

УДК 537.84
PACS 47.65.-d

Электровихревое течение жидкого металла в цилиндрическом канале

С. Д. Мандрыкин^а, И. В. Колесниченко^а, Г. Л. Лосев^а, П. Г. Фрик^{а,б}

^а Институт механики сплошных сред УрО РАН

614013, Пермь, ул. Акад. Королева, 1

email: msd@icmm.ru

^б Пермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15

Представлены результаты экспериментального исследования электровихревого течения галлиевого сплава в цилиндрическом канале при локализованном подводе электрического тока на боковых стенках. С помощью ультразвукового доплеровского анемометра получены профили скорости течений жидкого металла для различных значений тока и при различном расположении датчиков. Установлено, что в данной конфигурации электровихревые течения возникают во всем рассмотренном диапазоне значений силы тока. Скорости течения невелики (максимальная средняя по объему скорость достигает 40 мм/с), но течения нестационарны при всех рассмотренных параметрах течения. Амплитуда пульсаций скорости сопоставима со средним значением скорости. Определены характеристики пульсаций в зависимости от приложенного тока. Показано, что даже при минимальных токах нарушена симметрия течения, а его структура отличается от ожидаемой из геометрии канала и расположения электродов.

Ключевые слова: электровихревое течение; магнитная гидродинамика; жидкий металл

Поступила в редакцию 02.03.2018; принята к опубликованию 05.04.2018

Electrovortex flow of liquid metal in cylindrical channel

S. D. Mandrykin^а, I. V. Kolesnichenko^а, G. L. Losev^а, P. G. Frick^{а,б}

^а Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, 614013, Perm, Acad. Korolev st. 1

email: msd@icmm.ru

^б Perm State University, 614990, Bukireva St. 15, Perm, Russia

Results of an experimental study of an electro-vortex flow of gallium alloy, generated in a cylindrical channel by electric current poles localized at the side walls, are presented. With the help of an ultrasonic Doppler anemometer, the velocity profiles of liquid metal currents are obtained for different current values and for different locations of the sensors. It is shown, that electro-vortex flows appear in all considered range of the electric current. The flow velocities are low (maximum average bulk velocity is 40 mm/s), but the flows themselves are non-stationary at all considered parameters. The characteristics of fluctuations are determined depending on the applied current. It is shown that even at the lowest currents the flow is not symmetrical and its structure differs from that expected from the geometry of the channel and the location of the electrodes.

Keywords: electrovortex flow; magnetohydrodynamics; liquid metal

Received 02.03.2018; accepted 05.04.2018

doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-20-27

1. Введение

Электровихревые течения (ЭВТ) возникают в результате взаимодействия электрического тока, протекающего через проводящую жидкую среду, и магнитного поля, создаваемого этим током [1, 2]. Необходимым условием возникновения таких течений является не только неоднородность распределения тока в объеме жидкости, но и отличие от нуля ротора электромагнитных сил [1]. ЭВТ имеют место в таких технологических устройствах, как дуговой перемешиватель, применяемый для улучшения кристаллической структуры металлов [3], дуговая печь для плавления металла [4–6], жидкометаллические батареи для накопления электроэнергии [7]. В частности, ЭВТ определяет кристаллическую структуру слитков в получающих все более широкое применение дуговых печах постоянного тока [8]. В одних случаях с помощью ЭВТ можно оптимизировать работу МГД-устройств, в других они нежелательны (например, в батареях). Поэтому исследование ЭВТ, а также поиск способов управления их интенсивностью представляют интерес для многих прикладных задач.

Для создания ЭВТ возможны различные способы подвода тока к проводящей среде. Интерес представляет локальный подвод, т.е. подвод «точечным» электродом, который используется во многих устройствах, в которых возникают ЭВТ, например, в жидкометаллических батареях [9], ваннах алюминиевых электролизеров [10] (в том числе и в случае многоэлектродного токоподвода [11, 12]).

ЭВТ хорошо исследованы в ряде канонических постановок: полусферических чашах [4–6], плоских слоях [12–14], в которых геометрия полости согласована с топологией возникающих вихрей (тороидальный вихрь в полусфере, плоские вихри в слое и т.д.). Практически не изучены ЭВТ в задачах, в которых топология возникающего ЭВТ противоречит «естественному» для полости течению жидкости. Именно такая задача рассматривается в данной работе. Конкретно, исследуется ЭВТ в цилиндрическом объеме жидкого металла при локальном подводе тока к боковой стенке двумя оппозитными электродами. «Естественным» для цилиндра был бы аксиальный подвод тока, при котором образуются тороидальные вихри вблизи торцов цилиндра. В рассмотренной задаче симметрия подвода тока и симметрия полости не согласованы, в результате чего возникающие вихри не соответствуют геометрии, т.е. ось симметрии гидродинамического течения не совпадает с осью симметрии канала (вертикальной осью цилиндра). Таким образом, можно ожидать возникновения неустойчивости образующихся вихревых структур в силу внесения возмущений в поток стенками канала.

