

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. Ячикова Игоря Михайловича на диссертационную работу **Лосева Геннадия Леонидовича**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы», на тему: «Измерения характеристик и контроль МГД-процессов»

В металлургической промышленности достаточно широко распространены различные технологии с использованием больших электрических токов, протекающих через ванну расплава. Типичными примерами являются выплавка металлов в дуговых и плазменных печах, установки электрошлакового и вакуумно-дугового переплава, рудотермические и рудовосстановительные печи, электролизеры для получения алюминия и магния.

Все металлургические технологии, использующие токонесущие расплавы, как правило, связаны с проведением физико-химических процессов и получением однородного продукта. Отсюда для различных технологий большую роль играет перемешивание расплава в ванне, например для выплавки высококачественных металлов и сплавов.

Электромагнитное 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.

Электромагнитное перемешивание применяют в кристаллизаторах сортовых МНЛЗ для повышения структурной и химической однородности металла, увеличения марочника разливаемых сталей и расширения сортамента слитков, в электродуговой плавке металлов и сплавов – для получения однородных физико-химических свойств выплавляемого металла.

Среди приложений МГД-технологий можно отметить устройства для транспортировки, дозирования, рафинирования металлов и получения и обогащения металлов из руд. Необходимо отметить, что теоретические и многие практические аспекты поведения расплава в жидкометаллической ванне при МГД-процессах остаются малоизученными. Отсутствует теоретическое понимание механизмов развития гидродинамических вихревых структур, часто нет обоснованных способов управления ими и практических рекомендаций для промышленного применения. Все перечисленные проблемы приводят к сдерживанию развития МГД-технологий в различных отраслях металлургии. Отсюда работа Г.Л. Лосева по изучению механизмов ряда сложных термогидродинамических, а также МГД процессов, несомненно, является актуальной.

Перечень поставленных в работе задач и полученных результатов

соответствует шифру выбранной научной специальности 1.1.9 (01.02.05) «Механика жидкости, газа и плазмы», в частности, по пунктам:

1. Движение текучих сред в каналах и при внешнем обтекании тел, в том числе течения со свободной поверхностью (пленочные, струйные, капельные).
2. Течения в гравитационном и электромагнитном полях, включая свободную конвекцию.

Диссертационная работа Г.Л. Лосева состоит из введения, обзора литературы, трех глав и заключения. Она изложена на 143 страницах машинописного текста, включает в себя 51 рисунок и библиографический список из 163 наименований на 17 страницах.

В обзоре литературы (стр. 9–42) показаны задачи магнитной гидродинамики жидких металлов. Рассмотрены критерии. Приведен обзор существующих методов измерения скорости в жидких металлах: кросскорреляционные, электромагнитные, кондукционные, индукционные и ультразвуковые. Приведены некоторые способы измерения физических свойств жидких металлов. Показаны актуальность и важность для практических приложений изучения вихревых течений жидких металлов, основные уравнения движения электропроводящей жидкости при наличии электромагнитной силы и основные безразмерные параметры.

В первой главе "*Вихревые течения в плоских слоях жидких металлов*" (стр. 43–79) в качестве инструмента для исследования структуры вихревых течений выбран ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА). Рассмотрено влияние физических параметров звукопроводящей стенки на качество измерений. Оно проводилось на тестовой установке с возможностью монтирования волноводов различной геометрической формы. В качестве жидкого металла использовался сплав галлия. Получены экспериментальные профили скорости набегающего на измерительную систему потока жидкого металла при разном его расходе, при использовании волноводов из различного материала, различной длины и диаметра, а также при непосредственном контакте датчика с металлом. На основе проведенного анализа полученных данных установлено, что на качество измерений на глубине до 100 мм не оказывает влияние волновод из органического стекла толщиной не более 10 мм. Показано, что применение волноводов с диаметром меньшим, чем датчик УДА, дает возможность сфокусировать ультразвуковой луч, что позволяет проводить измерения на большей глубине при той же скорости потока.

Дано описание экспериментальной установки для исследования течения в плоском слое жидкого металла. Рассмотрена структура плоского четырехвихревого крупномасштабного течения при размещении магнитопровода в центральной части слоя металла, проявляющего выраженный колебательный характер. Приведены средние профили скорости вихревого течения при смещении области электромагнитного воздействия к

краю кюветы, что приводит к перестройке структуры течения. Происходит постепенное затухание пары вихрей и усиление двух других, пока течение металла не достигает развитой двухвихревой структуры. Наиболее интересным является построение карты режимов и разграничение режимов от силового воздействия и смещения магнитопровода.

