

УДК 531.391.2
PACS 07.05.Tr

Экспериментальное исследование характеристик течения жидкого металла, вызванного переменным магнитным полем

Г.Л. Лосев, Р.И. Халилов, И.В. Колесниченко

Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1
email: losev.g@icmm.ru

Экспериментально исследовались энергетические и спектральные характеристики осциллирующего вихревого течения жидкой галлиевой эвтектики при помощи ультразвукового доплеровского анемометра (УДА). Профили скорости показывают, что наибольшая интенсивность течения проявляется в центральной области, в непосредственной близости от индуктора, и растёт с ростом величины внешнего поля. Найден нелинейный немонотонный характер зависимости локальной кинетической энергии течения от величины приложенного внешнего переменного магнитного поля. Обнаружено, что малые смещения полюсов индуктора от геометрического центра кюветы с металлом приводят к угасанию колебаний вихрей.

Ключевые слова: вихревое течение; магнитная гидродинамика; жидкий металл; неустойчивость течения

Поступила в редакцию 03.11.2017; принята к опубликованию 14.11.2017

Experimental investigation of characteristics of liquid metal flow generated by alternating magnetic field

G. L. Losev, R. I. Khalilov, I. V. Kolesnichenko

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Ac. Korolev St. 1, 614013, Perm, Russia
email: losev.g@icmm.ru

The energy and spectral characteristics of the oscillating vortex flow of a liquid gallium eutectic were experimentally investigated using ultrasonic Doppler velocimeter (UDV). The velocity profiles show that the greatest intensity of the flow occurs in the central area near of the inductor's poles, and grows with the increase of the external field magnitude. A nonlinear nonmonotonic character of the flow local kinetic energy dependence from magnitude of the applied external alternating magnetic field was found. It was found that small displacements of the inductor poles from the geometric center of the cell with the metal lead to extinction of the oscillations of the vortices

Keywords: vortex flow; magnetohydrodynamics; liquid metal; flow instability

Received 03.11.2017; accepted 14.11.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-11-18

1. Введение

В данной работе изучается течение жидкого металла в плоском слое. Источником течения является действие на металл переменного магнитного поля. Оно обуславливает появление в металле вихревого электрического тока. Взаимодействие тока и поля приводит к генерации электромагнитной силы. Эта сила вызывает вихревое течение жидкого металла.

Такой способ генерации электромагнитной силы нашел широкое применение в технике. Как правило, реализуются схемы с бегущим и вращающимся магнитными полями [1]. Создаваемые этими полями вихревые и потенциальные силы используют для осуществления бесконтактной транспортировки расплавленного металла по каналу и применяют для создания перемешивающих течений в замкнутых объемах [1,2].

Можно осуществить генерацию транзитного течения через канал и без использования схемы с бегущим магнитным полем. Для этого необходимо подобрать особую конфигурацию канала [3]. В этом случае электромагнит создает силу в локализованной области канала, что приводит к генерации вихревого течения с крупномасштабными вихрями. При этом перепад давления в канале насоса создается центробежной силой.

При использовании одного или нескольких подобных индукторов можно создавать перемешивающее течение в замкнутом прямоугольном канале с расплавленным металлом [4]. Если необходимо получить из расплава твердый слиток, то перемешивание влияет на ход процесса кристаллизации [5] и приводит к улучшению кристаллической структуры [6, 7].

В большинстве случаев область генерируемого магнитного поля локализована в пространстве. Это обусловлено ограничениями на размер индукторов. При этом возникает вихревое течение с несколькими крупномасштабными вихрями [4,5]. Впервые подобное течение в плоском слое моделировалось в работе [8]. Данное течение сохраняет свою структуру только при воздействии силы небольшой величины. При увеличении интенсивности силового воздействия течение становится неустойчивым пороговым образом [4]. Это проявляется в миграции вихрей в плоскости слоя.

Таким образом, течение жидкого металла в плоском слое, вызванное воздействием переменного магнитного поля, является актуальным объектом исследования. Неустойчивость вихрей является желательным процессом при перемешивании [4,5] и нежелательным при создании транзитного течения [3]. Это обуславливает интерес к детальному изучению характеристик подобных течений.