С точки зрения технологических приложений, рассматриваемое ЭВТ интересно скорее как пример нежелательных течений, которые могут возникать вблизи электродов. Однако выбор конкретной геометрии обусловлен фундаментальной задачей о влиянии на поток металла спиральных магнитных полей [15]. Ожидаемый эффект (генерация спирального гидродинамического поля спиральным магнитным) является антиподом известного альфа-эффекта, лежащего в основе большинства моделей генерации космических магнитных полей (подробный обзор можно найти в [16]). Конфигурация экспериментальной установки в данной работе позволяет не только изучить ЭВТ в цилиндре, но и в перспективе исследовать обратный альфа-эффект в постановке, аналогично работе [15], но при существенно более интенсивных течениях. Это намерение определило выбор параметров исследуемого канала – его диаметр равен внутреннему диаметру натриевого контура [17], на котором планируются дальнейшие исследования.

2. Методы

2.1. Экспериментальная установка

Установка (рис. 1, 2) состоит из цилиндрического канала 1 из нержавеющей стали длиной $L = 204$ мм и внутренним диаметром $D = 68$ мм. Канал расположен вертикально и заполнен жидкой галлиевой эвтектикой (87.5% Ga + 10.5% Sn + 2% Zn, плотность $\rho = 6256$ кг/м³, электропроводность $\sigma = 3.56 \cdot 10^6$ См, кинематическая вязкость $\nu = 3.1 \cdot 10^{-7}$ м²/с, скорость звука в среде $c = 2828$ м/с). К боковым стенкам канала оппозитно подведены цилиндрические медные электроды 2 диаметром 20 мм, подключенные к источнику постоянного тока. Форма торцов электродов, которые вступают в контакт с жидким металлом, повторяет внутреннюю поверхность канала. Эти торцы были предварительно облужены оловом для обеспечения качественного электрического контакта с галлиевым сплавом.

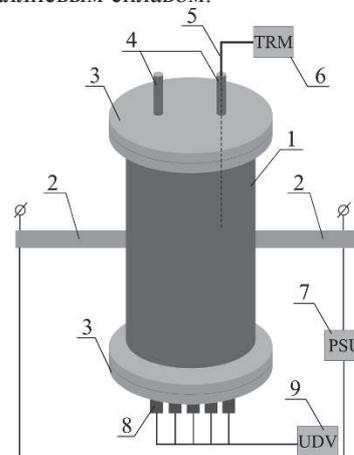


Рис. 1. Схема эксперимента. Обозначения в тексте

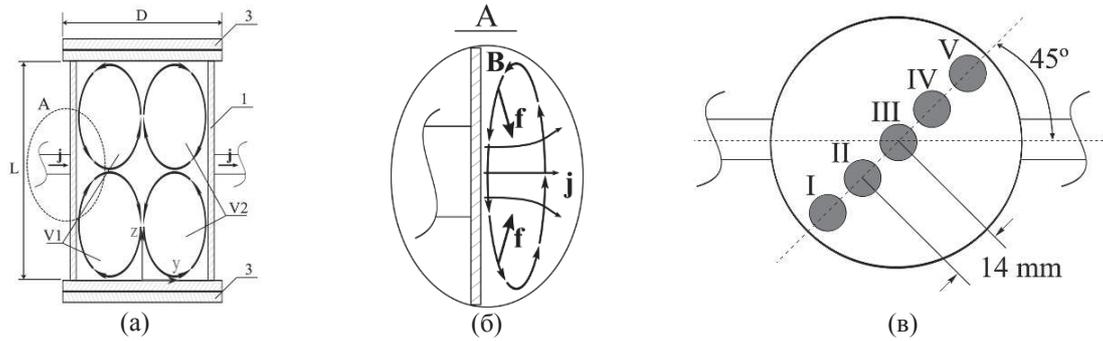


Рис. 2. Генерация и регистрация течений: а – схема генерации течений в плоскости ZY; б – детализация области А; в – схема расположения датчиков

Торцевые стенки канала 3 изготовлены из плексигласа и соединены с каналом через фланцы с силиконовым уплотнением. На верхней торцевой стенке расположены штуцеры 4 для заполнения установки жидким металлом. Через них также вводится термopара 5, подключенная к цифровому термометру 6 Sanwa RD701. Боковые стенки и верхняя крышка канала были теплоизолированы слоями стекловаты, толщиной около 100 мм. К электродам через медные клеммы подключен источник питания 7, состоящий из трехфазного источника тока FNEX TSGC-2 и трехфазного выпрямителя. Источник питания позволяет создавать в цепи постоянный ток величиной до 800 А. Погрешность определения силы тока не превышает %.

