

ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ И ОТСУТСТВИИ КОНВЕКЦИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ*

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

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

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

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

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

А.С. Теймуразов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В работе изучается течение жидкого металла, созданное либо конвекцией, либо внешними силами в цилиндрическом канале, а также взаимодействие этого течения и наложенного магнитного поля. Получены спектральные характеристики турбулентного течения, созданного совместно бегущим и вращающимся магнитными полями. Исследованы характеристики скорости и температуры в течении, созданном действием неоднородного нагрева и охлаждения верхней границы канала. Изучен процесс взаимодействия спирального магнитного поля и изначально однородного потока жидкого металла, в результате которого поток становится также спиральным.

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

Введение

Основное отличие жидкого металла от других жидкостей – это большая величина электропроводности и теплопроводности. Вследствие большой теплопроводности для генерации конвективного течения необходимо создать гораздо больший тепловой поток, чем для ньютоновской жидкости другого типа (например воды, электролита) при достижении той же интенсивности течения. Для реализации этого необходимо использовать теплообменники мощностью в несколько киловатт. Это является одним из основных затруднений для исследования конвективных турбулентных течений в жидком металле. Вто-

рым затруднением является сложность использования датчиков для измерения скорости. При высоких температурах существования большинства жидких металлов прецизионные датчики скорости использовать невозможно либо необходимо разрабатывать особые адаптеры (которые существенно ослабляют величину измеряемого сигнала и обрезают спектр). Поэтому то небольшое количество результатов, которые можно найти в источниках, получены на ртути и на натрии [1]. Данная тема недостаточно разработана, или, по крайней мере, мало представлена в печати. Исключения составляют исследования процессов в длинных трубах малого диамет-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Урал (грант № 13-01-96042).

ра, составляющих систему охлаждения реакторов [2], однако в этих задачах подогрев осуществляется через боковую стенку. Влияние спирального магнитного поля на течение жидкого металла исследуется в описанной постановке только авторами проекта, хотя вся тема взаимной генерации спиральности поля скорости и магнитного поля широко исследуется в рамках проблемы МГД-динамо [3]. В данной работе мы стараемся восполнить указанные пробелы и исследуем течение жидкого металла под действием нескольких факторов.

Характеристики турбулентного течения жидкого металла в условиях действия переменных магнитных полей

В данном случае экспериментально исследовались спектральные характеристики изотермического течения жидкого металла в замкнутом цилиндрическом канале, находящегося под действием внешнего переменного магнитного поля. Основным элементом экспериментальной установки являлся индуктор кольцевой формы (рис. 1, а). Он способен генерировать бегущее и вращающееся магнитные поля с помощью системы электрических катушек. В жидком металле происходит генерация либо азимутальной электромагнитной силы с помощью вращающегося магнитного поля (RMF), либо акси-

альной силы с помощью бегущего магнитного поля (TMF). В центральную часть помещается цилиндрический канал из нержавеющей стали, заполненный жидким эвтектическим сплавом галлий-цинк-олово. В боковую поверхность канала был вставлен кондукционный датчик скорости (рис. 1, б), состоящий из двух пар электродов для одновременного измерения двух ортогональных компонент локальной скорости течения I , постоянного самарий-кобальтового магнита 2, корпуса 3 (диаметром 6 мм). Датчик подключался к усилителю 4 и регистрирующему компьютеру 5.

