующим образом:

$$Q_{ind} = (A_1 - A_2) / (A_1 + A_2). \quad (2)$$

В результате такой нормировки мы ожидаем получить отсутствие показаний данных расходомеров от проводимости натрия (которая зависит от темпе-

ратуры) и от амплитуды напряжения в первичной катушке (рис. 11). Различные направления наклонов зависимостей показаний датчиков от расхода обусловлены произвольным порядком подключения измерительных катушек к плате сбора данных (рис. 12).

Наблюдаются медленные затухания вычисленного расхода Q_{ind} после окончания переливания натрия, когда расхода фактически нет. В ходе дополнительных экспериментов, проведённых в день тестирования, было выяснено, что на индукционные датчики оказывает влияние градиент температуры вдоль измерительного канала. Во время переливания натрия градиент температуры вдоль канала сглаживается, но при остановке устанавливается разница температур на внешней стороне измерительных катушек $\sim 1-2^\circ\text{C}$. Очевидно, что вблизи канала перепад температур возрастает. Данный градиент, по-видимому, вызывает неодинаковую тепловую деформацию витков измерительных катушек, вследствие чего изменяются охватываемые ими магнитные потоки, что и приводит к разнице в чувствительностях этих катушек и, как следствие, к дополнительной паразитной составляющей при вычислении V_{ind} . При стационарном течении натрия в контуре аксиальный градиент температуры пропадает и показания расходомера можно считать достоверными.

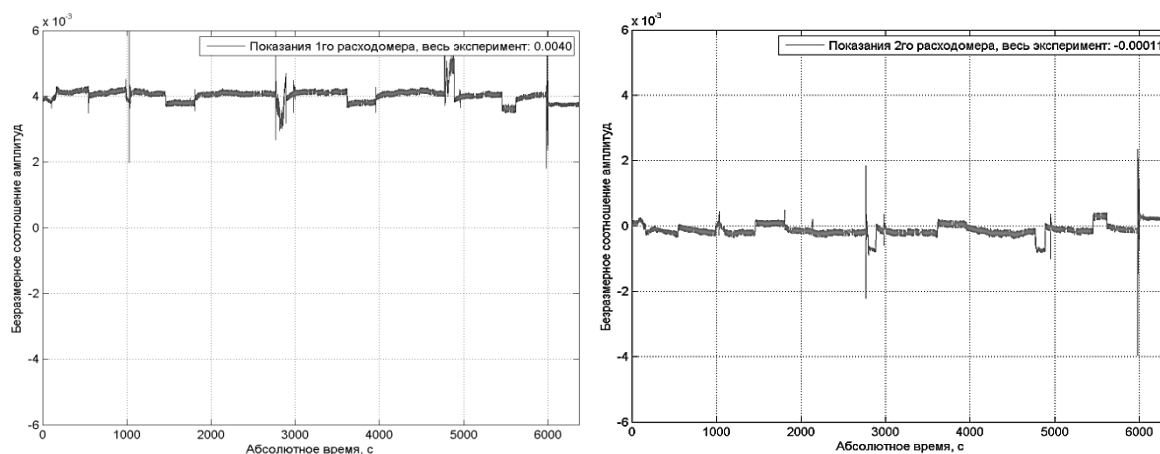


Рис. 11. Эволюция Q_{ind} в ходе всех экспериментов с паузами, полученного по амплитудам напряжения катушек 1-го и 2-го расходомеров

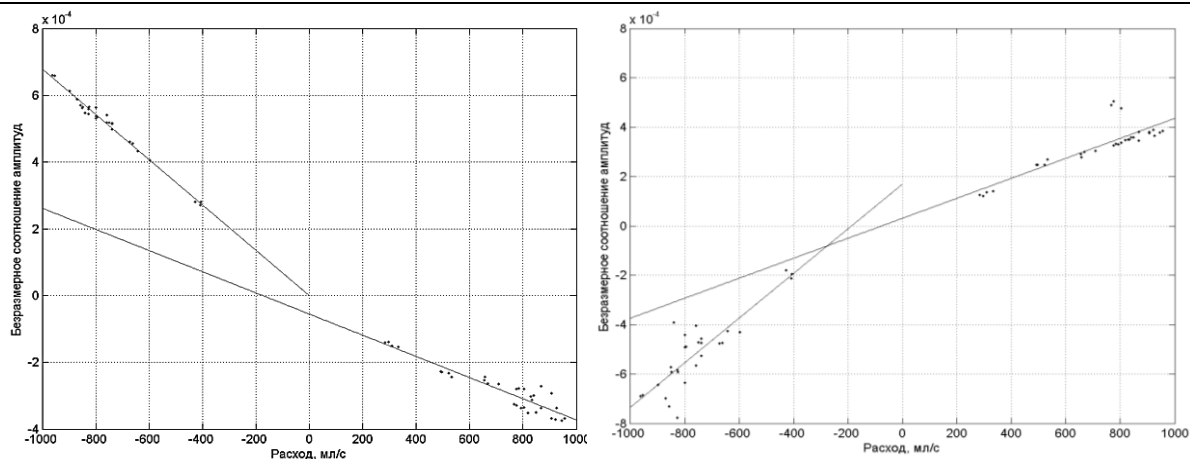


Рис. 12. Зависимости показаний индукционных расходомеров после балансировки

Сразу после переливания, после закрытия вентилей танков, в канале расходомеров заведомо отсутствует сильный перепад температур (всё выровнялось течением, новый перепад температур установиться ещё не успевают), а течение отсутствует (начало интервала определялось визуально по кондукционным датчикам расхода). На таких интервалах (длительностью 5 с) проводилась балансировка индукционных расходомеров: находились отношения амплитуд напряжения в измерительных катушках K для каждого расходомера. Эти отношения для обоих расходомеров меняются слабо, таким образом, можно пересчитать расходы индукционных датчиков:

$$Q_{ind} = (A_1 / K - A_2) / (A_1 / K + A_2). \quad (3)$$

Наблюдается несимметричность коэффициента преобразования. Течению натрия из танка №1 в танк №2 соответствует «положительный расход», при этом в каждом расходомере поток натрия движется по направлению от индукционной и кросс-корреляционной систем к магнитам кондукционной системы. При «отрицательном расходе» натрий сперва протекает через область интенсивного магнитного поля, и профиль течения меняется. Поскольку в силу скин-слоя эффект чувствительность индукционных датчиков на больших радиусах канала выше, чем в центре, это приводит к возрастанию сигнала Q_{ind} при течении из 2-го танка в 1-й ($Q < 0$), по сравнению с $Q > 0$.

Кросс-корреляционный расходомер.

Кросс-корреляционный метод измерения скорости, используемый в данном расходомере, при наличии значимых пульсаций температуры и стационарности потока является абсолютным методом и тарировки не требует (рис. 13).

Построена математическая модель расчета характеристик насоса бегущего магнитного поля с цилиндрическим каналом. Разработаны и изготовлены три модели насоса с разными характеристиками производительности. Один вариант насоса экспериментально исследован на галлиевом контуре, остальные прошли экспериментальное тестирование насосов на жидком натрии. В дальнейшем все разработанные и изготовленные

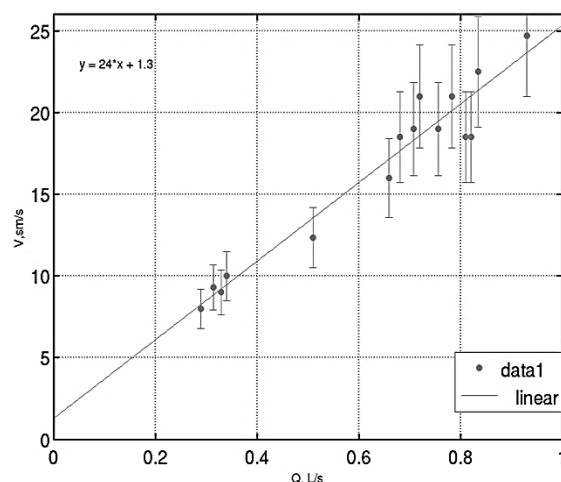


Рис. 13. Зависимость скорости течения жидкого натрия от расхода, полученная кросс-корреляционным расходомером

товленные конструкции насосов успешно работают на натриевом контуре.

Устройства для измерения расхода жидкого натрия показали разную эффективность работы. Наиболее удачной кон-

струкцией является кондукционный расходомер. Она показала наибольшую точность измерений. Дополнительных исследований требуют индукционный и кросс-корреляционный расходомеры.

Библиографический список

1. *Авилова Е.М., Докторов Н.И., Марин Н.И., Повстень В.А., Турчин Н.М.* Разработка и эксплуатация винтовых индукционных насосов // *Магнитная гидродинамика*. – 1965. – № 1. – С. 110–114.
2. *Корнилов В.П., Овсянников В.В., Снежко Л.Л.* Измерение расхода электропроводной жидкости при несимметричном профиле скорости электромагнитным преобразователем расхода // *Магнитная гидродинамика*. – 1989. – № 3. – С. 95–100.
3. *Лиелаусис О.А.* Гидродинамика жидкометаллических МГД-устройств. – Рига: Зинатне, 1967. – 196 с.

STEADY-STATE TURBULENT FLOW OF LIQUID SODIUM IN A CHANNEL

R.I. Khalilov, A.Y. Vasiliev, I.V. Kolesnichenko, A.D. Mamykin, A.M. Pavlinov, A.V. Shestakov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

We investigate the operation of several MHD-devices in a liquid metallic sodium circuit. A common feature of these devices is the presence of a cylindrical channel, 68mm in diameter, and the interaction of the liquid sodium flow with the magnetic fields. The first device is the linear cylindrical MHD pump for pushing liquid sodium through the channel. The other device is the flow meter for measuring the flow rate of the liquid sodium. Particular attention is given to three methods of measuring the flow rate of liquid sodium - conductive and inductive methods and cross-correlation technique, which is based on the signals of low-inertia thermocouples. The paper presents the results of the experiments and numerical computation.

Keywords: magnetohydrodynamics, turbulence, liquid sodium, magnetic field.

Сведения об авторах

Халилов Руслан Ильдусович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; e-mail: khalilov@icmm.ru

Васильев Андрей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: vasiliev.a@icmm.ru

Колесниченко Илья Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: kiv@icmm.ru

Мамыкин Андрей Дмитриевич, аспирант лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: mad@icmm.ru

Павлинов Александр Михайлович, аспирант лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: pam@icmm.ru

Шестаков Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: shestakov@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 17.09.2018 г.