Основная проблема экспериментального исследования таких вихревых течений – высокая температура и химическая активность расплавов метал-

лов реального металлургического производства. Поэтому в данной работе исследуются свойства течения жидкого галлиевого сплава (87.5% Ga, 10.5% Sn, 2% Zn) в плоском горизонтальном слое во внешнем переменном магнитном поле. Для лучшего понимания структуры течения необходимо получить его пространственные характеристики. Однако для получения пространственных характеристик течения невозможно использовать полевые оптические методы (например, PIV) из-за оптической непрозрачности металла. Поэтому исследование проводится при помощи ультразвукового доплеровского анемометра (УДА). Данное сочетание метода измерений и рабочей среды широко распространено в магнитогидродинамических (МГД) исследованиях [6-11].

В работе [12] в похожей постановке задачи нами были подробно исследованы особенности измерения с помощью УДА. Обнаружено, что в ходе долговременной записи профилей УДА полученные данные становятся недостоверными. Изменение температуры в ходе опыта негативно сказывается на качестве получаемого сигнала (вплоть до полной потери полезного сигнала). При этом стабилизация температуры в ходе опыта благотворно сказывается на постоянстве энергетических характеристик, получаемых при помощи УДА. Перемешивание эвтектики течением высокой интенсивности также оказывает положительное влияние — увеличивает чувствительность методики измерения. Также было обнаружено, что продолжительные паузы между замерами улучшают качество данных. Все это было учтено при проведении измерений, осуществляемых в данной работе.

Интересным результатом работы [4] было нахождение зависимости локальной кинетической энергии течения от приложенной внешней электромагнитной силы. Характер найденной зависимости оказался не только нелинейным, но и не монотонным. На фоне характерного и ожидаемого роста кинетической энергии с увеличением интенсивности внешнего воздействия зависимость имеет области с обратным поведением. Предполагалось, что локализованные провалы графика энергии вызваны качественными изменениями структуры течения (образования новых вихревых структур). С развитием измерительной техники и появлением нового оборудования интерес к данной задаче и вопрос о причинах немонотонного поведения энергии возник вновь. Цель настоящей работы – исследование данного течения современными методиками при помощи УДА и поиск структурных изменений в течении.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из слоя жидкого галлиевого сплава (плотность $\rho = 6256 \text{ кг/м}^3$, кинематическая вязкость

$\nu = 3.1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, электропроводность
 $\sigma = 3.56 \cdot 10^6 \text{ См}$, скорость звука в среде
 $c = 2828 \text{ м/с}$), заключенного в кювету из органического стекла 1. Размеры рабочей полости кюветы составляют $200 \times 100 \times 15 \text{ мм}^3$. Слой помещен в зазор между полюсами С-образного индуктора 2, питание которого осуществляется от источника тока 3 Pacific Smart Source.

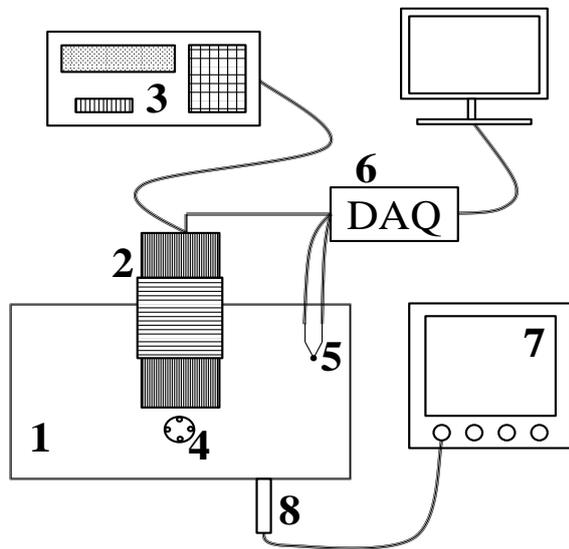


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – кювета с галлиевой эткетикой, 2 – С-образный индуктор, 3 – источник питания, 4 – КДС, 5 – термопара, встроенная в крышку кюветы, 6 – плата сбора данных, 7 – УДА, 8 – датчик УДА

Сохраняя возможность исследования свойств течения, съёмная крышка кюветы оборудована парой контрольных кондукционных датчиков скорости 4 (КДС), диаметрами 18 и 10 мм, а так же хромель-копелевой термопарой 5, позволяющей оценивать температуру металла. Сигналы с КДС и термопары поступают на плату сбора данных Nation Instruments с-DAQ 6. Использование УДА 7 DOP 2000 позволяет измерять выбранную компоненту скорости вдоль всего ультразвукового луча датчика 8, не ограничиваясь одной лишь точкой.

