

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский
федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской
академии наук

На правах рукописи



Лосев Геннадий Леонидович

Измерения характеристик и контроль МГД-процессов

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н., проф.

Пётр Готлобович Фрик

Пермь – 2021

Оглавление

Введение	4
Обзор литературы	9
1. Магнитная гидродинамика жидких металлов	9
2. Методы измерения скорости в жидких металлах	15
3. Измерения физических свойств жидких проводников	33
4. Вихревые течения жидких металлов	37
Глава 1. Вихревые течения в плоских слоях жидких металлов	43
1.1. Введение и постановка задачи	43
1.2. Влияние стенок на качество ультразвуковых измерений	44
1.3. Экспериментальная установка	59
1.4. Характеристики течений	63
1.5. Методы измерений	65
1.6. Структура плоского вихревого течения	71
1.7. Выводы по главе	75
Глава 2. Вихревые течения в условиях фазового перехода	80
2.1. Введение и постановка задачи	80
2.2. Экспериментальная установка	82
2.3. Методика локализации фронта кристаллизации	84
2.4. Течение в изотермической жидкости	93
2.5. Кристаллизация в условиях перемешивания	98
2.6. Выводы по главе	104
Глава 3. МГД-очистка проводящих сред	107
3.1. Введение и постановка задачи	107
3.2. Экспериментальная установка	110

3.3. Методы измерения концентрации примесей	113
3.4. Результаты	116
3.5. Заключение	122
Заключение	124
Список литературы	127

Введение

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. Потому, 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 сило-

вых 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.

Обзор литературы

1. Магнитная гидродинамика жидких металлов

Задачей магнитной гидродинамики (МГД) является изучение динамики электропроводящей жидкости или газа в магнитном поле [29–31].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \sum_i f_i \quad (2)$$

Движение жидкого проводника подчиняется общим уравнениям механики сплошной среды. В частности, законам сохранения массы (1) и импульса (2).

Здесь ρ – плотность среды, \mathbf{V} – вектор скорости элемента жидкости, f_i – приложенная к единице объёма жидкости сила.

Внешние силы разделяются на два класса: поверхностные и объёмные. К поверхностным силам относятся силы трения, определяющие напряжения на границе выделенного объёма жидкости в зависимости от скорости и плотности окружающей среды. Жидкие металлы относятся к ньютоновским жидкостям в широком диапазоне температур и проявляют неньютоновские свойства лишь в интервале температур юлизиких к температуре кристаллизации [29], что позволяет во многих случаях принимать линейную связь касательных напряжений и градиентов скоростей.

Кроме поверхностных сил, на рассматриваемый объём жидкости оказывают влияние массовые силы. К ним относят силу тяжести и силы инерции. Главной отличительной чертой магнитной гидродинамики является наличие ещё одной объёмной силы

$$\mathbf{f}_{em} = \mathbf{j} \times \mathbf{B},$$

определяемой векторным произведением плотности тока \mathbf{j} , проходящего через жидкость, и индукцией магнитного поля \mathbf{B} .

С учетом указанных сил и допущений, система уравнений движения изотермической электропроводящей жидкости примет вид

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \mathbf{g} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\text{rot} \mathbf{E}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot} \mathbf{B} - \mathbf{j}, \quad (5)$$

$$\text{div} \mathbf{B} = 0, \quad (6)$$

$$\text{div} \mathbf{E} = 0, \quad (7)$$

$$\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}). \quad (8)$$

Полное решение электродинамической задачи требует, вообще говоря, привлечения системы уравнений Максвелла (4) – (7), дополненной обобщённым законом Ома (8).

Здесь и далее \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля, ε_0 – диэлектрическая постоянная, μ_0 – магнитная постоянная, σ – электропроводность жидкой среды.

При рассмотрении задач магнитной гидродинамики, в уравнениях Максвелла (4) – (7) пренебрегают слагаемым $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$, описывающим токи смещения. Это допущение обосновывается пренебрежимо малыми временами изменения напряженности электрического поля по сравнению с характерными временами гидродинамических процессов.

Электрическое поле в стационарных процессах можно выразить через градиент потенциала $\mathbf{E} = -\nabla \phi$, что позволяет свести систему (4) – (7) к двум уравнениям

$$\nabla^2 \phi = \text{div} (\mathbf{V} \times \mathbf{B}),$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \sigma \mu_0 \text{rot} (\mathbf{V} \times \mathbf{B}),$$

непосредственно связывающим потенциал электрического поля ϕ и индукцию магнитного поля \mathbf{B} с полем скорости электропроводящей среды. В этом проявляется

одна из важнейших особенностей электромагнитной силы – она не только оказывает воздействие на течение жидкости, но и сама видоизменяется под влиянием течения [29, 30].