Во второй главе "*Вихревые течения в условиях фазового перехода*" (стр. 80–106) дано описание экспериментальной установки для исследования вихревого течения и фронта кристаллизации. Приведен метод измерения с высокой точностью локализации положения твердой фазы металла в процессе формирования корочки. Рассматривается возможность управления формой фронта кристаллизации при направленном затвердевании металла посредством низкочастотных модуляций тока линейного индукционного перемешивателя бегущего магнитного поля. Диссертант показал, что низкочастотная модуляция бегущего магнитного поля (БМП) оказывает существенное влияние на характер течений, не меняя при этом пространственную структуру вихрей, в частности появляются дополнительные пульсации скорости, кроме этого, меняя частоту пульсаций (период амплитудной модуляции) можно управлять средними скоростями течения. Положение фронта кристаллизации определяется при помощи УДА по уровню отраженного ультразвукового сигнала. Разработан и протестирован алгоритм анализа профилей ультразвукового эхо. Были рассмотрены четыре режима кристаллизации. БМП приводит к появлению интенсивного течения, что обеспечивает сглаживание формы фронта кристаллизации за счет выравнивания температуры жидкого металла по высоте слоя. Установлено также, что модуляция БМП оказывает дополнительное влияние на сглаживание фронта кристаллизации благодаря подбору рациональной скорости и структуры течения в жидкой фазе вблизи кристаллизующегося слоя. Пульсации жидкости оказывают положительное влияние на выравнивание границы раздела фаз. Найдены зависимости эффективности выравнивания (уплощение) фронта кристаллизации от способа энергопитания индуктора БМП, а также предложен физический механизм, объясняющий наблюдаемые изменения в поведении системы.

В третьей главе "*МГД-очистка проводящих сред*" (стр. 107 -123) рассматривается МГД-очистка металлов. Основная проблема связана с выбором наилучшей конструкции блока сепарации и конфигурации электромагнитных сил. Целью является изучение общих тенденций и закономерностей разделения фаз в многокомпонентной проводящей жидкости от параметров (в том числе силовых) процесса. Дано описание экспериментальной установки для исследования МГД разделения карбоновых частиц в растворе щелочи. УДА был использован для измерения концентрации примесных частиц в жидкой среде, что позволило измерить концентрацию частиц определенного дисперсного состава, которые эффективно рассеивают ультразвук при определенной его частоте.

Проводился поиск режима, отвечающий наилучшему балансу между механизмами квазиутяжеления жидкости и генерации перемешивающих течений. Проведены экспериментальные исследования влияния внешнего магнитного поля, расхода электропроводящей жидкости, положения перегородок в сепарационном канале, типа верхней поверхности и угла наклона сепарационного канала. Проведен анализ и интерпретация полученных результатов.

В заключении приведены общие выводы и основные результаты всей работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обеспечивается использованием современных экспериментальных методов исследований с детальной проработкой методических вопросов, поверенной измерительной аппаратуры и тщательным анализом погрешности измерений, применением общепринятых методов обработки данных.

Достоверность полученных результатов обеспечивается, прежде всего за счет тщательной разработки экспериментальных методик, проведением контрольных опытов и согласием полученных результатов с данными известных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные научные положения и результаты диссертации обсуждались на представительном ряде научно-практических конференций с международным участием и международных конференциях, включая такие крупные научные мероприятия, как: Международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 2017 г.); III Russian Conference on Magnetohydrodynamics. 18–21 June 2017. Perm; V Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 2018); XXI Зимняя Школа по механике сплошных сред (Пермь, 2019).

Изучение и анализ результатов диссертационной работы показал очень высокую степень обоснованности представленных научных положений, выводов и рекомендаций.

К общим достоинствам диссертационной работы следует отнести следующие моменты:

- получен и систематизирован большой объем экспериментальных данных, имеющий ценность как сам по себе в контексте целей и задач работы, так и как массив для верификации численных моделей;
- рассмотрение всех поставленных задач проводилось с учетом возможности практического применения результатов в промышленности в условиях приближенных к реальному производству;
- в рамках экспериментального исследования большое внимание уделено методам измерений, повышения их достоверности и точности за счет снижения методических и инструментальных систематических ошибок.

