

На правах рукописи



Лосев Геннадий Леонидович

Измерения характеристик и контроль МГД-процессов

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Фрик Пётр Готлобович**
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Ячиков Игорь Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-измерительной техники ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск)

Вяткин Алексей Анатольевич
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики и технологии
ФГБОУ ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет» (г. Пермь).

Ведущая организация: Институт математики, информационных технологий и физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск

Защита состоится 11 ноября 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



Зуев А.Л.

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Металлургическая промышленность является производителем широкого класса товаров стратегического значения. Важными задачами металлургической промышленности являются транспортировка, обработка и кристаллизация жидких металлов. Именно качество обработки металлов в ходе производственного процесса определяет прочностные характеристики продукции. Образование дефектов металлического зерна напрямую связано с загрязнением материала и процессом кристаллизации металлического расплава.

Перемешивание металлов в ходе процесса кристаллизации обеспечивает измельчение зерна металла, гомогенизацию распределения примесей и повышение прочности конечного изделия. Изменение скорости кристаллизации расплава позволяет добиться однородности фазового перехода и физических свойств отливок. Наконец, чистые и сверхчистые металлы обладают уникальными прочностными характеристиками за счет отсутствия дефектов кристаллической решетки, связанных с химическими примесями. Сверхчистые металлы являются востребованным материалом аэрокосмической, судостроительной и военной промышленности. В силу комплексного характера и многогранного влияния внешних факторов на процессы обработки жидких металлов чрезвычайно важным оказывается оперативное измерение характеристик процессов обработки (как то скорости перемешивающих течений, распределение примесей, форма фронта кристаллической фазы) и управление обозначенными процессами.

Высокие температуры плавления и химическая активность подавляющего числа металлов и сплавов, нашедших применение в промышленности, а также электропроводность расплавов обуславливают применение электромагнитных полей в качестве основного механизма управления потоками металлов в условиях промышленных производств. Поэтому, методы контроля гидродинамических процессов должны базироваться на изменении конфигурации внешних электромагнитных полей в соответствии с технологическими задачами производства.

Цели и задачи диссертационной работы: Целью работы является отработка методов измерения и корректного электромагнитного воздействия в процессах перемешивания, очистки и кристаллизации жидких металлов. В рамках реализации поставленной цели решаются задача о генерации вихревых структур в плоском слое жидкого металла под действием локализованной в пространстве электромагнитной силы, задача управления формой фронта кристаллизации металлического расплава, находящегося под воздействием модулированного бегущего магнитного поля и задача сепарации примеси отличной проводимости из жидкой проводящей среды.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые

- для ЭВТ, генерируемого в прямоугольной кювете со слоем жидкого металла, на основе анализа полученных при помощи ультразвуковых измерений

профилей скорости, построена карта режимов течений на плоскости параметров силового воздействия и положения области действия переменного магнитного поля;

- показаны возможности воздействия на форму фронта кристаллизации металла при направленном фазовом переходе путем наложения различных типов низкочастотных модуляций бегущего магнитного поля, генерирующего течения в жидкой фазе;
- изучен процесс электромагнитной сепарации примеси (электропроводность примеси отлична от электропроводности несущей жидкости) в специальной емкости, задающей топологию потока, что позволило сформулировать конкретные рекомендации по проектированию промышленных устройств очистки жидких проводящих сред.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, углубляют понимание механизмов генерации течений в жидких металлах и развивают измерительные методики, что открывает дорогу к дальнейшим исследованиям.

Результаты, изложенные в первых двух главах, могут быть востребованы в технике для оптимизации процессов перемешивания и кристаллизации металлов с целью снижения энергозатрат и повышения качества отливок. Материал третьей главы может оказаться востребованным в металлургии цветных металлов и полупроводников для задач очистки электропроводных расплавов от химических примесей, в частности, в задачах вторичной переработки металлолома и отходов металлургического производства.

Методология и методы исследования. Основным подходом исследования, используемым в диссертации, является физический эксперимент. Все измерения проводились при помощи современных техник и оборудования. Перед началом исследований проводилась апробация конкретных методов измерений и алгоритмов обработки данных на тестовых задачах. Разрабатывались процедуры, обеспечивающие стабильность и надёжность получаемых данных в условиях влияния внешних факторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа систем акустического контакта между рабочей средой и измерительными элементами ультразвукового доплеровского анемометра и выполненной на его основе оптимизации системы измерений.
2. Модификация метода регистрации межфазной границы и полученные результаты измерений формы границы кристаллической фазы в процессе направленной кристаллизации металлического расплава.
3. Рекомендации по управлению структурой слитка за счёт модуляций питания линейного индукционного перемешивателя.

4. Результаты анализа эффективности очистки жидкой проводящей среды электромагнитными методами, показавшие что максимальная эффективность процесса сепарации достигается при умеренных расходах, умеренных силовых воздействиях и оптимальной конфигурации непроводящих перегородок, препятствующий формированию вторичных перемешивающих течений.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается тщательной разработкой экспериментальных методик, проведением контрольных опытов и согласием полученных результатов с данными известных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: IV Всероссийская конференции, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова. 2016. Пермь; XX Зимняя Школа по механике сплошных сред. 13–16 февраля 2017. Пермь; Международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах». 2017. Пермь; XXVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках». 2017. Пермь; III Russian Conference on Magnetohydrodynamics. 18–21 June 2017. Perm; III Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых. 10–16 сентября 2018. Ялта, Республика Крым; V Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения». 26–29 сентября 2018. Пермь; XXI Зимняя Школа по механике сплошных сред. 12-22 февраля 2019. Пермь.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 28 печатных работах, из них 6 в журналах, являющихся рецензируемыми научными изданиями, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук [1–6]; 3 статьи в журнале, индексируемом системой РИНЦ [7–9]; 4 статьи в сборниках трудов конференций [10–13] и 15 тезисов докладов [14–28].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Представленные в диссертации экспериментальные результаты получены преимущественно автором. Подготовка к публикации результатов работ [4, 10, 13] проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Постановка задач [1, 7, 10, 11], результаты исследования и их интерпретация обсуждалась с И.В. Колесниченко. Выполнение работ [3, 8, 9, 12] проводилось совместно с соавторами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 143 страницы, из них 126 страниц текста, включая 51 рисунок. Библиография включает 163 наименований на 17 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе рассматриваются вихревые течения в плоском слое жидкого металла, возникающие под действием локализованного в пространстве и переменного во времени магнитного поля.