Характер возникающего под действием электромагнитной силы течения зависит от того, является ли она потенциальной или вихревой. Ротор электромагнитной силы

$$\text{rot}(\mathbf{j} \times \mathbf{B}) = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{j} - (\mathbf{j} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (9)$$

отличен от нуля, если величина плотности электрического тока изменяется вдоль направления магнитного поля или магнитное поле искажается вдоль направления плотности тока [29, 32]. Так, вихри возникают, например, в жидком металле, по которому равномерно протекает электрический ток, на границе систем магнитопроводов, что используется в отдельных моделях электромагнитных насосов для металлических расплавов [32].

Отличительной чертой магнитной гидродинамики является так же наличие нового механизма диссипации энергии (и, соответственно, нового объёмного источника тепловой энергии в жидкости). В уравнении баланса энергии

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \chi \nabla^2 T + \nu \Phi + \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Phi = 2 & \left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial z} \right)^2 + \\ & + \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

наряду с диссипативной функцией Φ , отражающей диссипацию энергии вязкими силами, присутствует новый член $\sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})^2$, связанный с омическими потерями при протекании токов по проводящей среде.

Система уравнений (1), (3) – (8), (10) и (11) лежит в основе магнитной гидродинамики электропроводной вязкой среды [29, 32].

Таким образом, взаимная связь электромагнитного поля и поля скорости в проводящей среде обеспечивает новые механизмы силового воздействия и новые

способы измерения скорости и управления потоками в жидкой электропроводящей среде.

При решении практических задач о течениях жидких металлов зачастую можно пренебречь рядом слагаемых, значительно упростив систему уравнений. Одним из таких упрощений является безындукционное приближение. Оно предполагает, что при решении не учитывается обратное влияние потока жидкости на структуру электромагнитных полей, сводя таким образом задачу лишь к решению уравнений Навье-Стокса с силовым слагаемым, определяемым конфигурацией внешних магнитных полей и токов. Также общим для задач динамики жидкостей, является допущение о несжимаемости среды, приводящее к условию равенства нулю дивергентности вектора скорости элемента жидкости.

При переходе к безразмерной форме уравнений (1), (3) – (8), (10), (11) естественным образом возникает ряд управляющих параметров, среди которых выделим магнитное Re_m и гидродинамическое Re числа Рейнольдса и Прандтля Pr_m и Pr , число Гартмана Ha . Рассмотрим эти параметры более подробно.

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (12)$$

$$Re_m = VL\mu\mu_0\sigma \quad (13)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\chi} \quad (14)$$

$$Pr_m = \nu\mu\mu_0\sigma \quad (15)$$

$$Ha = BL\sqrt{\frac{\sigma}{\nu\rho}} \quad (16)$$

В определениях безразмерных критериев (12) – (16) V – характерное значение скорости потока жидкости, L – характерный пространственный масштаб течений, ρ – плотность, ν – кинематическая вязкость, χ – температуропроводность, σ – электропроводность, μ – магнитная проницаемость жидкости, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, B – характерная величина внешнего магнитного поля.

Число Рейнольдса (12) определяет отношение инерционных сил к силам вязкого трения, в свою очередь магнитное число Рейнольдса (13) определяет

Таблица 1. Характерные значений управляющих параметров для рассматриваемых в рамках диссертационной работы задач.

Жидкость	Re	Re _m	Pr	Pr _m	Ha
GaZnSn	10 ⁵	4 · 10 ⁻²	3 · 10 ⁻²	10 ⁻⁶	2 · 10 ²
КОН	80	10 ⁻¹⁰	10	8 · 10 ⁻⁶	10 ⁻¹

взаимодействие потока жидкого проводника с магнитным полем (то есть отношение инерционных сил к силам электромагнитной диссипации). Малые $Re_m \ll 1$ означают, что течение жидкости практически не оказывает влияния на внешнее магнитное поле, т.е. генерация магнитного поля потоком жидкости невозможна.

Число Прандтля (14) представляет собой характеристику физических свойств жидкости, а именно относительное значение механизмов вязкого трения при течении жидкости в сравнении с механизмами теплопередачи. Малые $Pr \leq 1$ означают, что теплопроводный механизм диссипации в жидкости превалирует, и температурные неоднородности рассасываются за времена много меньшие, чем характерное время рассасывания градиентов скорости потока. Магнитное число Прандтля (15) характеризует эффективность вязкой диссипации энергии в сравнении с механизмом генерации вихревых токов в жидкости. Характерные значения $Pr_m \ll 1$ для жидких металлов и растворов электролитов, что говорит о том, что электромагнитные процессы в жидкости протекают значительно быстрее гидродинамических, т.е. справедливо безындукционное приближение, при котором на характерных временных масштабах изменения поля скорости магнитное поле является неизменным.

Число Гартмана (16) характеризует влияние электромагнитных сил по отношению к силам вязкого трения. Малые $Ha \ll 1$ означают, что магнитное поле не оказывает влияния на поток жидкости, в то же время $Ha > 1$ означают, что течение определяется внешним электромагнитным воздействием.