Проведены контрольные опыты для выявления границ применимости и апробации измерительных методик;

- скрупулёзное выявление возможных систематических погрешностей измерения: так при определении положения фронта кристаллизации учитывались пространственное разрешение УДА, погрешность метода анализа эхо, погрешность положения фронта кристаллизации, связанная с наличием двухфазной зоны.
- создание и модернизация уникальных экспериментальных стендов, оригинальных методик измерений и обработки данных;
- даны практические рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы;
- грамотный стиль изложения научного материала, высокую научную компетентность и убедительную аргументацию автора.

Изучение диссертационной работы и анализ полученных результатов позволяют вынести для обсуждения в диссертационном совете **следующие вопросы.**

1. В диссертации утверждается, что процесс нагрева жидкого металла происходит за счет джоулева тепла при вихревых течениях электромагнитной природы и вязкого трения (стр. 70 и 77). Однако элементарные оценки показывают, что вторая составляющая при рассматриваемых скоростях течения жидкости в тепловой баланс вносит пренебрежимо малый вклад.
2. В работе несколько раз указывается, что структура поля ЭМ сил при магнитовихревом течении (МВТ) подобна электровихревому течению (ЭВТ), однако при этом не приведены числа физического подобия. Например, какая амплитуда магнитного поля МВТ соответствует какому электрическому току ЭВТ?
3. Почему при локализации положения фронта кристаллизации галлиевого сплава принимается середина третьего локального максимума профиля эхо (стр. 92)? На рис. 2.8 видно, что локальных максимумов (>75% от максимума сигнала) довольно много. Сам диссертант пишет, что разброс экспериментальных точек превышал погрешность метода (рис. 2.9). Возможно, имело смысл с помощью используемого диссертантом пакета Matlab провести обработку этих данных посредством *кластерного анализа* и найти координаты центра кластера (или центров кластеров)?
4. В работе в разных главах рассматриваются двухвихревые, четырехвихревые структуры течения жидкого металла в каналах экспериментальных установок. Почему не были приведены принципиальные схемы или рисунки, показывающие расположение и наглядное динамическое поведение возникающих вихрей?
5. При рассмотрении эксперимента по кристаллизации в условиях перемешивания из диссертации осталось неясным, из какого материала

была изготовлена кювета, также не определено условие теплообмена на нижней стороне канала, влияющие на кристаллизацию металла.

6. Известно, что толщина затвердевшего слоя металла пропорциональна закону квадратного корня от времени, значит, от времени зависит и скорость фронта кристаллизации. Как обеспечивалось это условие при измерении скорости движения фронта кристаллизации для разных значений силы тока и для разных периодов реверсивной модуляции?

Есть общие замечания.

1. Не совсем четко показана взаимосвязь между главами диссертации, хотя конечно она прослеживается, так как эти главы полностью вписываются в тему диссертационной работы. Во всех главах используются одни и те же датчики (УДА) и близкие друг к другу методики измерения.
2. Работа имеет сугубо экспериментальный характер, что ограничивает возможности получения данных о поведении рассматриваемых физических систем, например пространственных структур течений, при масштабировании геометрии и физических параметров. При изучении МГД-течений, двухфазных потоков кроме размерных величин необходимо было определить в условиях эксперимента и в получаемых результатах диапазон изменения безразмерных величин, влияющих на изучаемый процесс: число Рейнольдса Re , магнитное число Рейнольдса Re_m , число Гартмана Ha и пр. Это бы существенно расширило область использования результатов рассматриваемой работы.
3. Выбор конкретного экспериментального метода исследования часто ограничивал возможности вариации управляющих параметров, например, в задаче об управлении формой фронта кристаллизации имеем весьма узкую область параметров воздействия.

Необходимо сделать несколько мелких замечаний относительно выполнения всей работы.

1. Использование некоторых терминов не совсем корректно: *модуляция питания* линейного индукционного перемешивателя (стр. 6), *силы плавучести* (стр. 14, 107), *благоприятные и неблагоприятные МГД-течения* (стр. 42), *режим заморозки металла* (стр.103). Некоторые из них нужно было просто взять в кавычки.
2. В обзоре методов измерения скорости в жидких металлах нет упоминания об уникальной отечественной разработке волоконно-оптического анемометра ОИВТ РАН (лаборатория теплообмена в энергетических установках Ю.П. Ивочкина).
3. Несколько странный стиль подачи материала, сначала записываются формулы, а ссылка и упоминание про них находится далее по тексту, например формулы (21)–(22) приведены на 30 стр., а упоминание про них находится на 31 стр.
4. Диссертант при постановке задачи чистки проводящих сред пишет:

При очистке больших объёмов расплавленного металла, данный способ становится энергозатратным, поскольку требует непрерывного поддержания металла в расплавленном виде в течение нескольких дней подряд. Непонятно, про какие объёмы металла ведётся речь, и где применяется данная технология.