Для измерения скорости металла использовался ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА) Dop-2000, Signal Processing, Switzerland с пятью ультразвуковыми датчиками 8, расположенными на внешней стороне нижней плексигласовой стенки. Датчики крепились при помощи шаблона из оргстекла, позволяющего задать их положение с точностью до 0.5 мм, и подключались к УДА 9.

Изучались течения, порождаемые токами в диапазоне от 200 до 500 А. Это соответствует значениям параметра МГД взаимодействия $S = \mu_0 I^2 / (\rho v^2)$ в диапазоне $S = (8.4 \div 52.4) \cdot 10^7$. Сила тока измерялась при помощи токовых клещей

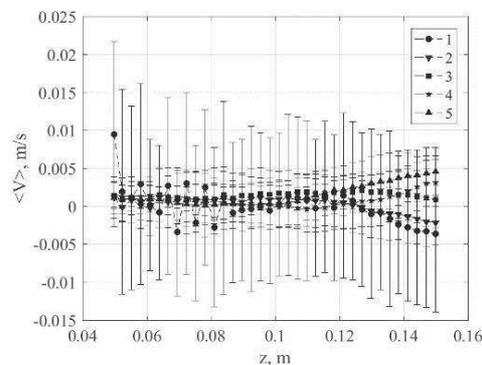


Рис. 3. Профили течения галлиевого сплава после отключения тока. Цифры соответствуют номерам датчиков на рис. 2, в

АКТАКОМ-2250. Для каждого фиксированного значения тока датчиками регистрировались профили аксиальной скорости. Дополнительно измерялись скорости вдоль электродов и под заданным углом к электродам.

Перед началом опытов было произведено измерение магнитного поля, создаваемого проходящим через металл током, при помощи тесламетра Lake Shore 421 Gaussmeter. Датчик Холла помещался в канал, заполненный металлом через заливной штуцер. Измерения показали, что число Гартмана $Ha = BD(\sigma/\nu\rho)^{1/2}$, определяемое по диаметру канала, достигает $Ha = 1.7$ (при максимальном магнитном поле в канале $B = 0.6$ мТл), что говорит о слабом влиянии собственного магнитного поля тока на течение.

2.2. Измерения скорости

Экспериментальные исследования ЭВТ ограничивают методические факторы. Жидкие металлы являются непрозрачными агрессивными средами, поэтому использование современных полевых методов анализа течений (например, PIV) не представляется возможным. В представленной работе применяется ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА), который позволяет проводить неинвазивные измерения профилей скорости оптически непрозрачной жидкости вдоль выбранного направления.

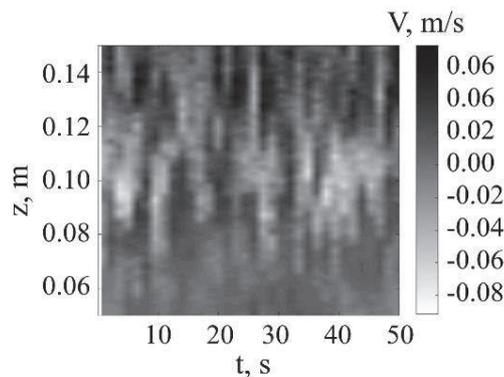


Рис. 4. Пространственно-временное распределение вертикальной компоненты скорости течения галлиевой эвтектики в канале; ток 479 А, датчик III

Принцип работы УДА основан на излучении ультразвуковых импульсов и фиксации отраженного от движущейся среды эха [18]. При этом измеряется изменение частоты ультразвука между последовательно излученными и отразившимися от частиц в движущейся среде импульсами. Пространственное положение точки, в которой измеряется скорость течения, определяется по времени между излучением и регистрацией ультразвукового импульса. Наличие звукоотражающих частиц является обязательным условием ультразвуковых измерений. В галлиевом сплаве, используемом в работе, в роли звукоотражающих частиц выступают оксиды галлия, образующиеся в металле при контакте с атмосферным воздухом. Частицы, увлекаемые движением жидкости, несут информацию о локальной скорости в точках их расположения. Для предотвращения излишнего окисления сплава и контакта с атмосферным кислородом поверхность металла в заливочных трубках был залит слой силиконового масла.