В эксперименте основное внимание было уделено режимам совместного наложения бегущего и вращающегося магнитных полей. Анализ полученных спектров показал, что для азимутальной компоненты скорости совместное действие полей не вносит изменение в спектр для частот выше 7–8 Гц (рис. 2). Однако для более низких частот интенсивность турбулентных пульсаций сильно падает. То же самое происходит и для спектров вертикальной компоненты скорости. При этом турбулентность остается изотропной вследствие того, что поле действует в двух направлениях. Мы считаем, что снижение интенсивности турбулентности происходит вследствие стабилизации Тэйлоровских тороидальных вихрей. Этот результат открывает возможность

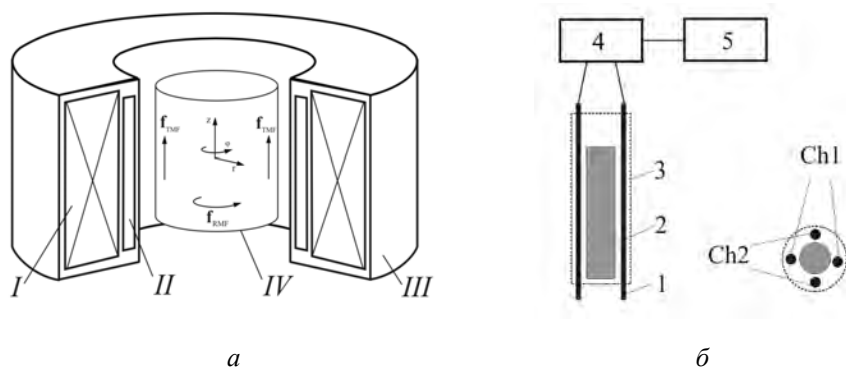


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а) аппарат, генерирующий бегущее и вращающееся магнитные поля: I – индуктор, II – система охлаждения, III – корпус, IV – канал с металлом; б) кондукционный датчик скорости (пояснения в тексте)

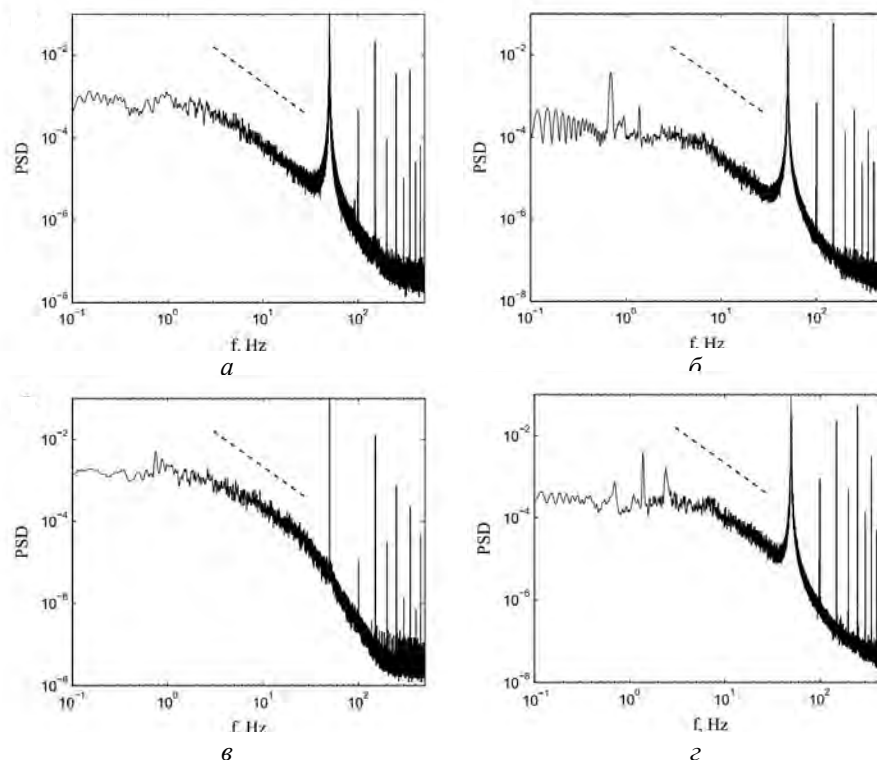


Рис. 2. Спектральная плотность энергии пульсаций скорости при воздействии на жидкий металл бегущего (RMF) и вращающегося магнитных полей (TMF): азимутальная компонента скорости: а) $I_{RMF}=3$ А, $I_{TMF}=0$ А, б) $I_{RMF}=3$ А, $I_{TMF}=7$ А, вертикальная компонента скорости: в) $I_{RMF}=3$ А, $I_{TMF}=0$ А, г) $I_{RMF}=3$ А, $I_{TMF}=7$ А

управления пристеночной турбулентностью с помощью вариации совместного действия магнитных полей. Изменением пристеночной турбулентности можно влиять на ход процесса перемешивания и кристаллизации в жидком металле.