Перед началом серии экспериментов была найдена зависимость индукции магнитного поля в зазоре электромагнита от силы тока в питающих катушках. Измерения производились при помощи тесламетра Lake Shore 421 Gauss meter. Линейный характер зависимости позволяет использовать силу тока в катушках индуктора в качестве меры внешнего воздействия вместо индукции магнитного поля без изменения характера получаемых зависимостей.

3. Методика измерения и анализа

Положение полюсов индуктора относительно слоя металла определяет геометрию течения в последнем. При размещении полюсов индуктора в центральной области слоя некомпенсированные электромагнитные силы порождают четырёхвихревое осциллирующее течение, схематически изображенное на рис. 2. Параметры D_x и D_y имеют смысл координат полюсов электромагнита в системе, связанной со слоем металла. Третьим геометрическим параметром, определяющим конфигурацию установки, является положение датчика УДА L . Данный параметр устанавливает, в каком сечении будет производиться измерение скорости и изучение энергетических и частотных характеристик течения.

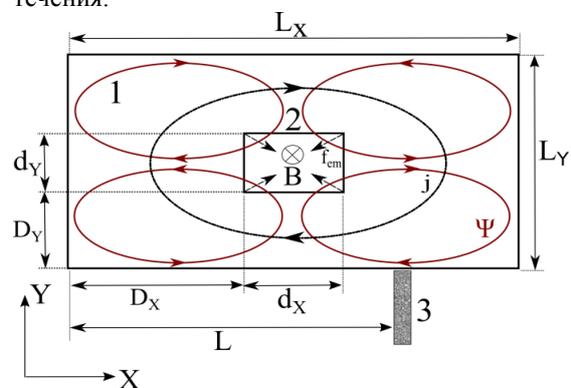


Рис. 2. Схема размещения полюсов индуктора и датчика УДА при четырёхвихревом течении, вид сверху: 1 – слой жидкого металла, 2 – полюс индуктора, 3 – датчик УДА

Перед началом измерений, при выбранном положении полюсов индуктора, датчик УДА устанавливался в выбранном сечении кюветы с использованием силиконового геля, применяемого для ультразвуковых измерений, с целью улучшения акустического контакта между датчиком и стенкой кюветы. Температура металла повышалась за счет перемешивания вихревым течением, а так же в результате омических потерь до величины, постоянной в ходе опыта. Постоянство температуры обеспечивалось в дальнейшем балансом между теплоотдачей в окружающую среду и нагревом, за счет указанных механизмов, в ходе измерений. После выхода в область рабочих температур металла течение останавливалось, после периода релаксации на источнике питания задавались частота и сила тока и производились измерения скорости.

Подробнее опишем процесс обработки экспериментальных данных на примере устойчивого колебательного течения при силе и частоте тока 8.0 А и 50 Гц соответственно.

Наиболее информативным, для первичного анализа эволюции скорости течения, является вывод экспериментальных данных в виде пространственно-временной карты профиля скорости (рис. 3). Временной промежуток между записями профилей скорости, при выбранных настройках УДА, составляет 124.9 мс, что накладывает ограничение на максимально разрешимую частоту 4 Гц при спектральном анализе сигнала. Карта эволюции явно демонстрирует наличие периодичности в поведении профиля скорости (положительные значения соответствуют движению металла в направлении излучаемых датчиком УДА ультразвуковых волн).

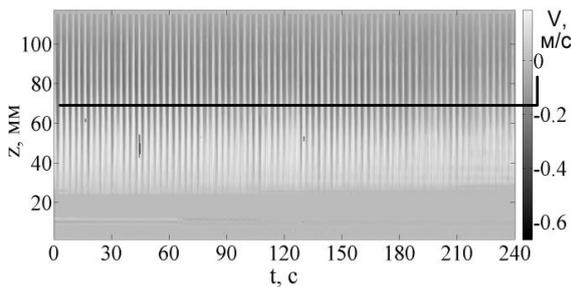


Рис. 3. Карта эволюции профиля скорости. Черная линия отмечает сечение, в котором рассматривается временная развёртка сигнала

Частотный анализ удобнее проводить на временной развёртке скорости, произведя сечение на карте эволюции в выбранной точке профиля (черная линия на рис. 3). Кроме того, сравнение энергетических характеристик сигнала в выбранной точке профиля с ранее полученными результатами более корректно, чем осреднение энергии по всему профилю. Соответствующая временная развёртка скорости и её спектр, нормированный по величине на единицу, приведены на рис. 4. В данном случае временная развёртка скорости качественно близка к гармоническим колебаниям, и в спектре присутствует одна выделенная частота (0.33 Гц), отвечающая колебаниям профиля скорости, связанным с изменением размера либо положения вихрей.

