

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЯХ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования пульсационных характеристик полей скорости и температуры т.н. электровихревых течений (ЭВТ), образующихся при пропускании электрического тока от малого (точечного) электрода, расположенного на свободной поверхности жидкометаллического теплоносителя (эвтектический сплав индий — галлий — олово), в объем жидкого металла. Опыты, в которых в качестве измерительных датчиков использовались оригинальные волоконно-оптические преобразователи скорости и термомпары, были выполнены при значении электрического тока $I \leq 500$ А. Показано, что интенсивность пульсаций скорости пропорциональна значению электрического тока и не превышает 20 % от средней скорости. Измерены профили среднеквадратичных значений и проанализирована структура пульсаций температуры. Выявлена существенная асимметрия профилей температуры и обнаружено наличие значительного поперечного (относительно вертикальной оси симметрии рабочего участка) температурного градиента вблизи малого электрода.

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди магнитогидродинамических течений, вызванных действием объемной пондеромоторной силы, особый интерес для исследователей представляют т.н. электровихревые течения (ЭВТ). Эти течения образуются в результате взаимодействия электрического тока, пропускаемого через жидкость, с собственным магнитным полем, при условии, что его плотность неоднородно распределена в объеме токонесящего теплоносителя. Работы по исследованию ЭВТ были инициированы и развиты научной группой под руководством Э.В. Щербинина в Институте физики Латв. АН [1] и, кроме фундаментальной направленности, имеют большое прикладное значение для различных отраслей машиностроения, энергетики и металлургии, в частности, для получения особо чистых металлов с помощью метода электрошлакового переплава [2]. Основное внимание в перечисленных выше работах уделялось изучению средних гидродинамических параметров потока, в то время как турбулентные характеристики полей скорости и температуры ЭВТ остались практически неизученными. Учитывая, что опытные данные по пульсациям температуры и скорости крайне необходимы для более глубокого понимания физической природы и создания уточненных численных кодов расчета ЭВТ, нами были выполнены эксперименты по измерению этих пульсационных характеристик, результаты которых представлены ниже.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В качестве рабочего теплоносителя в опытах использовался эвтектический сплав индий — галлий — олово с содержанием по весу Ga — 67 %, In — 20.55 %, Sn — 12.5 % (температура плавления +10.5 °С). Сплав заполнял полусферическую, изготовленную из меди полую емкость диаметром 188 мм, которая одновременно служила большим электродом. Малый электрод был изготовлен также из меди в форме выпуклой полусферы диаметром 6 мм. Оба электрода могли охлаждаться водой. С целью увеличения рабочего значения электрического тока, в отличие от работ [3, 4], в представленном исследовании для электропитания экспериментального стенда использовался не генератор постоянного тока, а источник, разработанный на основе трехфазного выпрямителя переменного тока. Значение электрического тока в проведенных экспериментах изменялось в диапазоне 50—500 А.

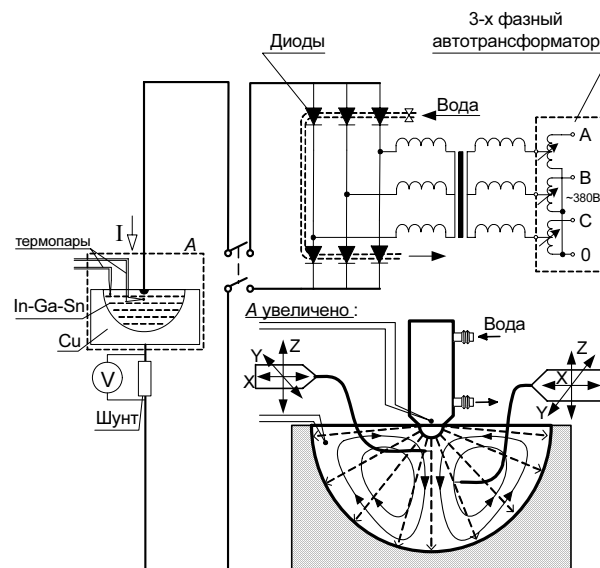


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В качестве измерителя скорости в объеме токонесящей жидкости использовался волоконно-оптический преобразователь, конструкция и принцип действия которого описаны в [5]. Зонд волоконно-оптического преобразователя скорости (как и датчика температуры) имел Г-образную форму и крепился на координатном устройстве, которое позволяло перемещать датчик в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Выходной сигнал с из-