Течение жидкого металла при неоднородном подогреве сверху

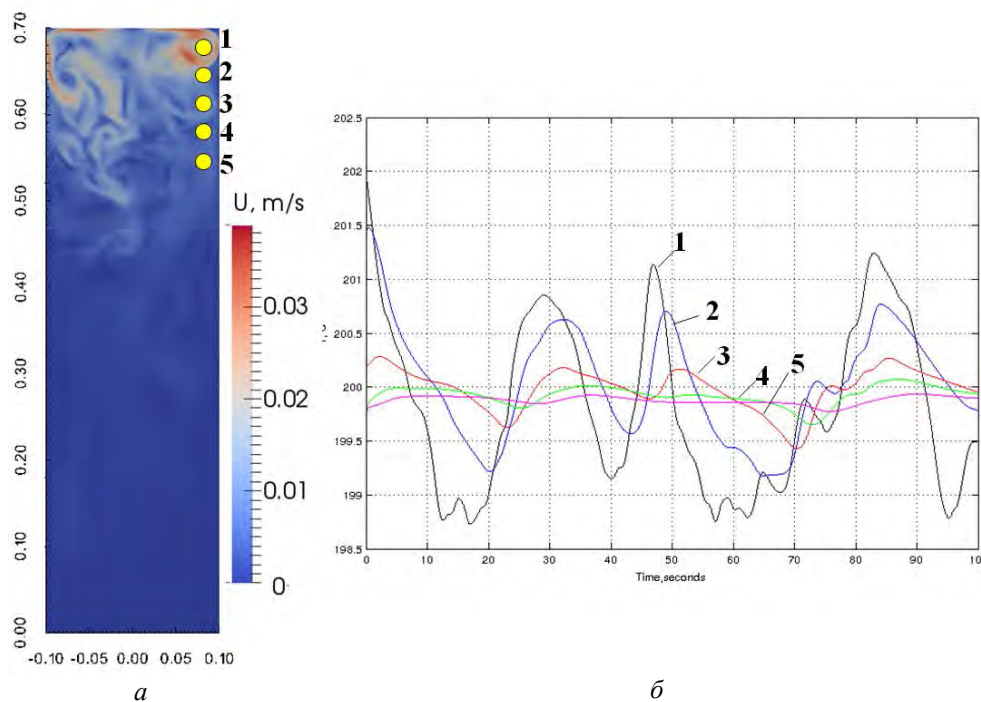
В данном случае рассматривается замкнутый цилиндрический объем с жидким металлом, в верхней части которого расположены источники неоднородного нагрева и охлаждения. В этой задаче моделируется процесс восстановления титана в реторте – там горячий расплав подается в центр канала, а боковая и верхняя часть канала охлаждаются. Мы экспериментально и численно исследуем возникающее течение в канале, который заполнен жидким натрием. В эксперименте высота канала 700 мм, а диаметр 200 мм (рис. 3). В верхней части цилиндрическо-

го канала расположен источник нагрева, реализованный в виде стержневого электрического нагревателя с диаметром 40 мм. Внешняя область вокруг нагревателя охлаждается пластинчато-игольчатым теплообменником с воздушным потоком, а боковые границы полости теплоизолированы. Измерительные термодпары расположены на верхней границе, разделяющей твердые поверхности теплообменников и жидкий натрий. Также в канале расположены вертикальные линейки термодпар, которые регистрируют информацию о течении.