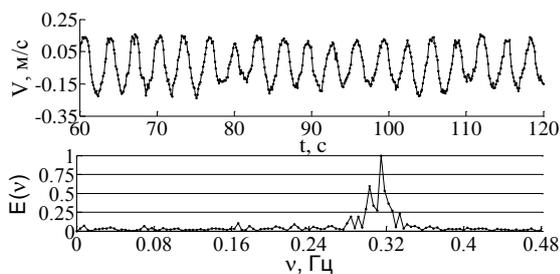


Рис. 4. Временная развёртка сигнала скорости в выбранной точке профиля (а) и её спектр (б)

В качестве энергетических характеристик потока выберем среднюю локальную кинетическую энергию течения W_f и среднюю локальную энергию пульсаций скорости W_p :

$$W_f = \langle V^2(y, t) \rangle_T \Big|_{y=y_0}, \quad (1)$$

$$W_p = \langle V(y, t) - \langle V(y, t) \rangle_T \rangle_T^2 \Big|_{y=y_0}, \quad (2)$$

где W_f определяется соотношением (1) как среднее по времени от квадрата измеренной проекции скорости V_y , в выбранной точке профиля и квадрата скорости пульсаций в выбранной точке профиля соответственно. Скорость пульсаций W_p определяется как разница между мгновенным значением скорости $V(y, t)$ и средним по времени значением $\langle V(y, t) \rangle_T$, взятыми в одной и той же точке.

В качестве частотных характеристик течения введём выделенную частоту колебаний профиля скорости (осцилляций вихря) ν_d как частоту, соответствующую максимуму спектральной плотности энергии при Фурье-разложении временного ряда скорости в выбранной точке профиля. При определении ν_d поставим условие: в случае отсутствия в сигнале выделенной, с физической точки зрения, частоты ν_d принимаем равным нулю. В качестве меры наличия в спектре выделенной частоты введём коэффициент заполнения спектра k_s как среднее по частотам от нормированной на единицу спектральной плотности энергии:

$$k_s = \frac{1}{\nu_{max} - \nu_{min}} \frac{\sum_i E(\nu_i) \Delta \nu}{E_{max}}. \quad (3)$$

Определенный таким образом коэффициент имеет предельное значение равное единице при полностью заполненном спектре. Пороговым было принято значение $k_s^* = 0.3$. При превышении k_s^* спектр сигнала считался заполненным без выделенных частот.

На основе найденных энергетических и спектральных характеристик строились зависимости от силы питающего тока в выбранном сечении слоя металла.

4. Зависимость характеристик течения от силы тока

В работе исследовались течения при двух положениях полюсов индуктора, отвечающих двухвихревой ($D_X = 96$ мм, $D_Y = 83$ мм) и четырёхвихревой ($D_X = 96$ мм, $D_Y = 55$ мм) структурам.

Первым шагом анализа структуры течения стало построение средних профилей скорости с учетом среднеквадратичных отклонений от

среднего. Рис. 5 и 6 демонстрируют данные профили для двух- и четырёхвихревого течений. Как видно, профили скорости двухвихревого течения имеют параболическую форму, в то время как в профилях четырёхвихревого течения присутствует точка перегиба.

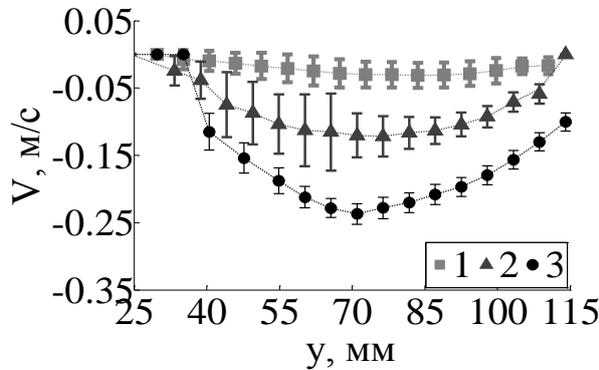


Рис. 5. Характерные профили скорости двухвихревых течений при различных величинах внешнего воздействия: 1. $I = 3.0$ А, 2. $I = 6.0$ А, 3. $I = 9.0$ А