Все рассмотренные замечания лишь в небольшой степени снижают общие положительные оценки диссертации Г.Л. Лосева. Вне всякого сомнения, он проявил высокую эрудицию и грамотность. Надо отметить его глубокие знания при проведении экспериментальных исследований в области магнитной гидродинамики электропроводных сред, течений в условиях фазовых переходов.

Переходя к общей оценке диссертации Г. Л. Лосева, следует отметить, в добавление к соображениям в начале отзыва, что актуальность работы подтверждается тем, что ее тематика входит в перечень критических технологий РФ согласно указу президента №899 – решение практических и теоретических задач для атомной и солнечной энергетики. Эта работа необходима также и для ряда отраслей современной цветной и черной металлургии, а также полупроводников.

Ценность работы для теории и практики.

1. Разработаны методы измерения, позволяющие получать экспериментальные данные о скорости жидкости и ее пульсациях, которые могут быть использованы для проверки достоверности уже известных и новых численных методов.
2. На плоскости управляющих параметров построена карта режимов магнитовихревых течений, возникающих в плоском слое жидкого металла под действием локализованного в пространстве переменного во времени магнитного поля.
3. Установлено, что существует оптимальная сила тока питания перемешивателя с использованием БМП, создающая оптимальную амплитуду магнитного поля для эффективного перемешивания расплава в прямоугольном горизонтальном канале. Низкочастотные модуляции питания изменяют структуру генерируемых в жидком металле течений и повышают энергию пульсационной составляющей потока, что приводит к сглаживанию фронта кристаллизации при направленном фазовом переходе.
4. Сформулированы конкретные практические рекомендации по проектированию промышленных устройств очистки жидких проводящих сред.
5. Результаты исследований особенностей формирования и развития МГД-течений позволяют научно обосновать и оптимизировать современные методы управления тепломассообменными процессами, имеющими место при получении металлов из руд, в

кристаллизаторе МНЛЗ, в электродуговой плавке металлов и сплавов.

Новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые для МВТ, генерируемого в прямоугольной кювете со слоем жидкого металла, построена карта режимов течений на плоскости параметров силового воздействия и положения области действия переменного магнитного поля.
2. Впервые 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.
3. Получен новый оригинальный материал по изучению процесса 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.

Содержание диссертационной работы Г.Л. Лосева достаточно полно освещено в 28 научных публикациях, в том числе в 6 публикациях в журналах, включенных в перечень ВАК, апробировано на научных конференциях различного уровня (4 статьи в сборниках трудов конференции и 15 тезисов докладов). В автореферате достаточно полно отражается содержание всей диссертации.

Диссертация представляется завершенной научно-квалификационной работой, в которой присутствуют все необходимые элементы – это изучение проблемы, постановка задач исследования, их решение, анализ и практическая проверка полученных результатов.

Заключение

Диссертация Г.Л. Лосева выполнена на высоком уровне фундаментальных исследований МГД-процессов, представляет собой законченную научно-квалификационную работу. На основе тщательно выверенных инструментов для измерения параметров жидкого металла, Г.Л. Лосевым проведены точные экспериментальные измерения по изучению важных для практики процессов, в том числе воздействие на форму фронта кристаллизации металла при направленном фазовом переходе и электромагнитной сепарации примеси.

Полученные автором диссертации результаты достоверны и имеют существенную новизну, их можно рассматривать как научное достижение в области изучения МГД процессов. Обоснованы все полученные выводы, рекомендации и заключения. Работа написана грамотно и аккуратно оформлена. Автореферат и опубликованные работы соответствуют основному содержанию диссертации и выбранной научной специальности.

В целом представленная диссертационная работа и автореферат в полной мере отвечают требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Лосев Геннадий Леонидович **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

профессор кафедры
информационно-измерительной
техники, доктор технических наук,
профессор

25 октября 2021 г.

454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76
Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский
государственный университет (национальный
исследовательский университет)»,
Телефоны: +7-906-8992407, +7 (351) 267-99-00
E-mail: jachikov@mail.ru



Ячиков
Игорь Михайлович

Начальник службы
делопроизводства ЮУИИ
И.Е. Цыбульский