Основным инструментом измерения скорости металла в работе является ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА), работа которого зависит от свойств стенки (толщина, плотность, скорость звука, скачок акустического сопротивления на границе с рабочей жидкостью), что потребовало отработки методики на тестовом течении, в качестве которого использовалось течение Пуазейля в трубе кругового сечения (рис. 1). Длина канала более чем в 40 раз превышает его диаметр, что позволяет рассчитывать на однородный по длине профиль продольной скорости. Ожидаемое увеличение амплитуды пульсаций скорости (обозначено на рисунке вертикальными линиями) объясняется расхождением ультразвукового луча и появлением дополнительной погрешности, связанной с частичным рассеянием эхо. Характеристикой качества является эффективная глубина измерений скорости L , равная максимальному расстоянию z , на котором относительная разница между значениями скорости, измеренными с помощью УДА $\bar{V}(z)$ и с помощью электромагнитного расходомера V_{flow} не превышает

$$|\bar{V}(z) - V_{flow}| / |V_{flow}| < k.$$

Для критерия достоверности измерений было принято $k = 0.1$.

Рис. 2 показывает зависимость параметра качества от длины и диаметра волновода. Наибольшая эффективная глубина измерения оказывается у волновода длиной $l = 26.8$ мм, что составляет 39λ (частота ультразвука 4 МГц). Диаметр волновода относительно слабо влияет на качество измерений при условии преодоления порога, при котором не происходит разрушения плоского фронта звуковой волны на границах волновода. На основе данных тестирования звукопроводящих стенок было решено для работ по исследованию структуры вих-

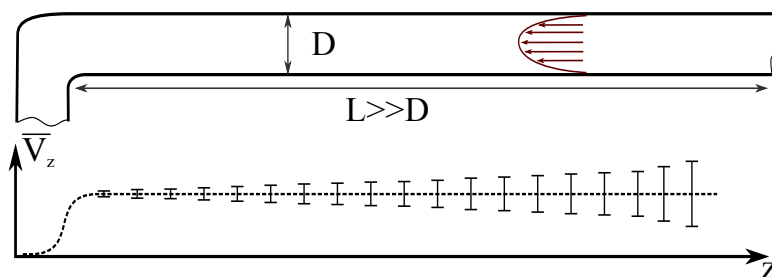


Рис. 1. Тестовое течение в трубе и ожидаемое распределение продольной скорости

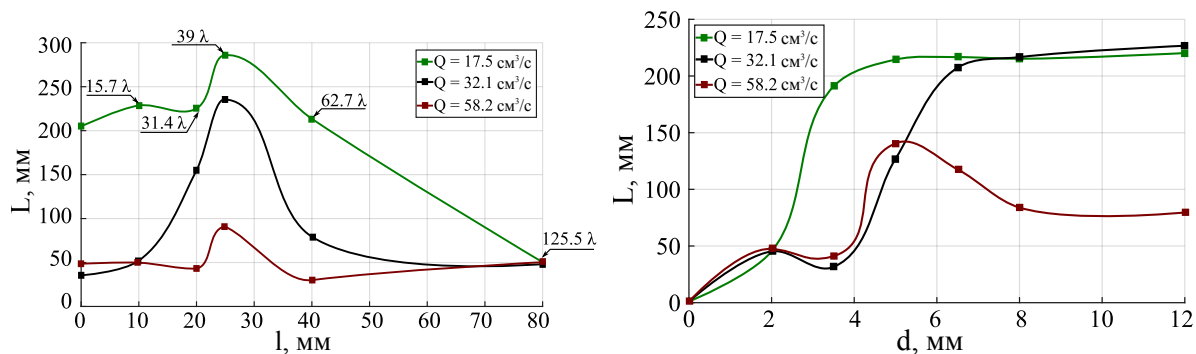


Рис. 2. Зависимость параметра качества измерений от длины волновода l (слева) и диаметра волновода d (справа).

ревых течений использовать ячейку из плексигласа с толщиной стенок 10 мм.

Экспериментальная установка (рис. 3) включает в себя кювету из органического стекла, заполненную жидким галлиевым сплавом, С-образный индуктор, сила тока в котором определяет интенсивность течений металла. Датчик УДА располагался на расстоянии 16 мм от края кюветы (при таком положении профиль скорости вдоль луча позволяет однозначно судить о структуре течения).

Показано, что локализованное в пространстве и переменное во времени магнитное поле генерирует в жидкой проводящей среде вихревые течения, причем структура поля электромагнитных сил схожа с распределением сил при электровихревом течении. Магнитопровод при этом оказывается некоторым аналогом токоподвода при ЭВТ. Такая аналогия позволяет моделировать течения электромагнитной природы в лабораторных условиях без использования высокоомощных источников питания.

Локализация источника электромагнитных сил вблизи края слоя электропроводящей жидкости приводит к возникновению в металле крупномасштабного течения с двухвихревой структурой. При размещении источника силового воздействия в центральной части слоя в жидкости возникает крупномасштабное четырёхвихревое течение, проявляющее колебательный характер. По мере

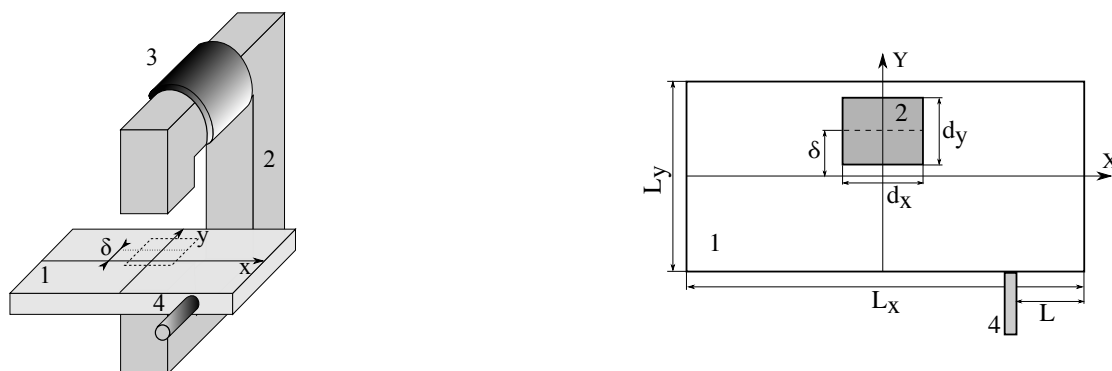


Рис. 3. Схема экспериментальной установки (слева – общий вид, справа – вид сверху): 1. кювета с жидким металлом, 2. С-образный индуктор, 3. катушки, 4. датчик УДА.