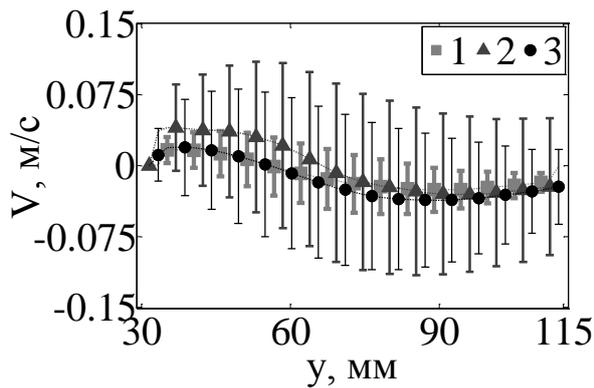


Рис. 6. Характерные профили скорости четырёхвихревых течений при различных величинах внешнего воздействия: 1. $I = 3.0$ А, 2. $I = 6.0$ А, 3. $I = 10.0$ А

В ходе исследования профилей скорости течения жидкого металла при различных величинах электромагнитных сил (сила и частота токов питания катушек индуктора) построены зависимости энергий течения и пульсаций для двух- и четырёхвихревого течений, которые приведены на рис. 7 и 8 соответственно. На рис. 8 вертикальные линии отмечают средне-квадратичную ошибку при осреднении данных по трём опытными реализациям.

Как видно из рис. 7, основная часть энергии двухвихревого течения приходится на стационарный вихрь (среднее течение). При этом энергия пульсаций оставляет лишь незначительную часть от общей энергии вихря. В то же время в области токов $I \approx 8$ А двухвихревое течение становится неустойчивым и

пульсационное движение нарушает стационарный вихрь. Это выражается в понижении общей энергии течения W_f на фоне роста энергии пульсаций W_p . Рис. 9 демонстрирует стационарный характер двухвихревого течения: значение k_S превышает критическое в области токов $I < 9$ А, т.е. в спектре пульсаций отсутствует выделенная частота. Колебания с выделенной частотой $\nu_d \approx 0.5$ Гц наблюдаются лишь при наибольших токах.

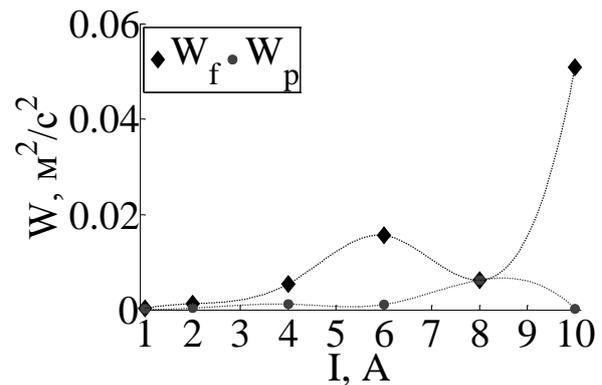


Рис. 7. Зависимость средней локальной кинетической энергии течения и пульсаций от величины внешнего воздействия для двухвихревого течения

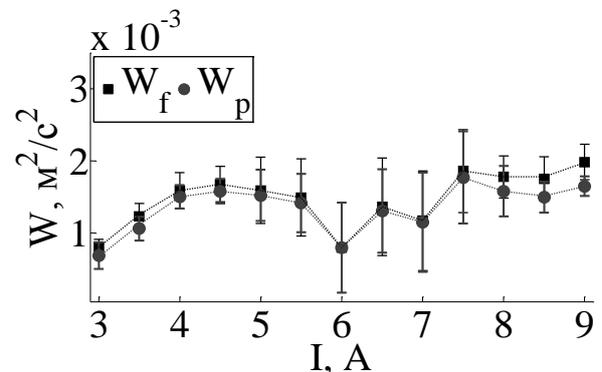


Рис. 8. Зависимость средней локальной кинетической энергии течения и пульсаций от величины внешнего воздействия для четырёхвихревого течения

В свою очередь, четырёхвихревое течение является существенно нестационарным – вихри меняют свой размер и скорость вращения с течением времени. Рис. 8 демонстрирует, что отличие полной энергии течения от энергии пульсаций незначительно, т.е. выраженное пульсационное течение существует на фоне слабого стационарного движения. При этом наибольший разброс в энергиях от опыта к опыту наблюдается в области токов $I \approx 5-7$ А, где, по-видимому, происходит качественная перестройка структуры поля скорости, выражающаяся в том числе в понижении кинетической энергии и изменении частоты пульсаций.