Предварительное численное исследование данного процесса показало, что течение нестационарно и несимметрично, наиболее интенсивное течение возникает только в верхней трети объема (рис. 4, а). При этом значения скорости достигают 3 см/с (при мощности нагревателя 1 кВт число Грасгофа составляет $Gr = 9,2 \cdot 10^7$). В эксперименте установлены линейки



а б
Рис. 3. Экспериментальная установка: фото (а) и схема (б)



а б
Рис. 4. Расчет течения жидкого натрия ($Gr = 9,2 \cdot 10^7$, $Pr = 0,012$): а) мгновенное поле модуля скорости в вертикальном сечении и расположение точек измерения температуры, б) временная эволюция пульсаций температуры в выделенных точках 1–5

термопар внутри полости, которые измеряют пульсации температуры. Расчеты показали (рис. 4, б), что сигнал с датчиков позволит провести кросс-корреляционный анализ и оценить скорости турбулентного движения внутри полости.

Эксперименты показали наличие выраженного подъемного течения на оси цилиндра, что фиксируется при помощи кросскорреляционного анализа температурных пульсаций центральных термопар D1–D5 (рис. 5, а). Максимумы кросс-

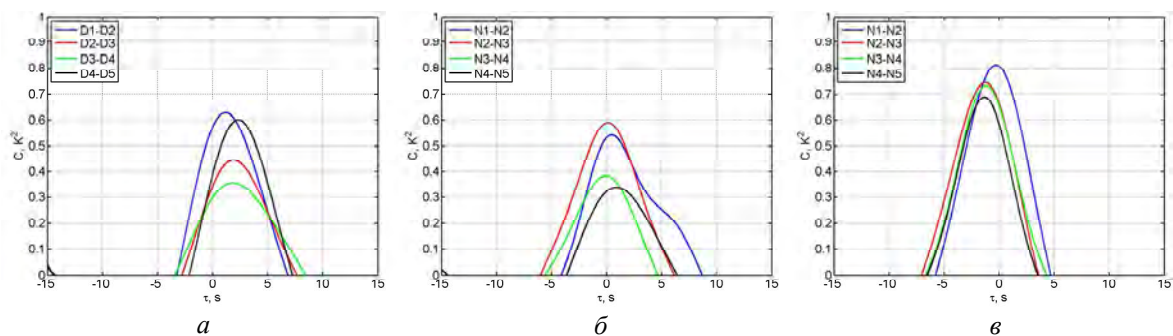


Рис. 5. Кросскорреляционные функции для стационарного режима для термопар D1–D5 (а) и N1–N5 (б); для нестационарного режима для термопар N1–N5 (в)

реляционных функций соседних пар термопар находятся в положительной временной области и соответствуют скоростям порядка 1,5 см/с. Значит, имеется организованное подъемное течение, локализованное на оси цилиндра. Опускное же течение, видимо, менее организовано и либо осуществляется во всей остальной области, либо локализовано в тонком пристеночном слое, что показывает анализ пристеночных термопар N1–N5 (рис. 5, б). Организованное опускное течение фиксируется только в нестационарном режиме охлаждения, когда теплообменник работал значительно эффективнее нагревателя (рис. 5, в). На спектрах энергии температурных пульсаций (рис. 6) для ближайшей к теплообменнику термопары на оси цилиндра можно выделить небольшой инерционный интервал, свидетельствующий о развитой турбулентной конвекции в области этой термопары (рис. 6, б).