мерительных датчиков (температуры и скорости) усиливался и фильтровался блоками формирования сигналов, затем подавался на АЦП и обрабатывался на компьютере.

Так же, как в работе [3], тарировка волоконно-оптического преобразователя проходила в воздушной струе, а затем пересчитывалась на поток эвтектического сплава. Калибровочная характеристика и схематическое изображение датчика скорости показаны на рис.2.

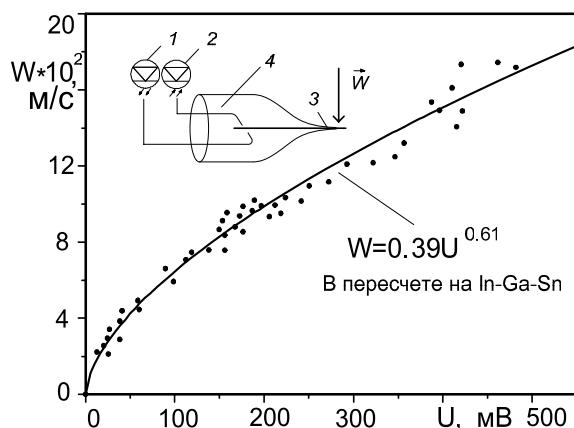


Рис. 2. Калибровочная характеристика волоконно-оптического датчика скорости: 1 — фотодиод; 2 — светодиод; 3 — чувствительный элемент; 4 — светопроводы

Термопарный зонд был изготовлен из двух медных и константанового проводов диаметром 0.075 мм. Диаметр королька термопары ~0.3 мм. В опытах использовалась трехпроводная схема измерения сигнала.

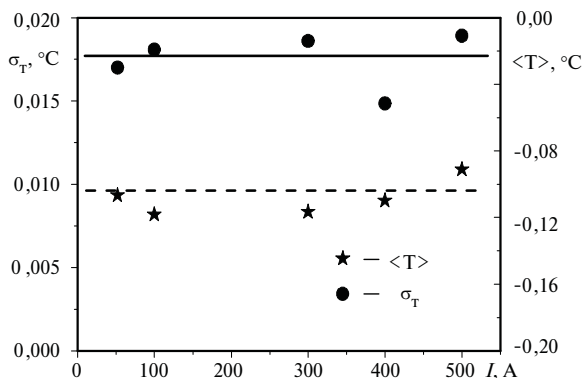


Рис. 3. Результаты экспериментальной оценки влияния «шагового» напряжения на показания термопар

С целью оценки возможного влияния электрического тока на показания термопар были поставлены специальные эксперименты по измерению наведенного на них «шагового» напряжения. Для этого модель термопары, изготовленная из двух одинаковых константановых проводов, была размещена под малым электродом на расстоянии ~1 мм от его нижней части. В момент пропускания через жидкий металл электрического тока на ней образовывалось падение электрического напряжения, которое измерялось с помощью вторичной аппаратуры, включающей в себя прецизионный термопарный усилитель, АЦП и