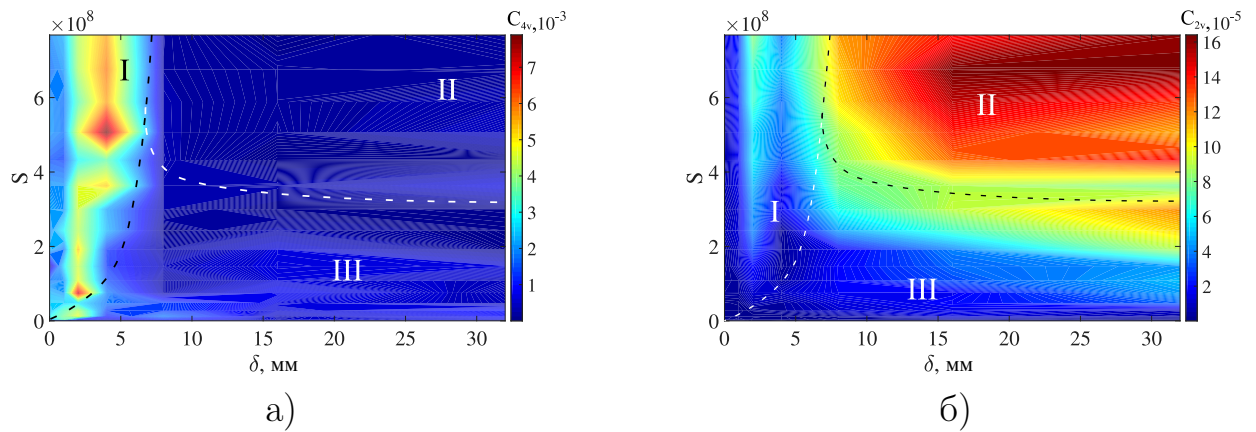


Рис. 4. Относительная интенсивность четырёхвихревой (а) и двухвихревой (б) мод течения на плоскости параметров $S - \delta$. Пунктирная линия разделяет области различных типов течений. В области I течение имеет преимущественно четырёхвихревую структуру, в области II – двухвихревую, в области III течение имеет структуру смешанного типа.

смещение области электромагнитного воздействия из центральной части слоя к его краю происходит перестройка структуры течения. Измеренные профили скорости демонстрируют смещение точки перегиба, что говорит об изменении размеров вихревых структур при изменении положения индуктора переменного поля. Постепенно происходит затухание пары вихрей и усиление двух других, пока течение асимптотически не достигает развитой двухвихревой структуры.

Построена карта режимов (рис. 4), разграничивающая области четырёхвихревого, двухвихревого течений и течения смешанного типа на плоскости параметра силового воздействия $S = dhB^2 / \mu_0 \rho \nu^2$ и смещения δ области действия переменного магнитного поля от геометрического центра слоя жидкого металла (здесь d_z – высота слоя металла, h – толщина немагнитного зазора индуктора, B_0 – амплитудное значение магнитной индукции в зазоре, μ_0 – магнитная постоянная, ρ – плотность металла, ν – кинематическая вязкость). Для каждого режима найдены характеристики энергии осреднённого и пульсационного течения (рис. 5), а также спектральные характеристики: доминирующая частота и

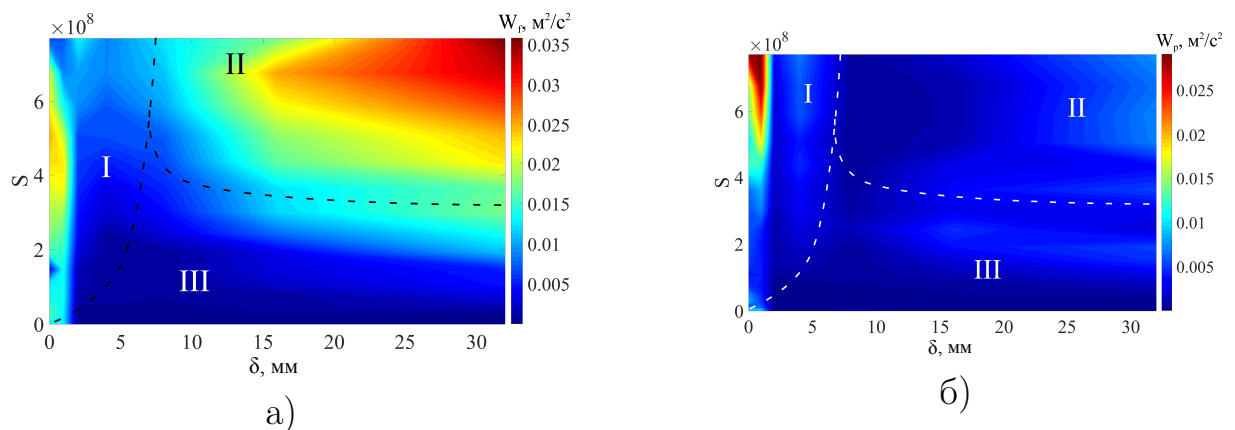


Рис. 5. Средней (а) и пульсационная (б) кинетическая энергия на плоскости параметров $S - \delta$. Пунктирная линия разделяет области различных типов течений.

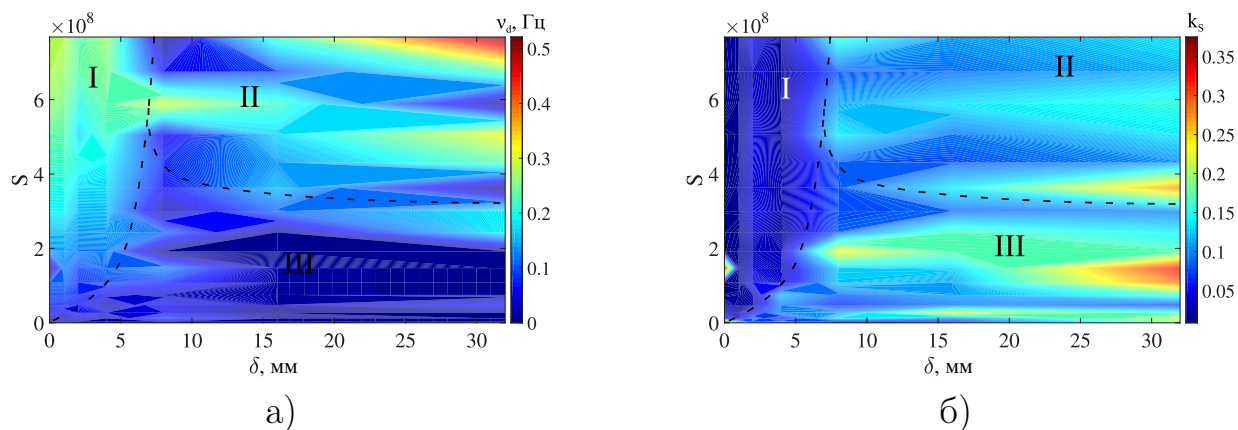


Рис. 6. Выделенной частота колебаний скорости ν_d (а) и коэффициент заполнения спектра k_s (б) на плоскости параметров $S - \delta$. Пунктирная линия разделяет области различных типов течений.