Течение металла через область со спиральным магнитным полем

В данном случае на входе в канал поступает поток жидкости, вектор скорости которого имеет только аксиальную компоненту. В канале присутствует магнитное поле. Это магнитное поле устроено таким образом, что его спиральность не равна нулю (рис. 7, а). Взаимодействие изначально однородного потока электропроводной жидкости с таким магнитным полем приводит к генерации азимутальной компоненты электромагнитной силы. Именно спиральная конфигурация поля обеспечивает генерацию азимутальной компоненты электромагнитной силы и, как следствие, скорости (рис. 7, б). В численном моделировании этот процесс изучен в полной постановке. В расчетах по угловой скорости определяется частота возникающего вращения жидкости. Получена зависимость частоты оборотов от величины магнит-

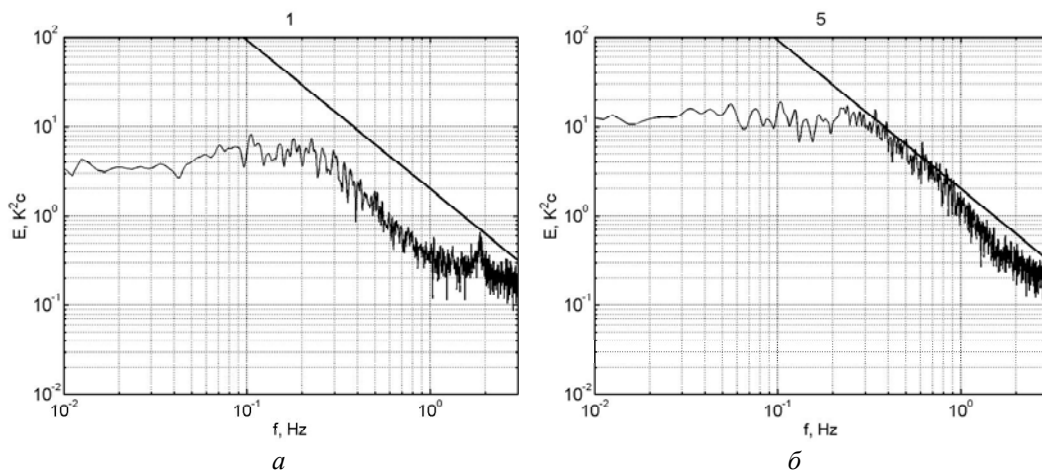


Рис. 6. Примеры спектров температурных пульсаций термопар D1 (а), D5 (б)

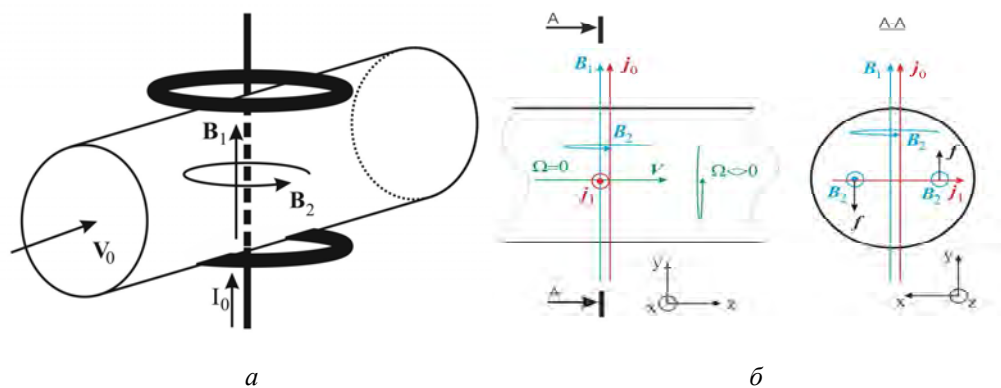


Рис. 7. Течение электропроводной жидкости через область со спиральным магнитным полем: а) схема канала, б) схема, поясняющая механизм эффекта

ного поля B_1 при фиксированном B_2 : частота возрастает почти по корневому закону (рис. 8, а). Получена зависимость частоты от максимального значения магнитного поля B_2 при фиксированных параметрах поля B_1 (рис. 8, б). Уменьшение частоты при повышении поля обусловлено неоднородностью поля, которое начинает существенно искажать форму профиля скорости.

Заключение

Результаты исследования спектральных характеристик турбулентного течения жидкого металла необходимы для развития направления изучения процесса перемешивания и кристаллизации жидкого металла, где знание турбулентных характеристик играет важнейшую роль.