компьютер. Результаты экспериментов, представлены на рис.3, где по оси ординат отложены средние значения и среднеквадратичные значения отклонений сигналов с модели термопары, для удобства пересчитанные на предполагаемое условное значение температуры (термоЭДС 40 мкВ/К). По оси абсцисс отложено значение электрического тока, пропускаемого через рабочий участок. Из рис. 3 видно, что обе измеряемые величины практически не зависят от значения электрического тока и (как будет показано ниже) не превышают 10% от значения реального температурного сигнала. Отрицательное значение среднего сигнала обусловлено небольшим смещением выходного сигнала на термопарном усилителе.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ранее нами в работе [3] были измерены поля осредненной скорости и установлено, что ЭВТ описываются закономерностями струйных течений. Там же было показано, что корректное применение волоконно-оптических датчиков скорости существенным образом ограничено наличием температурных градиентов (пространственных и временных), которые могут быть в исследуемом потоке. Поэтому измерения мгновенных значений продольной компоненты скорости (совпадающей с направлением основного струйного потока, направленного в глубь жидкого металла от края малого электрода) и ее среднеквадратичного значения были выполнены на значительном (~35 мм) расстоянии от малого электрода, где заведомо выполняются условия, близкие к изотермическим.

Рисунок 4, где представлены осциллограммы продольной скорости, иллюстрирует динамику ее развития в зависимости от времени и значений электрического тока. Выделим две характерные особенности электровихревых течений. Во-первых, в процессе своего разгона ЭВТ с какого-то момента теряют устойчивость и, можно предположить, распадаются на отдельные вихри, генерирующие интенсивные низкочастотные пульсации скорости. Во-вторых, как можно заметить, например, для реализаций при I ~300А, в некоторых режимах значение осредненной скорости сначала растет, стабилизируется, а затем уменьшается на ~15 % и снова становится постоянным, но уже в режиме с существенными пульсациями скорости. Уменьшение средней скорости может быть связано с азимутальной закруткой ЭВТ (это явление описано в работе [1]) и образованием спирального струйного течения вблизи малого электрода.

На рис. 5 представлены полученные опытные данные по среднеквадратичным значениям пульсаций скорости σ_w . Как видно из рисунка, абсолютные значения интенсивности пульсаций линейно возрастают с ростом электрического тока, а их относительное значение, отнесенное к средней скорости ($\sigma_w / \langle W \rangle$), остается примерно постоянным и не превышает 20 %.