В ходе эксперимента измерялись профили скорости вдоль пяти ультразвуковых лучей, создаваемых набором датчиков. В работе использовались датчики с несущей частотой 4 МГц, подключенные к мультиплексору. Прибор позволяет не только получить осредненные профили, но и изучить низкочастотные осцилляции профиля скорости. При выбранных параметрах измерений частота опроса излучателей составляла 1.6 Гц, что накладывает ограничение на максимально разрешимую частоту колебаний 0.8 Гц.

Основной информацией, получаемой при помощи каждого датчика УДА, является пространственно-временное распределение компоненты скорости, направленной вдоль луча. Результатом обработки являются средние по времени профили скорости и уровень пульсаций скорости относительно среднего значения. Для наглядности среднеквадратичные отклонения приводятся на профилях средней скорости в виде вертикальных отрезков.

На рис. 2 изображена схема генерации течений в плоскости ZY . Ожидается, что в равновесном состоянии в канале возникают два тороидальных вихря $V1$ и $V2$ (слева и справа от оси OZ соответственно), линии тока которых представлены эллипсами, стрелки указывают направление движения. На рис. 2, в показан пример расположения датчиков на нижнем торце канала.

3. Результаты

Изучались течения, порождаемые токами в диапазоне от 200 до 500 А. Минимальное значение тока определялось чувствительностью УДА, поскольку прибор не позволяет разрешать течения со скоростями меньше 10 мм/с.

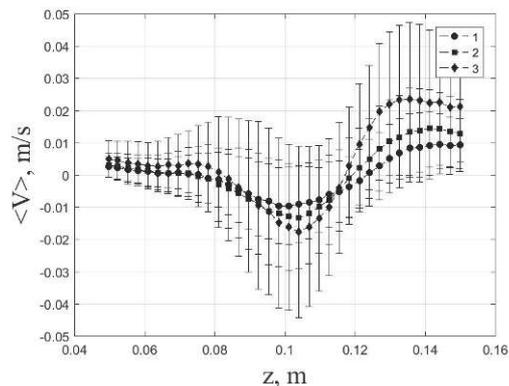


Рис. 5. Профили течения галлиевого сплава на оси канала. Сила тока в цепи: 1 – 207 А, 2 – 294 А, 3 – 479 А. Вертикальные линии отмечают уровень пульсаций скорости

Установлено, что средняя скорость возникающего течения не превышает 40 мм/сек, а само течение нестационарно уже при минимальном приложенном токе 200 А. По полученным данным рассчитывалось число Рейнольдса, определяемое через диаметр канала, $Re = \langle V \rangle D / \nu$, которое находилось в диапазоне $Re = 1096 \div 4830$.

Чтобы оценить вклад термогравитационной конвекции, возникающей в результате нагрева жидкого металла протекающим через него электрическим током, по завершении серий экспериментов были произведены измерения после выключения питания (рис. 3). Характерное время рассасывания тепловых неоднородностей на масштабах диаметра канала составляет около 371 с. Таким образом, проведенные измерения охватывали период релаксации градиентов температуры. Измерения показывают, что средняя скорость течений в отсутствие тока оказывается на порядок меньше, чем для течений, генерируемых при токе в 479 А. Таким образом, роль термогравитационной конвекцией представляется слабой, хотя исключить ее влияние нельзя.

На рис. 4 представлено пространственно-временное распределение вертикальной компоненты скорости в жидком металле при силе тока в цепи 479 А (температура сплава 26 °С).

Здесь и далее расположение датчиков идентично представленному на рис. 2, в. Один из датчиков УДА находился в центре нижнего фланца (на вертикальной оси канала). Из рисунка можно видеть, что скорости течения сильно пульсируют во всей области, что говорит о нестационарности исследуемого процесса.

На рис. 5 представлены профили скорости течения жидкого металла на вертикальной оси канала, для трех различных токов. Видно, что в нижней части канала течение направлено в сторону датчика (среднее значение скорости меньше нуля), а в верхней – наоборот, от него. Максимальная средняя скорость течения при этом составляет около 20 мм/с, при токе в 479 А. Аналогично рис. 4, вид-