уровень заполнения спектра (рис. 6). Четырёхвихревое течение характеризуется регулярными колебаниями скорости, по закону близкому к гармоническому. Характерная частота пульсаций скорости составляет 0.33 Гц. Двухвихревое течение является стационарным в том смысле, что основная энергия течения заключена в осреднённой составляющей. Течение смешанного типа реализуется при относительно малых величинах силового воздействия и больших смещениях области силового воздействия от центра слоя жидкого металла. Данный тип течения характеризуется нерегулярными пульсациями скорости, сопоставимыми по величине с осреднённой составляющей течения.

Результаты первой главы опубликованы в работах [2, 4, 7, 9, 10].

Во второй главе рассматривается возможность управления формой фронта кристаллизации при направленном затвердевании металла посредством низкочастотных модуляций питания линейного индукционного перемешивателя бегущего магнитного поля.

Управление скоростью и процессом кристаллизации посредством изменения параметров питания технологической установки (перемешивателя) становится возможным за счет цепочки взаимосвязанных процессов: энергоснабжение \rightarrow электромагнитное поле \rightarrow течение жидкого металла \rightarrow теплообмен \rightarrow форма фронта кристаллизации [29–32].

Размеры рабочего канала (рис. 7) $450 \times 20 \times 75$ мм³. Узкие стенки канала оборудованы медными теплообменниками. Канал размещается на линейной индукционной машине (ЛИМ) бегущего магнитного поля (БМП) размерами 480×350 мм². Питание катушек осуществляется от трёхфазного программируемого источника тока, позволяющего задавать форму выходного сигнала и осуществлять модуляцию бегущего магнитного поля.

Положение фронта кристаллизации определяется при помощи УДА по уровню отраженного ультразвукового сигнала. На межфазной границе (жидкость/твёрдое тело) значительная часть ультразвуковых волн претерпевает отражение. Это выражается в виде пика в сигнале эхо. Положение пика на коор-

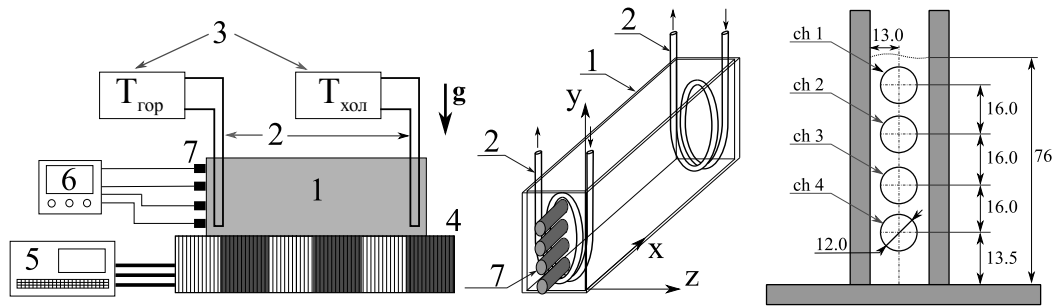


Рис. 7. Схема экспериментальной установки: 1. канал, заполненный жидким металлом, 2. теплообменники, 3. криотермостаты, 4. ЛИМ, 5. источник питания, 6. УДА, 7. датчики УДА.

динатной оси соответствует положению фронта кристаллизации.

Был разработан и протестирован алгоритм анализа профилей ультразвукового эхо. Точность локализации плоской поверхности составила 4% при смещении границы раздела фаз в пределах 50 мм. Неровность границы раздела фаз при кристаллизации увеличивает погрешность за счет дополнительного рассеяния ультразвука на шероховатой поверхности кристаллической фазы.

БМП порождает в жидкости двухвихревое течение. Большой вихрь занимает центральную область кюветы. В пристеночной области образуется меньший вихрь (рис. 8а, в). Его образование связано с ускорением жидкости по мере движения над плоскостью индуктора и изгибом линий тока на торцевой стенке кюветы. Скорость жидкости в малом вихре несколько выше, чем скорость центрального. С увеличением интенсивности внешнего воздействия энергия вих-

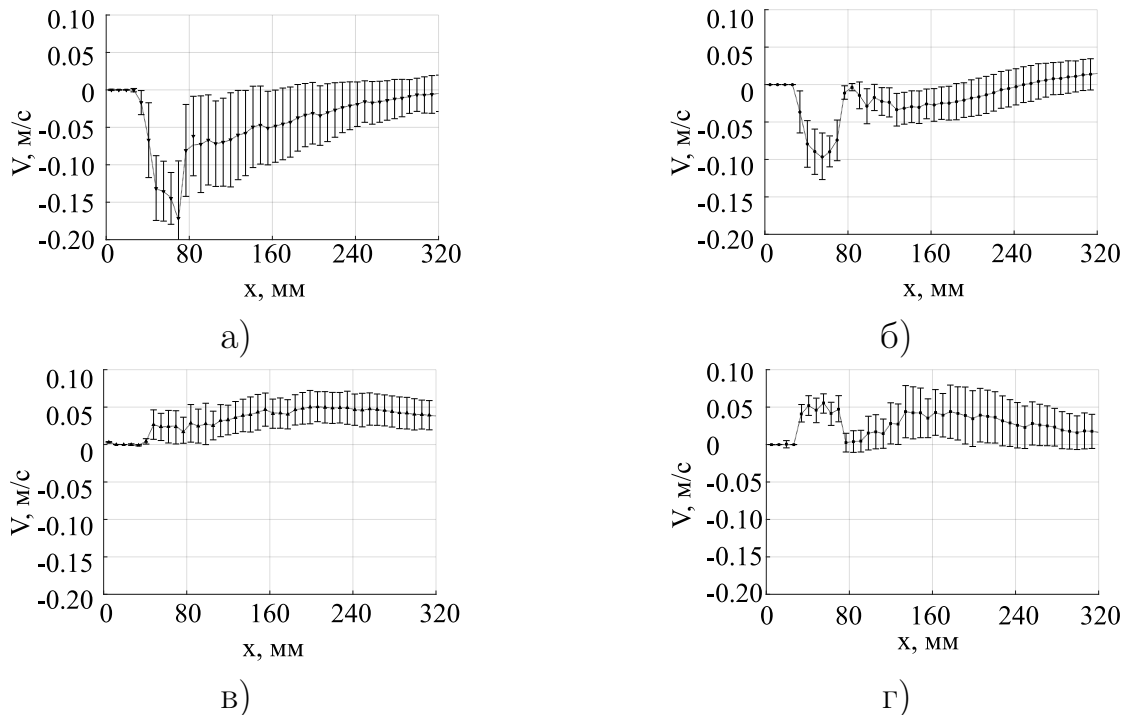


Рис. 8. Средние по времени профили скорости течения в нескольких сечениях по высоте слоя: а) 14 мм, б) 30 мм, в) 46 мм, г) 62 мм.