Процесс перемешивания металла при литье цилиндрических слитков может быть востребован на металлургических предприятиях Пермского края. Исследование характеристик турбулентного конвективного течения жидкого металла, генерируемого при неоднородном подогреве сверху, закладывает базу для исследования процессов в реакторе восстановления титана, используемом на предприятии АВИСМА (г. Березники, Пермский край). Результаты исследования взаимодействия потока жидкого металла со спиральным магнитным полем находятся в рамках теории динамо-эффекта, где процесс взаимодействия потоков электропроводной жидкости и магнитных полей, имеющих ненулевую спиральность, играет ключевую роль.

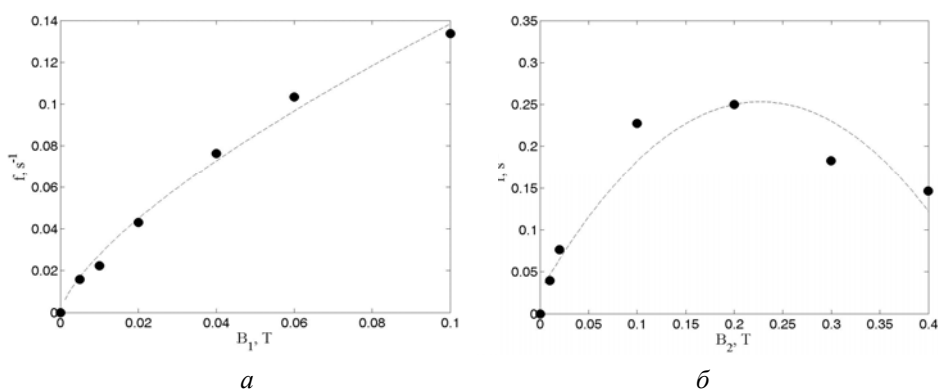


Рис. 8. Зависимость частоты от поля: а) от магнитов, б) от стержня

Библиографический список

1. Ahlers G., Grossmann S., Lohse D. Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-Benard convection // Review of Modern Physics. – 2009. – Vol. 81. – P. 503–537.
2. Genin L.G., Listratov Ya.I., Rasuvanov N.G., Ryzhkova S.A., Sviridov V.G. Influence of Secondary Vortices of Thermogravitational Convection on the Liquid Metal Heat Exchange in a Horizontal Tube in a Magnetic Field // Journal of heat Transfer Research. – 2006. – Vol. 37. – № 8. – P. 691–706.
3. Kleeorin N., Moss D., Rogachevskii I., Sokoloff D. Helicity balance and steady strength for dynamos generated galactic magnetic field // Astronomy and Astrophysics. – 2000. – Vol. 361. – P. L5–L8.

LIQUID METAL FLOW IN A CYLINDRICAL CHANNEL IN THE PRESENCE AND ABSENCE OF CONVECTION AND INTERACTION WITH A MAGNETIC FIELD

I.V. Kolesnichenko, R.I. Khalilov, A.M. Pavlinov, A.D. Mamikin, A.Yu. Vasiliev, A.S. Teimurazov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

We study the flow of liquid metal in a cylindrical channel caused either by convection, or by external forces, and the interaction of this flow with an imposed magnetic field. The spectral characteristics of the turbulent flow generated by a combination of traveling and rotating magnetic fields are obtained. The velocity and temperature characteristics of the flow are determined when the upper boundary of the channel is subject to non-uniform heating and cooling. In addition, we consider the interaction between the spiral magnetic field and the initially homogeneous liquid metal flow, which causes the flow to become spiral as well.

Keywords: magnetic hydrodynamics, convection, liquid sodium, spiral magnetic field, turbulence.

Сведения об авторах

Колесниченко Илья Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший 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 Королева, 1; e-mail: kiv@icmm.ru

Халилов Руслан Ильдусович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: khalilov@icmm.ru

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

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

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

Теймуразов Андрей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: tas@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.