Рис. 10 подтверждает перестройку структуры течения в данной области вплоть до подавления осцилляций ($v_d = 0$ при $I = 6.0$ А). Значительный разброс частот при промежуточных значениях силы тока может быть связан с нестационарностью колебаний вихря. В то же время в области больших и малых токов колебания устойчивы и разброс по частотам минимален.

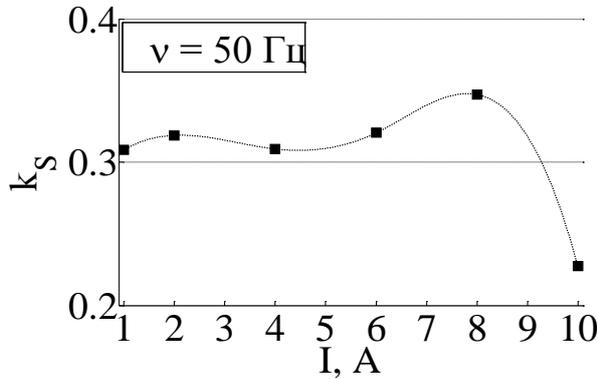


Рис. 9. Зависимость коэффициента заполнения спектра двухвихревого течения от величины внешнего воздействия

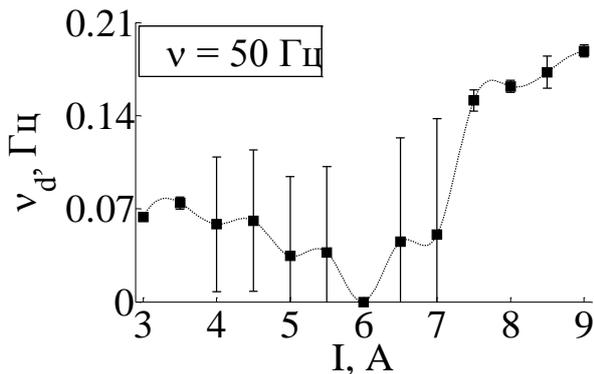


Рис. 10. Зависимость частоты колебаний вихрей от величины внешнего воздействия

5. Устойчивость течения к смещению полюсов

Переход четырёхвихревого течения к двухвихревому при смещении полюсов индуктора вдоль оси OY изучался в области токов, отвечающих ярко выраженным течениям $I = 8$ А. Для переходного режима от четырёхвихревого течения к двухвихревому были построены зависимости средней локальной энергии течения и пульсаций (рис. 11) и коэффициента заполнения спектра (рис. 12) от смещения полюсов индуктора вдоль оси OY . При этом начальным ($\Delta L_y = 0$ мм) положением считалось совпадение геометрических центров полюсов индуктора и кюветы. Это положение отвечает генерации четырёхвихревого течения. Конечное положение ($\Delta L_y = 30$ мм) — генерации двухвихревого течения.

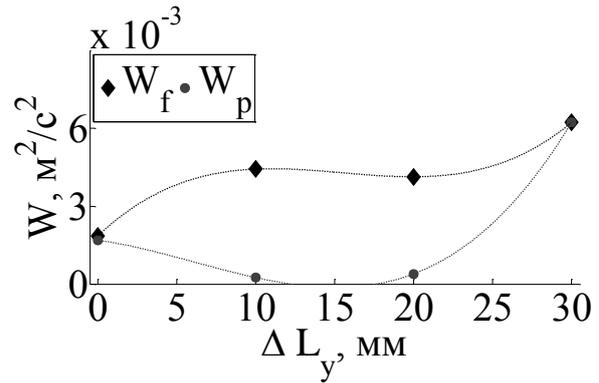


Рис. 11. Профили скорости течения при смещении полюса электромагнита вдоль оси Y из центрального положения