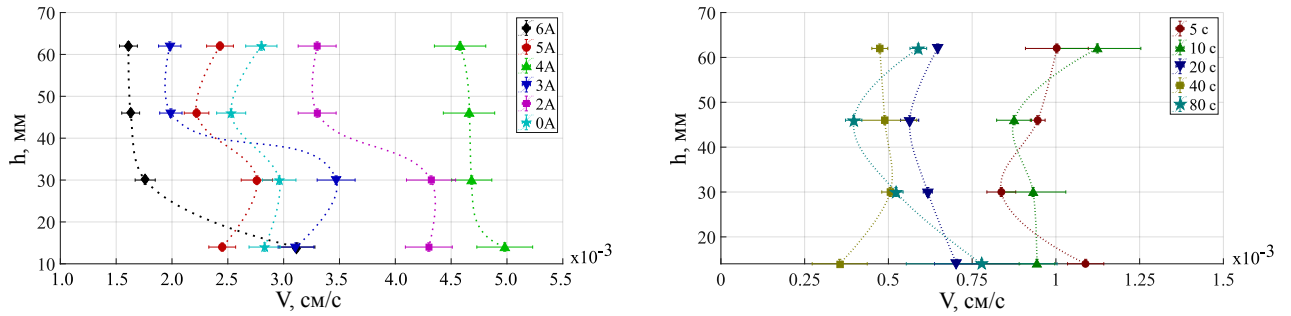


Рис. 9. Распределение скорости движения фронта кристаллизации по высоте слоя для разных значений: а) силы тока, б) периодов реверсной модуляции БМП.

рей увеличивается, что приводит к искажению свободной границы металла в области локализации вихрей. При наложении низкочастотных модуляций пространственная структура вихрей остаётся неизменной. Тем не менее, временные характеристики течения изменяются в соответствии с модуляцией вынуждающей силы.

В качестве основных характеристик эффективности перемешивания жидкого металла были выбраны среднее $Re_{ср}$ и пульсационное $Re_{пульс}$ числа Рейнольдса, рассчитанные по максимуму средней и пульсационной составляющих x -компоненты скорости, толщине слоя и кинематической вязкости сплава. Усиление магнитного поля приводит к нелинейному росту скорости течения с выходом на участок насыщения, начиная с токов питания индуктора 5 А. При этом как среднее так, и пульсационное числа Рейнольдса достигают своего максимума. Наличие участка насыщения говорит о неэффективности управления перемешиванием жидкого металла только за счет увеличения электрической мощности индукционной машины.

Увеличение периода модуляции приводит к уменьшению $Re_{ср}$ и росту $Re_{пульс}$. Наибольшая интенсивность гидродинамических пульсаций наблюдается в области локализации крупномасштабного вихря (вблизи дна слоя и свободной поверхности). Эти пульсации повторяют форму модуляций электромагнитного поля и представляют собой низкочастотное квазистационарное течение, на фоне которого возникают вторичные мелкомасштабные структуры.

Рассмотрены четыре режима кристаллизации. В первом режиме процесс кристаллизации металла происходил без перемешивания. Возникающее под действием перепада температуры адвективное течение имело малую интенсивность (максимальная скорость потока не превышала $5 \cdot 10^{-3}$ м/с). Во втором режиме жидкий металл перемешивался принудительно постоянно приложенным БМП. В режиме реверсной модуляции направление БМП изменялось периодически. В последнем режиме направление БМП было постоянным, но его величина изменялась по периодическому закону. При каждом из режимов принудительного перемешивания скорость течения жидкого металла была порядка 10^{-1} м/с. На рис. 9 приведены профили скорости движения фронта кристаллизации по высоте слоя при различных режимах генерации течения в жидкой фазе.

В отсутствие принудительного перемешивания подвод тепла к границе раздела фаз осуществляется за счет малоинтенсивной естественной тепловой конвекции. Наложение внешнего БМП приводит к значительному усилению течения. Это обеспечивает сглаживание формы фронта кристаллизации за счет выравнивания распределения тепловой энергии по высоте слоя. Модуляция БМП оказывает дополнительное влияние на сглаживание фронта кристаллизации благодаря изменению скорости и структуры течения в жидкой фазе. Периодическая подкачка нагретой жидкости оказывает положительное влияние на выравнивание границы раздела фаз. Были найдены зависимости эффективности уплощения фронта кристаллизации от способа энергопитания индуктора БМП, а также предложен физический механизм, объясняющий наблюдаемые изменения в поведении системы.

Результаты второй главы опубликованы в работе [1, 3, 11–13].

В третьей главе рассматривается процесс электромагнитного разделения фаз различной электропроводности. Целью исследования является изучение общих тенденций и закономерностей разделения фаз в многокомпонентной проводящей жидкости от параметров (в том числе силовых) процесса.

Экспериментальная установка включает сепарационный плексигласовый канал, помещенный между полюсами электромагнита. На вход канала подаётся раствор электролита. После канала жидкость по трубопроводу поступает в расходомерную и измерительную ячейки. Подсветка измерительной ячейки осуществляется светодиодным источником света, рассеянного через матовые стекла. Расход жидкости в системе задаётся положением регулирующих вентилях и определяется УДА.

Процесс сепарации реализуется в канале (рис. 10), который представляет собой плоскую прямоугольную кювету 1 с рядом подвижных перегородок 2, задерживающих сепарированную примесь в области 3, с двумя медными электродами 4 для пропускания тока вдоль кюветы, а также с выравнивателями

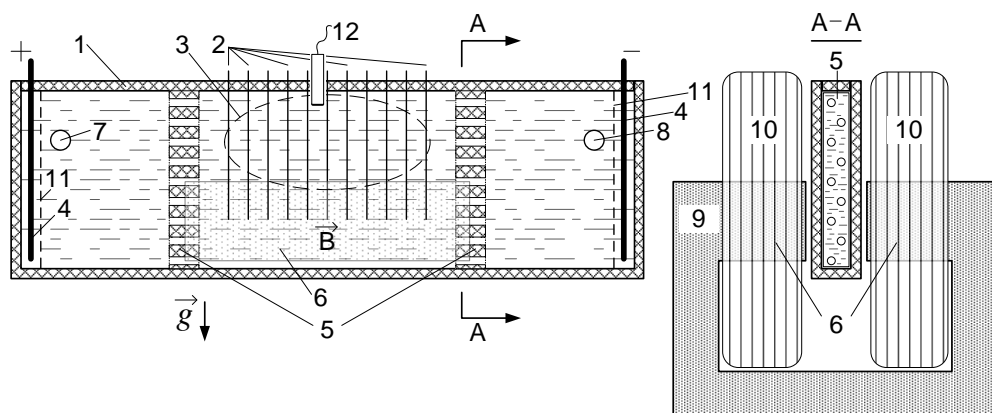


Рис. 10. Схема сепарационного канала установки: 1. сепарационный канал, 2. подвижные перегородки, 3. область действия электромагнитных сил, 4. медные электроды, 5. выравниватели потока, 6. полюса электромагнита, 7. входной штуцер, 8. выходной штуцер, 9. магнитопровод, 10. катушки электромагнита, 11. приэлектродные сетки, 12. датчик УДА.