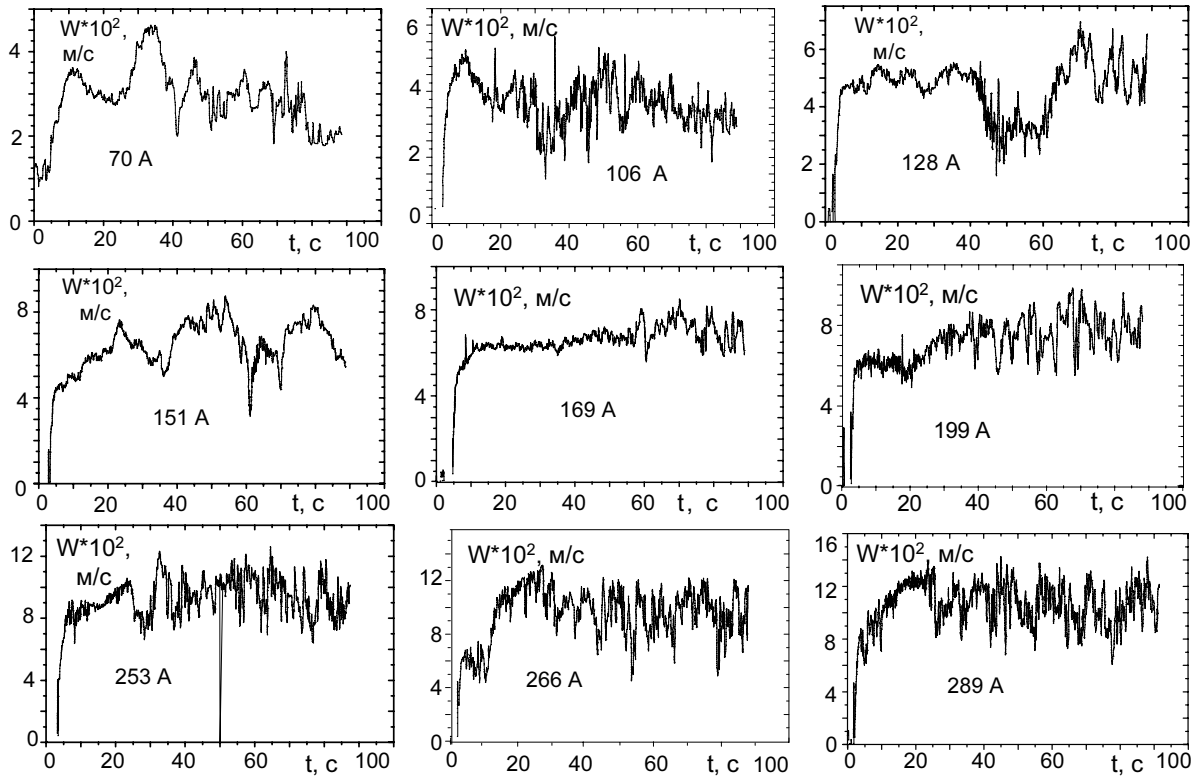


Рис. 4. Осциллограммы продольной компоненты скорости электровихревого течения

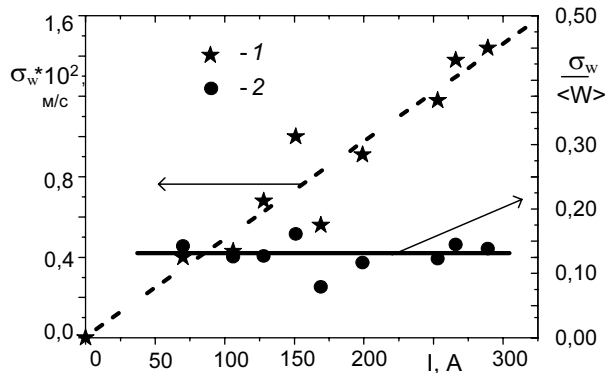


Рис. 5. Зависимость абсолютных (обозначение 1) и относительных (2) среднеквадратичных значений пульсаций скорости от значения электрического тока.

Проведенные исследования температурных полей показали, что их вид в существенной степени определяется способами охлаждения большого и малого электродов, причем практически изотермическое состояние теплоносителя (исключая незначительную область вблизи малого электрода) можно достичь с помощью интенсивного совместного водяного охлаждения стенок обоих электродов и свободной поверхности жидкого металла. Вместе с тем для практических целей, в частности для исследования процесса электрошлакового переплава, наибольший интерес представляют неизотермические режимы течений с естественным (воздушным) способом охлаждения электродов. Как это видно из рис. 6, эти режимы характеризуются существенной зависимостью средней температуры металла от времени, хотя ее осредненные пульсационные характеристики практически стационарны.

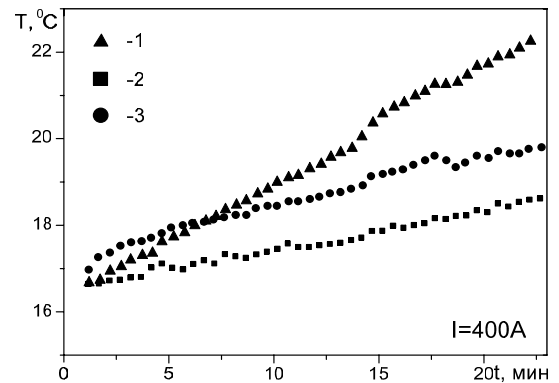


Рис. 6. Зависимость средних и среднеквадратичных значений температуры от времени: 1 — температура в центре малого электрода; 2 — температура большого электрода; 3 — температура теплоносителя под малым электродом на расстоянии 1 мм от его окончания

На рис. 7 представлены измеренные при различных значениях электрического тока профили интенсивности пульсаций температуры, которые показывают, что в условиях воздушного охлаждения обоих электродов пульсации температуры увеличиваются с ростом значения I .