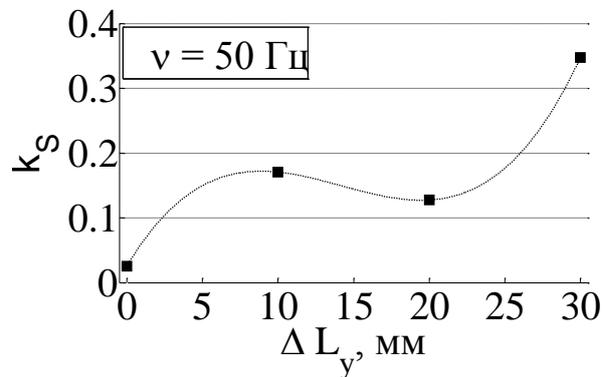


Рис. 12. Энергия и коэффициент заполнения спектра при смещении полюса электромагнита вдоль оси Y из центрального положения

Как видно из рис. 12, течение имеет колебательный характер лишь в начальной области (минимум k_s). По мере смещения полюса индуктора к краю слоя металла колебания становятся менее выраженными и в спектре появляются новые частоты (рост k_s). Наконец, в области двухвихревого течения поток становится устойчивым и выделение отдельной частоты осцилляций становится затруднительным.

Переходное течение является устойчивым: полная энергия течения значительно превышает энергию пульсаций скорости относительно среднего значения рис. 11. Следует отметить, что энергия двухвихревого течения превосходит энергию четырёхвихревого почти в два раза. По-видимому, это связано с различием в масштабах течений. Подобная интерпретация результатов позволяет утверждать, что в области переходных течений масштаб вихрей меняется слабо и вихри имеют стационарный характер.

6. Заключение

В ходе работы был обнаружен немонотонный характер зависимости средней локальной энергии четырёхвихревого течения жидкого металла от величины тока и частоты внешнего приложенного

магнитного поля. Наличие участков, отвечающих локальному минимуму кинетической энергии течения, позволяет уменьшить интенсивность перемешивания металла при воздействиях одного порядка. В то же время частота колебаний вихрей линейно зависит от величины и частоты внешнего поля, что указывает на повышение эффективности передачи энергии между вихрями.

Полученные в ходе всех представленных реализаций зависимости выделенной частоты колебаний скорости при периодичном течении имеют существенно нелинейный характер с минимумом, отвечающим полному отсутствию выделенной частоты при промежуточных значениях внешнего поля, уменьшением частоты колебаний при малых полях и значительным ростом при магнитных полях большой интенсивности. Таким образом, можно утверждать, что скорость перемешивания металла и интенсивность осциллирующего течения определяются свойствами перемешиваемой среды в заданной конфигурации системы.

Было установлено, что стационарное двухвихревое течение становится неустойчивым и переходит в колебательный режим при значительных интенсивностях внешнего воздействия. При этом кинетическая энергия течения демонстрирует значительный рост. В спектре временных развёрток профилей скорости появляется выделенная частота.

Установлено, что малые смещения полюсов индуктора от геометрического центра слоя металла приводят к угасанию колебаний вихрей — в спектрах временных развёрток скорости исчезает выделенная частота. При этом величина локальной кинетической энергии уменьшается почти в два раза.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-48-590539.

Список литературы

1. Повх И. Л., Капуста А. Б., Чекин Б. В. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Металлургия, 1974. 240 с.
2. Вольдек А. И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия. 1970. 271 с.
3. Khripchenko S., Khalilov R., Kolesnichenko I., Denisov S., Galindo V., Gerbeth G. Numerical and experimental modelling of various MHD induction pumps // *Magnetohydrodynamics*. 2010. Т. 46. С. 85–97.
4. Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S. Vortical flow of conducting fluid driven by an alternating magnetic field in a plane channel // *Magnetohydrodynamics*. 2007. Vol. 43. N. 1. P. 45–52.