потока 5. Сепарационный канал располагается между полюсами электромагнита 6. Вертикальные перегородки 2 выполнены из проводящего электрический ток материала. В канал жидкость поступает через штуцер 7, а выходит через аналогичный штуцер 8. Выравниватели потока 5 установлены в местах расположения краев сердечника электромагнита для предотвращения образования вихрей под действием неоднородного в этой области магнитного поля. Электрический ток, проходя через электролит, взаимодействует с внешним постоянным магнитным полем создаваемым электромагнитом, состоящим из ферромагнитного магнитопровода 9 и двух катушек 10. Электрический ток пропускается через электролит таким образом, чтобы обеспечить квазиутяжеление раствора. Всплывшие частицы примеси задерживаются между перегородками 2 в области 3. В области размещения электродов дополнительно устанавливаются вертикальные сетки 11 из непроводящего материала, задерживающие пузырьки газа, образующиеся на электродах в процессе электролиза. Отсутствие таких сеток приводит к попаданию большого количества пузырьков в зону сепарации и снижает её эффективность. Дополнительный контроль за вторичными течениями в вертикальной плоскости канала осуществлялся при помощи датчика УДА 12. Датчик располагался вертикально между двумя удерживающими перегородками 2. Питание электромагнита осуществлялось источником постоянного тока. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор калийной щелочи. Примесью служили карбоновые частицы размером от 10 до 300 мкм.

Концентрация примеси определялась методом фотосъёмки слоя жидкости с примесью. Фотоячейка представляла собой U-образный каркас из плексигласа, с каналами в нижней части, обеспечивающими проточное течение электролита. С широких сторон жидкость была ограничена стенками из расположенных параллельно друг другу кремниевых стекол. Верхняя поверхность была свободной, обеспечивая возможность удаления пузырьков газа, образовавшихся при электролизе и затянутых в измерительную ячейку проточным течением.

Из фотографии вырезалась центральная квадратная область, которая из полноцветного RGB конвертировалась в двумерный бинарный массив. После обработки изображения использовались два метода анализа. В первом случае подсчитывалось общее количество примеси (единичных значений, отвечающих наличию частиц, на нулевом фоне). Концентрация находилась по относительному уровню затемнения изображения. Во втором случае проводился фракционный анализ изменения концентрации: в бинарном изображении находились положения отдельных частиц примеси, подсчитывался их размер и положение.

В данной главе исследовалась эффективность процесса сепарации примеси в зависимости от величины приложенной электромагнитной силы, скорости транзитного течения через сепарационный канал, положения задерживающих перегородок, типа верхней поверхности электролита в канале и угла наклона канала к направлению силы тяжести. Установлено, что повышение интенсивности силового воздействия снижает эффективность процесса за счёт генерации вторичных вихревых течений в области действия сил. Эффективность процесса

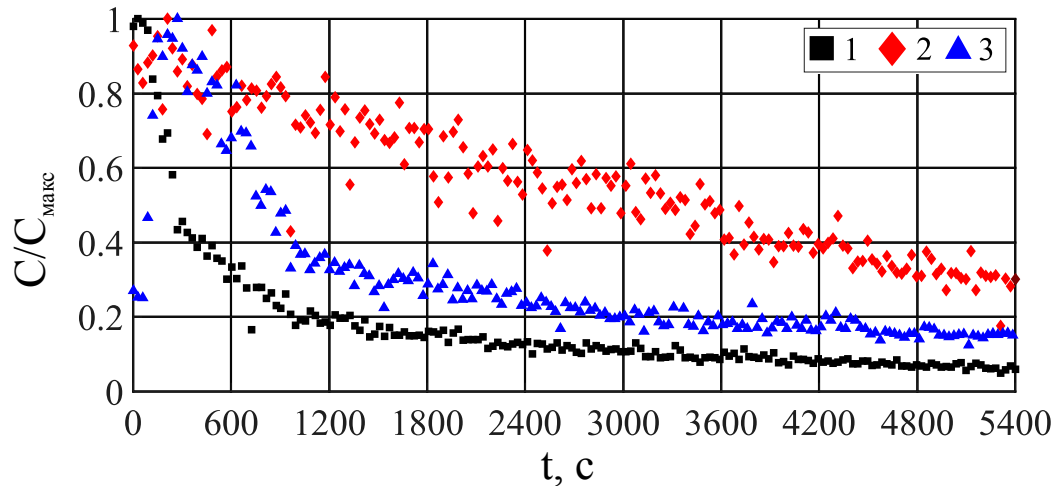


Рис. 11. Изменение концентрации карбоновых частиц в щелочи в процессе сепарации при различных значениях внешнего магнитного поля B : 1. $B = 0.235$ Тл, 2. $B = 0.465$ Тл, 3. $B = 0.695$ Тл.

разделения фаз значительно снижается при повышении скорости транзитного течения через область силового воздействия. При этом поток остаётся ламинарным даже при наибольших рассматривавшихся в работе расходах жидкости (максимальное число Рейнольдса 1600). Наличие непроницаемых для потока перегородок в сепарационном канале не оказывает влияния на эффективность разделения фаз, при условии что расположение перегородок не приводит в генерации дополнительных вторичных течений. При размещении перегородок таким образом, что они отсекают половину высоты канала, возникающие в жидкости вихревые течения снижают общую эффективность процесса разделения фаз за счёт перемешивания дисперсной среды. Эффективность процесса разделения