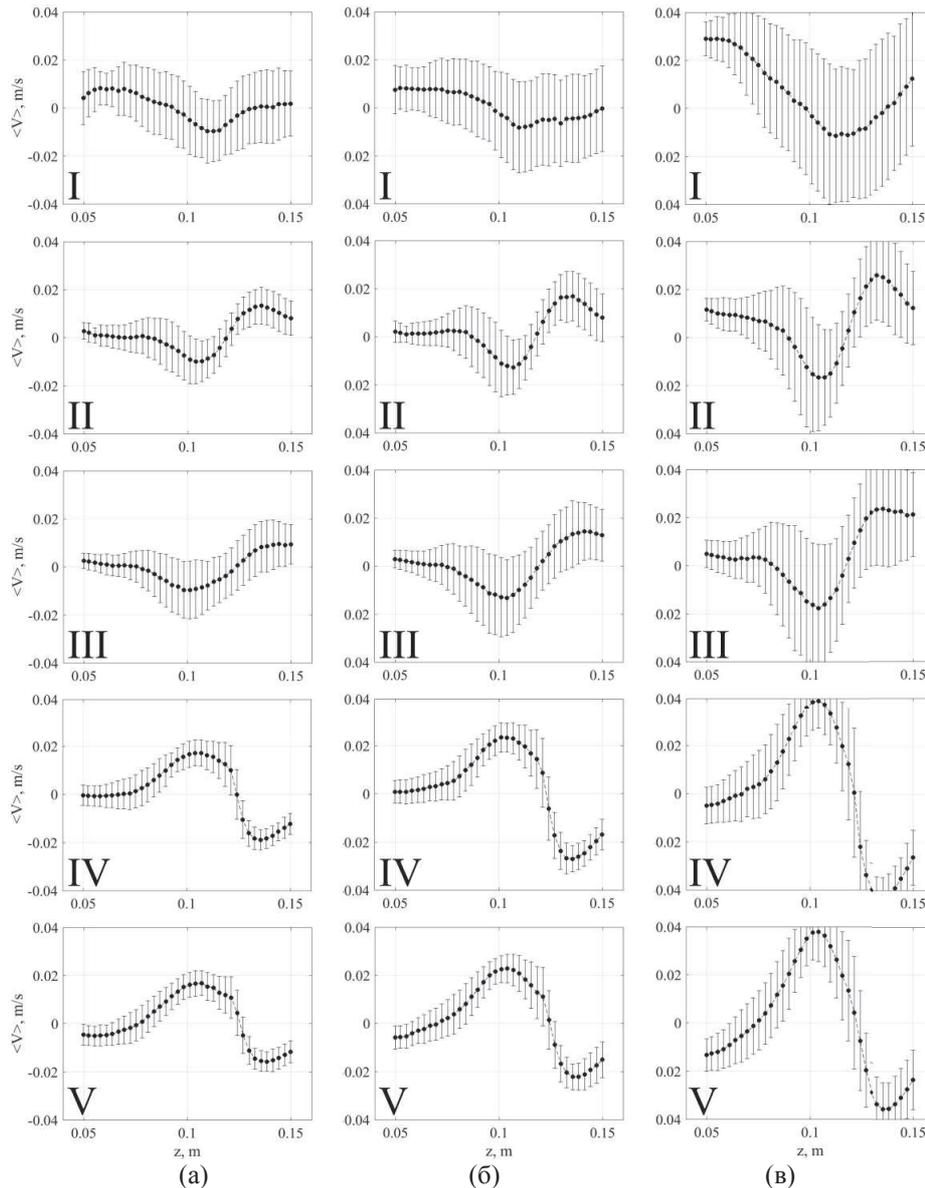


Рис. 6. Профили течения галлиевой эвтектики, полученные пятью датчиками. Сила тока в цепи: а – 207 А; б – 294 А; в – 479 А

ны пульсации с амплитудой до 50 мм/с. Профили скорости течения для других датчиков УДА показаны на рис. 6.

Профили скорости течения оказываются несимметричными, что также видно из векторных диаграмм (рис. 7). В верхней области канала течение представлено двумя крупномасштабными вихрями большой интенсивности, сохраняющимися в ходе всего эксперимента.

На рис. 8 изображены зависимости среднего значения (а) и среднеквадратичного отклонения (б) скорости в заданных точках вертикальной оси канала от тока. Полученные зависимости (а) показывают, что в верхней части канала с ростом силы тока значение средней скорости растет быстрее, чем в нижней. Зависимость на рис. 8 (б) показывает линейный рост среднеквадратичного отклонения скорости с ростом силы тока. В области

$z = 0.10$ м отношение амплитуды пульсации к величине средней скорости уменьшается с ростом тока, в то время как в $z = 0.13$ м это отношение увеличивается, что говорит об увеличении интенсивности пульсаций в верхней части канала. При этом в области электродов ($z = 0.10$ м) течение стабилизируется.