5. *Oborin P., Kolesnichenko I.* Application of the ultrasonic doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid // *Magnetohydrodynamics*. 2013. Vol. 49. P. 231–236.
6. *Eckert S., Nikrityuk P. A., Rabiger D., Eckert K., Gerbeth G.* Efficient Melt Stirring Using Pulse Sequences of a Rotating Magnetic Field: Part I. Flow Field in a Liquid Metal Column // *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*. 2007. Vol. 38. P. 977–988.
7. Альмухаметов В. Ф., Хрипченко С. Ю. Электродинамическая модель перемешивателя трансформаторного типа жидкого ядра слитка // *Магнитная гидродинамика*. 1987. № 2. С. 141–142.
8. Курко И. М., Альмухаметов В. Ф., Хрипченко С. Ю. Физическое моделирование неустойчивого состояния границы раздела электролит – металл в мощных алюминиевых электролизерах // *Доклады АН СССР*. 1988. Т. 302. № 4. С. 845–847.
9. *Kolesnichenko I., Khripchenko S., Buchenau D., Gerbeth G.* Flow in a square layer of conducting liquid // *Magnetohydrodynamics*. 2005. Vol. 41. N. 1. P. 39–51.
10. *Andreev O., Kolesnikov Y., Thess A.* Application of the ultrasonic velocity profile method to the mapping of liquid metal flows under the influence of a non-uniform magnetic field // *Experiments in Fluids*. 2009. N. 46. P. 77–83.
11. *Rabiger D., Eckert S., Gerbeth G.* Measurements of an unsteady liquid metal flow during spin-up driven by a rotating magnetic field // *Experiments in Fluids*. 2010. N. 48. P. 233–244.
12. *Losev G., Khalilov R., Kolesnichenko I.* UDV study of a liquid metal vortex flow // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 208, 012022

References

1. Povkh I. L., Kapusta A. B., Chekin B. V. *Magnitnaia gidrodinamika v metallurgii* (Magnetic hydrodynamics in metallurgy). M.: Metallurgiya, 1974, 240 c. (In Russian).
2. Voldek A. I. Induction magnetohydrodynamic machines with liquid metallic secondary. Leningrad: Energiia, 1970, 271 p. (In Russian).
3. Khripchenko S., Khalilov R., Kolesnichenko I., Denisov S., Galindo V., Gerbeth G. Numerical and experimental modelling of various MHD induction pumps. *Magnetohydrodynamics*, 2010, vol. 46, pp. 85–97.
4. Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S. Vortical flow of conducting fluid driven by an

- alternating magnetic field in a plane channel. *Magnetohydrodynamics*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 45–52.
5. Oborin P., Kolesnichenko I. Application of the ultrasonic doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid. *Magnetohydrodynamics*, 2013, vol. 49, pp. 231–236.
 6. Eckert S., Nikrityuk P. A., Rabiger D., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 2007, vol. 38, pp. 977–988.
 7. Al'muhametov V. F. Khripchenko S. Ju. Elektrodinamicheskaia model' peremeshivatelya transformatornogo tipa zhidkogo iadra slitka (Электродинамическая модель перемешивателя трансформаторного типа жидкого ядра слитка). *Magnitnaja Hidrodinamika*, 1987, no. 2, pp. 141–142. (In Russian).
 8. Kirko I. M., Al'muhametov V. F. Khripchenko S. Ju. Fizicheskoe modelirovanie neustojchivogo sostojaniya granicy razdela jelektrolit – metall v moshhnyh aljuminievyh jelektrolizerah (Physical modeling of instability of electrolyte–metal interface in high-power aluminium electrolytic tank). *Soviet Physics. Doklady*, 1988, vol. 302, no. 4, pp. 845–847. (In Russian)
 9. Kolesnichenko I., Khripchenko S., Buchenau D., Gerbeth G. Flow in a square layer of conducting liquid. *Magnetohydrodynamics*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 39–51.
 10. Andreev O., Kolesnikov Y., Thess A. Application of the ultrasonic velocity profile method to the mapping of liquid metal flows under the influence of a non-uniform magnetic field. *Experiments in Fluids*, 2009, no. 46, pp. 77–83.
 11. Rabiger D., Eckert S., Gerbeth G. Measurements of an unsteady liquid metal flow during spin-up driven by a rotating magnetic field. *Experiments in Fluids*, 2010, no. 48, pp. 233–244.
 12. Losev G., Khalilov R., Kolesnichenko I. UDV study of a liquid metal vortex flow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 208, 012022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лосев Г. Л., Халилов Р. И., Колесниченко И. В. Экспериментальное исследование характеристик течения жидкого металла, вызванного переменным магнитным полем // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 4 (38). С. 11–18. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-11-18

Please cite this article in English as:

Losev G. L., Khalilov R. I., Kolesnichenko I. V. Experimental investigation of characteristics of liquid metal flow generated by alternating magnetic field. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 4 (38), pp. 11–18. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-11-18