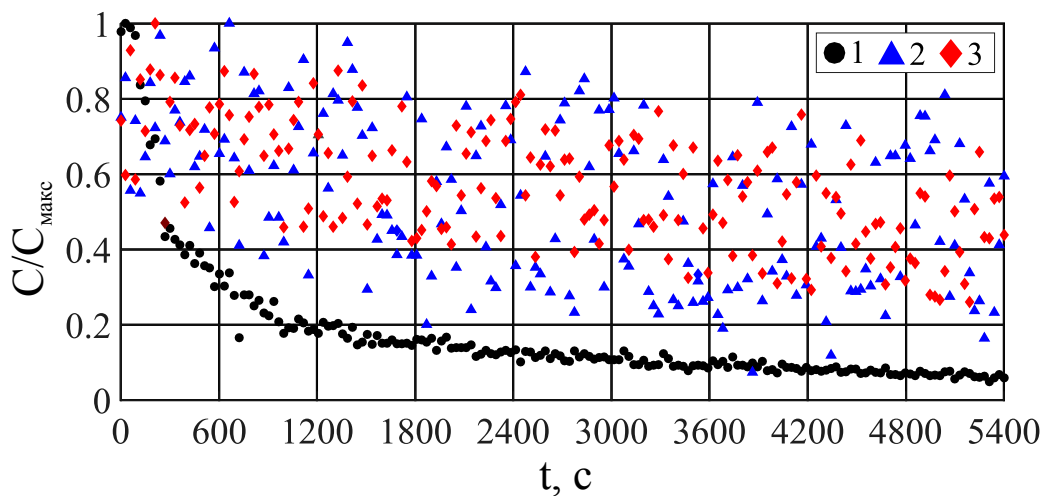


Рис. 12. Относительное изменение концентрации карбоновых частиц в щелочи в процессе сепарации при различных расходах Q в системе прокачки жидкости: 1.- $Q = 5.88 \cdot 10^{-6}$ м³/с, 2. $Q = 10.4 \cdot 10^{-6}$ м³/с, 3. $Q = 14.9 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

фаз повышается при наличии свободной верхней границы жидкости в области силового электромагнитного воздействия. По-видимому, это связано с аккумуляцией примеси на свободной границе жидкости за счёт сил поверхностного натяжения. Установка несмачиваемой верхней границы снижает эффективность процесса разделения фаз приблизительно на 10%. Наклон сепарационного канала на небольшой угол к направлению силы тяжести положительно сказывается на эффективности процесса разделения фаз. Установлено, что наклон канала на 4.6° к вертикали повышает эффективность процесса приблизительно на 4%.

Результаты третьей главы опубликованы в работе [5, 6, 8].

В Заключение подводятся итоги диссертационной работы.

1) Выполнен детальный анализ влияния на точность измерений скорости и положения фронта кристаллизации металлического расплава при помощи ультразвуковой доплеровской анемометрии таких факторов, как толщина и свойства материала стенок экспериментальной ячейки и волноводов, изменение тепловых свойств жидкости и рассеяния ультразвуковых пакетов на границах раздела фаз. Разработаны методики измерений скорости и положения фронта кристаллизации металлического расплава, адаптированные к условиям конкретных МГД-экспериментов.

2) На плоскости управляющих параметров построена карта режимов вихревых течений, возникающих в плоском слое жидкого металла под действием локализованного в пространстве переменного во времени магнитного поля. В качестве управляющих параметров выступают параметры, определяющие интенсивность силового воздействия и положение области действия магнитного поля. Найдены границы существования мод, соответствующих двухвихревому и четырёхвихревому течениям, а также спектральные характеристики пульсаций скорости в указанных режимах. Четырёхвихревое течение оказывается существенно нестационарным, с доминирующей частотой пульсаций в диапазоне 0.2 – 0.35 Гц, возрастающей с увеличением интенсивности внешнего воздействия. Двухвихревое течение стационарно и становится неустойчивым при максимальных рассмотренных величинах силового воздействия. Возникающие колебания вихрей происходят с частотой порядка 0.5 Гц. Обнаружен режим смешанного типа, характеризующийся сравнительно низкой энергией течения и хаотичными пульсациями скорости. Повышение интенсивности магнитного поля приводит к переходу от этого режима к стационарному двухвихревому течению.

3) В лабораторном эксперименте доказана возможность управления формой фронта кристаллизации при направленном затвердевании слитка посредством модуляции питания линейного индукционного перемешивателя. Установлено, что увеличение силы тока питания перемешивателя сверх критических значений является неэффективным для усиления перемешивания жидкого металла, в силу наличия участка насыщения в зависимости средней и пульсационной составляющих энергии течения от силы тока. Низкочастотные модуляции питания изменяют структуру генерируемых в жидком металле течений и

повышают энергию пульсационной составляющей потока, что приводит к сглаживанию фронта кристаллизации. Экспериментально показано, что изменение частоты и типа модуляций питания позволяет управлять формой фронта кристаллизации. Наибольший эффект сглаживания фронта достигнут при гармонической модуляции тока питания силой 4.0 А с периодом модуляции 20 с.

4) Экспериментальное исследование процесса очистки электропроводящей жидкости от твёрдых включений отличной электропроводности электромагнитным методом в полости комплексной геометрии показало, что максимальная эффективность процесса очистки достигается при умеренных магнитных полях. Наличие транзитного течения жидкости через область действия электромагнитных сил снижает эффективность процесса, но повышает технологичность метода. Наличие дополнительных перегородок относительно слабо влияет на эффективность очистки, однако помогает предотвратить возникновение вторичных вихрей в жидкости. Кроме того, желательным для повышения эффективности очистки является наличие свободной поверхности жидкости, поскольку примесные частицы удерживаются на ней посредством поверхностного натяжения.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Полученные сведения о влиянии массовых потоков позволяют оптимизировать технологический процесс перемешивания металла в ходе кристаллизации за счет изменения режимов питания перемешивателей.

Дальнейшее развитие методов электромагнитной очистки жидких проводящих сред должно выполняться с использованием легкоплавких жидких металлов, для исключения влияния электрохимических факторов свойственных электролитическим растворам.

Список публикаций

1. Losev G., Kolesnichenko I. Solidification front shape control through modulating the traveling magnetic field // *Journal of Crystal Growth*. 2019. Vol. 528. P. 125249. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024819304646>.
2. Losev G., Kolesnichenko I. Structure of MHD vortex flows in a thin layer of liquid metal // *Magnetohydrodynamics*. 2019. Vol. 55, no. 1-2. P. 97–106. URL: <https://doi.org/10.22364/mhd.55.1-2.12>.
3. Losev G., Shvydkiy E., Sokolov I., Pavlinov A., Kolesnichenko I. Effective stirring of liquid metal by a modulated travelling magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 2019. Vol. 55, no. 1–2. P. 107–114. URL: <https://doi.org/10.22364/mhd.55.1-2.13>.
4. Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic doppler velocimetry // *Flow Measure-*