4. Заключение

В работе экспериментально изучено электро-вихревое течение в цилиндрическом канале, вызванное электрическим током, протекающим поперек канала между точечными электродами, расположенными на боковой стенке цилиндра. Используемый для измерения скорости ультразвуковой доплеровский анемометр позволил надежно регистрировать скорость возникающего течения

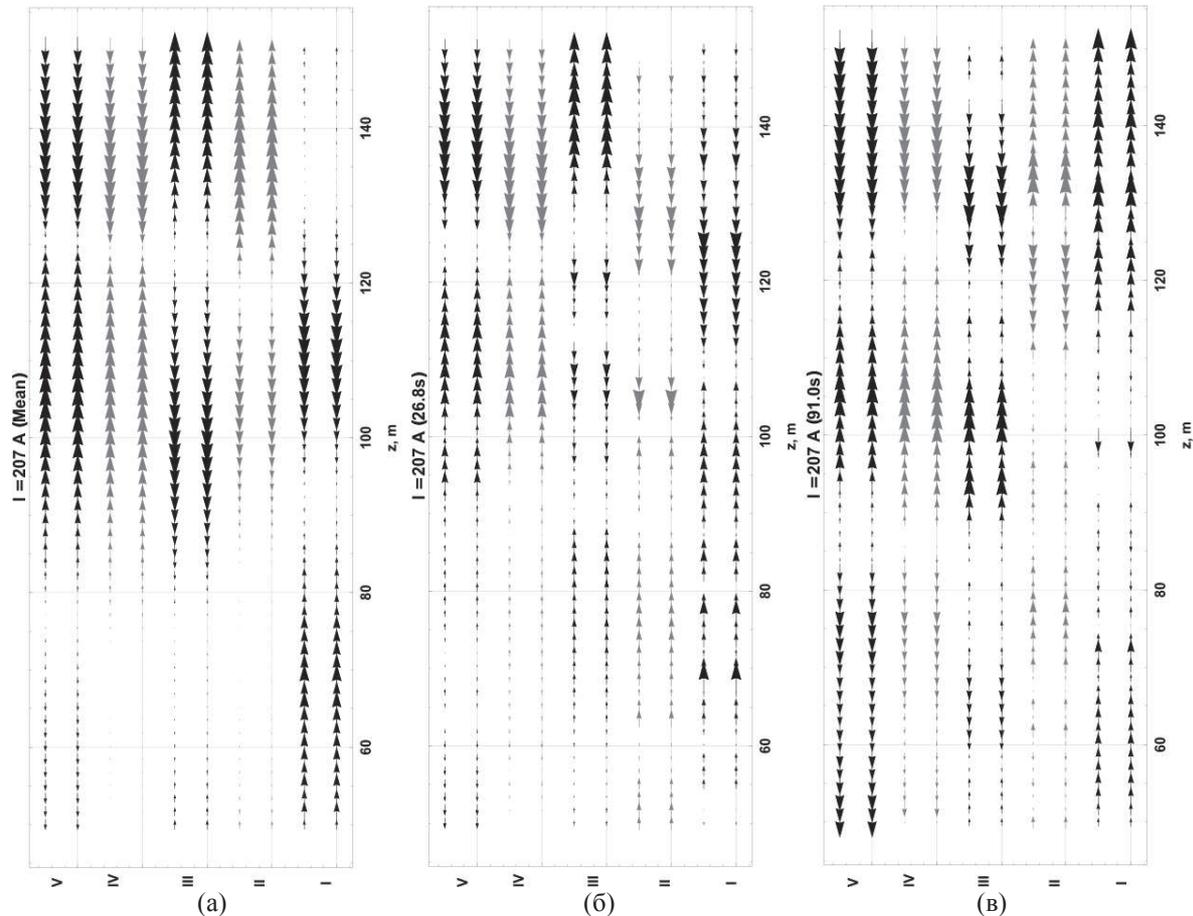


Рис. 7. Векторные диаграммы течения в канале при токе 207 А, римскими цифрами обозначен номер датчика: а – осредненное по времени течение; б – течение в момент времени 26.8 с; в – течение в момент времени 91.0 с

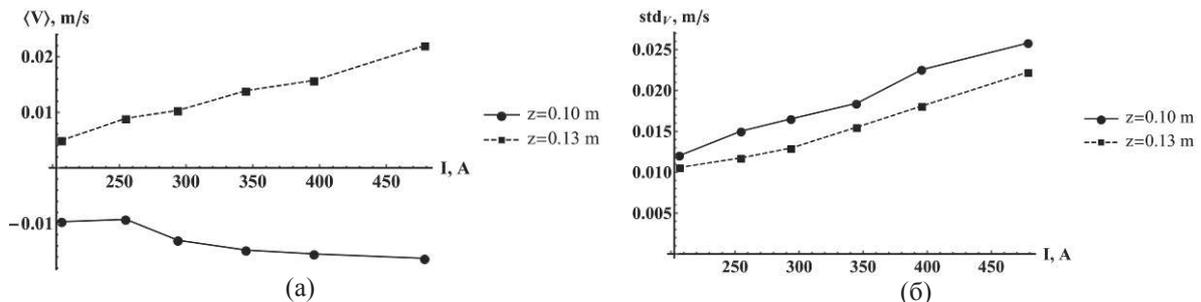


Рис. 8. Зависимости от тока: а – среднего значения скорости; б – среднеквадратичного отклонения в различных точках на оси симметрии канала

только при силе подводимого тока не менее 200 А. Максимальная средняя скорость течения составила 40 мм/с (при токе 500 А), т.е. невелика в сравнении с характерными транзитными скоростями в ЭВТ потоках [16].