Характерный температурный профиль при значении электрического тока 500А показан на рис. 8. Как видно из этого рисунка, вблизи малого электрода наблюдается значительный градиент температуры, который и порождает ее пульсации. Физическая природа возникновения этого градиента не совсем ясна и может быть обусловлена сложным взаимодействием электровихревых течений и свободной конвекции в условиях сильной спиральной закрутки потока вблизи малого электрода.

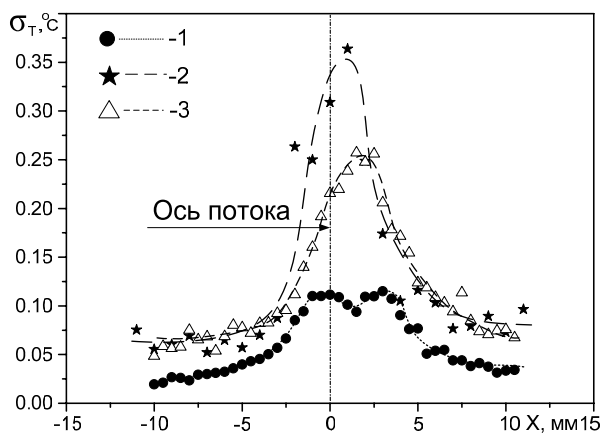


Рис. 7. Профили интенсивности пульсаций температуры: 1 — ток 500 А; 2 — 400 А.; 3 — 300 А. Расстояние до малого электрода 1 мм

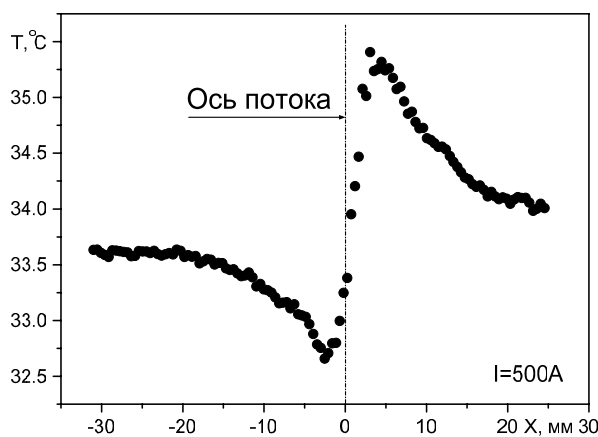


Рис. 8. Профиль осредненной температуры; расстояние до малого электрода 1 мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный экспериментальный материал свидетельствует о сложной трехмерной структуре электровихревых течений вблизи малого электрода, существенно отличающейся от упрощенной двух-

вихревой осесимметричной картины потока, которая наблюдается на свободной поверхности [1, 2] токнесущей жидкости и обычно используется как модель ЭВТ.

Авторы выражают благодарность Н.Г. Разуванову за помощь в подготовке эксперимента.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 04-02-17145.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

W — скорость потока, м/с;

T — температура, °С;

t — время, с;

X — расстояние от вертикальной оси симметрии полу-сферы, мм;

I — электрический ток, А;

U — электрический сигнал с датчика, В;

σ_w — среднееквадратичное значение пульсаций скорости, м/с;

σ_T — среднееквадратичное значение пульсаций температуры, °С.

Индексы:

$\langle \rangle$ — осреднение по времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электровихревые течения** / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова и др.; Под. общ. ред. Э.В. Щербинина. Рига.: Зинайте, 1985. 315 с.
2. **Компан Ю.Ю., Щербинин Э.В.** Электрошлаковая сварка с управляемыми МГД-процессами. М.: Машиностроение, 1989. 272 с.
3. **Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Игумнов В.С., Оксман А.А.** Экспериментальное исследование электровихревых течений в полусферическом объеме // ТВТ. 1995. Т. 33. № 1. С. 3—6.
4. **Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Игумнов В.С., Оксман А.А.** К вопросу о возникновении свободной конвекции в электровихревых течениях // ТВТ. 1995. Т. 33. № 3. С. 490—491.
5. **Жилин В.Г.** Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 112 с.