- ment and Instrumentation. 2020. Vol. 75. P. 101786. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598620301291>.
5. Losev G., Mamykin A., Kolesnichenko I. Electromagnetic separation: concentration measurements // *Magnetohydrodynamics*. 2019. Vol. 55, no. 1-2. P. 89–96. URL: <https://doi.org/10.22364/mhd.55.1-2.11>.
 6. Losev G., Mamykin A., Kolesnichenko I. Model of electromagnetic purification of liquid metal // *Magnetohydrodynamics*. 2021. Vol. 57, no. 1. P. 73–84. URL: <https://doi.org/10.22364/mhd.57.1.4>.
 7. Лосев Г.Л., Халилов Р.И., Колесниченко И.В. Экспериментальное исследование характеристик течения жидкого металла, вызванного переменным магнитным полем // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2017. Т. 38, № 4. С. 11–18. URL: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2017-4-11-18>.
 8. Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Колесниченко И.В. Воздействие электромагнитных сил на двухфазную среду // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2018. Т. 39, № 1. С. 46–53. URL: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2018-1-46-53>.
 9. Мандрыкин С. Д., Колесниченко И. В., Лосев Г. Л., Фрик П. Г. Электровихревое течение жидкого металла в цилиндрическом канале // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2018. Т. 40, № 2. С. 20–27. URL: <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2018-2-20-27>.
 10. Losev G, Khalilov R, Kolesnichenko I. UDV study of a liquid metal vortex flow // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 208. P. 012022. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/208/1/012022>.
 11. Losev G L, Kolesnichenko I V, Khalilov R I. Control of the metal crystallization process by the modulated traveling magnetic field // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1128. P. 012051. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1128/1/012051>.
 12. Shvydkiy E., Kolesnichenko I., Khalilov R., Pavlinov A., Losev G. Effect of travelling magnetic field inductor characteristics on the liquid metal flow in a rectangular cell // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 424. P. 012012. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/424/1/012012>.
 13. Losev G, Pavlinov A, Shvydkiy E, Sokolov I, Kolesnichenko I. Stirring flow of liquid metal generating by low-frequency modulated traveling magnetic field in rectangular cell // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 581. P. 012005. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/581/1/012005>.
 14. Колесниченко И.В., Лосев Г.Л., Халилов Р.И. Спектральные и энергетические характеристики электровихревого течения // *Материалы IV Всероссийской конференции, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова*. Пермь. 2016. С. 47–48.
 15. Лосев Г.Л., Колесниченко И.В., Халилов Р.И. Особенности исследования

- вихревого течения эвтектики GaZnSn с помощью ультразвукового доплеровского анемометра // Тезисы докладов XX Зимней Школы по механике сплошных сред. Пермь, 13-16 февраля. 2017. С. 200.
16. Колесниченко И.В., Лосев Г.Л., Халилов Р.И. Вихревое течение галлиевого сплава под действием внешнего магнитного поля // Материалы международного симпозиума «Неравновесные процессы в сплошных средах». Пермь. Т. 1. 2017. С. 249–251.
 17. Лосев Г.Л., Халилов Р.И., Колесниченко И.В. Пульсации вихревого течения проводящей жидкости // Материалы XXVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках». 2017. С. 312–316.
 18. А.Д. Мамыкин, И.В. Колесниченко, Г.Л. Лосев, Р.И. Халилов. Экспериментальное исследование эволюции двухфазной электропроводной среды в процессе воздействия на нее электромагнитных сил // Тезисы докладов XX Зимней Школы по механике сплошных сред. Пермь, 13-16 февраля. 2017. С. 210.
 19. Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Колесниченко И.В. Воздействие электромагнитных сил на двухфазную среду // Материалы XXVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках». 2017. С. 316–321.
 20. Losev G., Khalilov R., Kolesnichenko I. Energy and spectral characteristics of MHD vortex flow // Book of abstracts III Russian Conference on Magnetohydrodynamics, Perm, 18 – 21 June. 2018. P. 77.
 21. Mandrykin S., Kolesnichenko I., Losev G., Frick P. Experimental study of the electrovortex flow generated by opposing point electrodes in a vertical cylindrical cell // Book of abstracts III Russian Conference on Magnetohydrodynamics, Perm, 18 – 21 June. 2018. P. 83.
 22. G. Losev, A. Philimonov, A. Pavlinov, I. Kolesnichenko. Vortex flow of liquid metal under the influence of modulated magnetic field // Book of abstracts III Russian Conference on Magnetohydrodynamics, Perm, 18 – 21 June. 2018. P. 78.
 23. Лосев Г. Л., Колесниченко И. В., Халилов Р. И. Управление процессом кристаллизации металла модулированным бегущим магнитным полем // Тезисы докладов III Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, Ялта, Республика Крым, 10-16 сентября. 2018. С. 96.
 24. Лосев Г.Л., Швыдкий Е.Л., Ельтищев В.А., Филимонов А.М., Колесниченко И.В. Генерация течения в жидком металле модулированным бегущим магнитным полем // Тезисы V-ой всероссийской конференции «Пермские гидродинамические научные чтения», Пермь, 26-29 сентбря. 2018. С. 174–176.
 25. Лосев Г.Л., Павлинов А.М., Колесниченко И.В. Влияние низкочастотных модуляций переменного магнитного поля на МГД-течение // Тезисы докла-

- дов XXI Зимней Школы по механике сплошных сред, Пермь, 12-22 февраля. 2019. С. 180.
26. Мамыкин А., Losev G., Kolesnichenko I. Impact on impurities in a flat mhd duct // Book of abstracts III Russian Conference on Magnetohydrodynamics, Perm, 18 – 21 June. 2018. P. 82.
27. Соколов И.В., Швыдкий Е.Л., Лосев Г.Л. Влияние несимметричного питания индуктора бегущего поля на поток жидкого металла // Тезисы докладов XXI Зимней Школы по механике сплошных сред, Пермь, 12-22 февраля. 2019. С. 279.
28. И.В. Колесниченко, Г.Л. Лосев, Р.И. Халилов, А.М. Павлинов. Применение ультразвукового доплеровского анемометра при исследовании кристаллизации жидкого металла, находящегося под действием электромагнитных сил // , 2019. с. 96. // Тезисы VIII Международной конференции «Кристаллизация : компьютерные модели, эксперимент, технологии». Ижевск. 12 апреля. 2019. С. 197.

Цитированная литература

29. Avnaim M.H., Mikhailovich B., Azulay A., Levy A. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 1: Liquid metal flow under the TMF impact // [International Journal of Heat and Fluid Flow](#). 2018. Vol. 69. P. 23 – 32.
30. Avnaim M.H., Mikhailovich B., Azulay A., Levy A. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 2: Acting forces ratio and solidification parameters // [International Journal of Heat and Fluid Flow](#). 2018. Vol. 69. P. 9 – 22.
31. Wang X., Moreau R., J Etay, Fautrelle Y. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part i. experiments with gainsn // [Metall. Mater. Trans. B](#). 2008. Vol. 40. P. 82.
32. Wang X., Moreau R., Etay J., Fautrelle Y. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part II. Theoretical model // [Metall. Mater. Trans. B](#). 2009. Vol. 40. P. 104–113.