Показано, что возникающее ЭВТ неустойчиво во всем диапазоне рассмотренных режимов. Амплитуда пульсаций скорости сопоставима со средним значением и растет с увеличением тока в цепи. С увеличением силы тока в верхней части канала значение средней скорости растет быстрее, чем в нижней. При этом в области электродов отношение уровня пульсаций к средней скорости умень-

шается, что свидетельствует о сносе основного вихря в верхнюю часть цилиндра. О несимметричности возникающего ЭВТ говорят и представленные на рис. 7 мгновенные и осредненные распределения вертикальной скорости в канале. В различные моменты времени в потоке доминирует то правый, то левый вихрь, но в среднем левый верхний вихрь оказывается значительно более сильным. Асимметрия течения по вертикали может объясняться как влиянием термогравитационной конвекции, так и асимметричностью поля плотности электрического тока и требует дальнейших исследований.

Список литературы

1. Бояревич В. В., Фрейберг Я. Ж., Шилова Э. В., Щербинин Э. В. Электровихревые течения. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
2. Хрипченко С. Ю. Электровихревые течения в каналах МГД-устройств. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 260 с.
3. Rabiger D., Zhang Y., Galindo V., Franke S., Willers B., Eckert S. The relevance of melt convection to grain refinement in Al-Si alloys solidified under the impact of electric currents // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 79. P. 327–338.
4. Kazak O. V., Semko A. N. Electro-vortex motion of a melt in DC furnaces with a bottom electrode // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2011. Vol. 84. N. 1. P. 223–231.
5. Kazak O. Modeling of vortex flows in direct current (DC) electric arc furnace with different bottom electrode positions // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2013. Vol. 44. N. 5. P. 1243–1250.
6. Kazak O. Numerical modelling of electrovortex and heat flows in DC electric arc furnace with cooling bottom electrode // *Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 50. N. 5. P. 685–692.
7. Weber N., Galindo V., Priede J., Stefani F., Weier T. The influence of current collectors on Taylor instability and electro-vortex flows in liquid metal batteries // *Physics of Fluids*. 2015. Vol. 27. N. 1, 014103.
8. Vinogradov D. A., Teplyakov I. O., Ivochkin Y. P., Klementeva I. B. Influence of the external magnetic field on hydrodynamic structure of the electrovortex flow in hemispherical container // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 899. N. 8, 082006.
9. Weber N., Galindo V., Stefani F., Weier T. Current-driven flow instabilities in large-scale liquid metal batteries, and how to tame them // *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 265. P. 166–173.
10. Sneyd A. D., Wang A. MHD driven instabilities in aluminium reduction cells // *Magnetohydrodynamics*. 1996. Vol. 32. N. 4. P. 487–493.
11. Дементьев С. Б., Чайковский А. И., Чудновский А. Ю. Формирование электровихревых течений в ваннах с многоэлектродным токоподводом // *Магнитная гидродинамика*. 1988. Вып. 1. С. 45–49.
12. Pedchenko A., Molokov S., Priede J., Lukyanov A., Thomas P. J. Experimental model of the interfacial instability in aluminium reduction cells // *Europhysics Letters*. 2009. Vol. 88. N. 2, 24001.
13. Хрипченко С. Ю. Генерация крупномасштабных вихревых структур в плоском слое мелкомасштабной спиральной турбулентностью // *Магнитная гидродинамика*. 1991. Т. 27. Вып. 4. С. 77–83.
14. Cruz Gomez R. C., Zavala Sanson L., Pinilla M. A. Generation of isolated vortices in a rotating fluid by means of an electromagnetic method // *Experiments in Fluids*. 2013. Vol. 54, 1582.
15. Kolesnichenko I., Frick P. Conducting fluid flow in a helical magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 2009. Vol. 45. N. 2. P. 165–171.
16. Соколов Д. Д., Степанов П. А., Фрик П. Г. Дианамо: на пути от астрофизических моделей к лабораторному эксперименту // *Успехи физических наук*. 2014. Т. 184. №. 3. С. 313–335.
17. Kolesnichenko I., Khalilov R., Shestakov A., Frick P. ICMM two-circuit sodium loop: a tool to study the mixing of flows with different temperature // *Magnetohydrodynamics*. 2016. Vol. 52. N. 1. P. 87–94.
18. Kolesnichenko I., Khripchenko S., Buchenau D., Gerbeth G. Electro-vortex flows in a square layer of liquid metal // *Magnetohydrodynamics*. 2005. Vol. 41. N. 1. P. 39–51.

References

1. Boyarevich V. V., Freiberg Ia. Zh., Shilova E. V., Shcherbinin E. V. *Elektrovikhrevye techeniia* (Electroconvective flows). Riga: Zinatne, 1985. 315 p. (In Russian).
2. Khripchenko S. Yu. *Elektrovikhrevye techeniia v kanalah MGD-ustroystv* (Electroconvective flows in channels of MHD devices). Ekaterinburg: UB RAS, 2009. 260 p. (In Russian).
3. Rabiger D., Zhang Y., Galindo V., Franke S., Willers B., Eckert S. The relevance of melt convection to grain refinement in Al-Si alloys solidified under the impact of electric currents. *Acta Materialia*, 2014, vol. 79, pp. 327–338.
4. Kazak O. V., Semko A. N. Electro-vortex motion of a melt in DC furnaces with a bottom electrode. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2011, vol. 84, no. 1, pp. 223–231.
5. Kazak O. Modeling of vortex flows in direct current (DC) electric arc furnace with different bottom electrode positions. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013, vol. 44. no. 5, pp. 1243–1250.
6. Kazak O. Numerical modelling of electrovortex and heat flows in DC electric arc furnace with cooling bottom electrode. *Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 50, no. 5, pp. 685–692.
7. Weber N., Galindo V., Priede J., Stefani F., Weier T. The influence of current collectors on Taylor instability and electro-vortex flows in liquid metal batteries. *Physics of Fluids*, 2015, vol. 27, no. 1, 014103.
8. Vinogradov D. A., Teplyakov I. O., Ivochkin Y. P., Klementeva I. B. Influence of the external magnetic field on hydrodynamic structure of

- the electrovortex flow in hemispherical container. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 899, no. 8, 082006.
9. Weber N., Galindo V., Stefani F., Weier T. Current-driven flow instabilities in large-scale liquid metal batteries, and how to tame them. *Journal of Power Sources*, 2014, vol. 265, pp. 166–173.
 10. Sneyd A. D., Wang A. MHD driven instabilities in aluminium reduction cells. *Magnetohydrodynamics*, 1996, vol. 32, no. 4, pp. 487–493.
 11. Dement'ev S. B., Chaikovskii A. I., Chudnovskii A. Yu. Generation of electrovortex flows in liquid-metal baths with a multielectrode current input. *Magnetohydrodynamics*, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 45–49.
 12. Pedchenko A., Molokov S., Priede J., Lukyanov A., Thomas P. J. Experimental model of the interfacial instability in aluminium reduction cells. *Europhysics Letters*, 2009, vol. 88, no. 2, 24001.
 13. Khripchenko S. Yu. Generation of large-scale vortical structures by small-scale helical turbulence in a fat layer. *Magnetohydrodynamics*, 1991, vol. 27, no. 4, pp. 77–83.
 14. Cruz Gomez R. C., Zavala Sanson L., Pinilla M. A. Generation of isolated vortices in a rotating fluid by means of an electromagnetic method. *Experiments in Fluids*, 2013, vol. 54, 1582.
 15. Kolesnichenko I., Frick P. Conducting fluid flow in a helical magnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 165–171.
 16. Sokolov D. D., Stepanov R. A., Frick P. G. Dynamo: from an astrophysical model to laboratory experiments. *Physics–Uspekhi*, 2014, vol. 57, pp. 292–311.
 17. Kolesnichenko I., Khalilov R., Shestakov A., Frick P. ICMM two-circuit sodium loop: a tool to study the mixing of flows with different temperature. *Magnetohydrodynamics*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 87–94.
 18. Kolesnichenko I., Khripchenko S., Buchenau D., Gerbeth G. Electro-vortex flows in a square layer of liquid metal. *Magnetohydrodynamics*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 39–51.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Мандрыкин С. Д., Колесниченко И. В., Лосев Г. Л., Фрик П. Г. Электровихревое течение жидкого металла в цилиндрическом канале // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 2 (40). С. 20–27. doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-20-27

Please cite this article in English as:

Mandrykin S. D., Kolesnichenko I. V., Losev G. L., Frick P. G. Electro-vortex flow of liquid metal in cylindrical cell. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 2 (40), pp. 20–27. doi: 10.17072/1994-3598-2018-2-20-27