В рамках диссертационной работы рассматриваются течения двух типов жидких проводников – легкоплавкого металлического сплава $Ga_{86.3}Sn_{10.8}Zn_{2.9}$ wt. %

и электролитического 15% раствора щелочи КОН в воде. Характерные значений безразмерных управляющих параметров, возникающих в рассматриваемых в работе задачах приведены в таблице 1.

Малые величины Re_m и Pr_m в рассматриваемых в рамках диссертационной работы задачах говорят об отсутствии влияния потоков рабочих жидкостей на внешне накладываемые электромагнитные поля. Значения $Ha > 1$ в задачах, моделируемых при помощи жидкометаллического сплава, означают, что именно электромагнитное поле определяет характер течений, в то же время, электромагнитные поля почти не оказывают влияния на потоки раствора КОН. Наконец, высокие Re в задачах, связанных и использованием жидких металлов (главы 1 и 2), определяют турбулентный характер течений.

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad (17)$$

Для задачи о кристаллизации металла (глава 2), также можно ввести число Грасгофа, определяемое соотношением (17). Здесь g – ускорение свободного падения, ΔT – перепад температуры, β – коэффициент теплового расширения.

Число Грасгофа имеет смысл отношения сил плавучести к силам вязкой диссипации при свободных конвективных движениях. Характерное значение числа Грасгофа в физической модели направленной кристаллизации составляет $Gr = 6 \cdot 10^7$, что говорит о значительном влиянии тепловой конвекции в отсутствии внешнего принудительного перемешивания, даже с учётом малых Pr .

2. Методы измерения скорости в жидких металлах

На сегодняшний день существует ряд методик измерения скорости течения жидких сред: интерферометрические, теневые методы, цифровая трассерная визуализация (более распространённое международное сокращение PIV – particle image velocimetry (англ.)), силовые датчики, трубные анемометры (например, трубки Пито-Прандтля), тепловые датчики скорости и датчики электрического потенциала (в проводящих средах), ультразвуковые анемометры, радиоскопические методы и томография, основанная на индуцируемых в проводящей жидкости магнитных полях [33–38].

Несмотря на всё разнообразие, лишь малая часть измерительных методик применима к течениям жидкого металла. Расплавы металлов непрозрачны, что исключает использование оптических методов. К неоптическим методам получения структуры течения относятся метод магнитного резонанса [39–41], сканирование рентгеновскими [42, 43] и ультразвуковыми лучами (эхография) и восстановление структуры по электрическим измерениям [44–46]. Силовые и трубные анемометры дают малую точность измерений и имеют свойство выходить из строя по причине загрязнения оксидами движущихся частей (силовой датчик) или измерительных трубок [38, 47]; радиоскопия и томография требуют достаточно габаритного и дорогостоящего оборудования [36, 37]. Ввиду обозначенных причин, на практике чаще всего используют индукционные датчики скорости, контактные датчики разности потенциалов или ультразвуковые анемометры [33, 35, 48, 49].

2.1. Кросскорреляционные измерения скорости

Исторически одним из первых методов измерения скорости течений жидких металлов в лабораторных условиях стало применение термоанеометров, включающих в себя нагревательные элементы, искусственно вносящие в поток температурные возмущения. При течении неизотермической жидкости её скорость может быть определена по эффективности сноса температурного возмущения [50, 51].

Наибольшее распространение получили термопары и оптоволоконные датчики температуры в силу их малых размеров и, как следствие, относительно малого внесения возмущений в поток. При движении среды неоднородность температуры фиксируется термодатчиками с некоторой задержкой по времени. Величину запаздывания можно найти по максимуму кросскорреляционной функции сигналов термопар [50–53]. Кросскорреляционный метод измерения скорости является абсолютным при условии, что течение в канале является полностью развитым, а пульсации температуры в области расположения термодатчиков достаточно велики.

Для нахождения полного расхода через канал требуется установить форму профиля скорости в калибровочном эксперименте. Поскольку для определения скорости потока используются временные ряды температуры, кросскорреляционный метод позволяет определять средние тепло- и массопотоки жидкости одновременно, что особенно полезно при изучении конвективных течений.

К недостаткам метода можно отнести необходимость механического внесения датчиков в поток жидкости, что создаёт дополнительные возмущения. Кроме того, метод применим лишь при постоянном во времени направлении течения. По форме кросскорреляционной функции можно судить о направлении среднего движения: если максимум функции находится в области положительных времён, то движение осуществляется от первого термодатчика ко второму; если же максимум кросскорреляционной функции лежит в области отрицательных времён, то поток жидкой среды движется от второго термодатчика к первому.

Кросскорреляционный анализ применим для измерения средних скоростей неизотермических турбулентных течений, таких как развитая турбулентная конвекция, поскольку в турбулентном потоке существуют выраженные перегретые области, которые перемещаются вместе с основным течением [52, 53]. Необходимо отметить, что описанный метод позволяет вычислить только среднюю по времени и пространству скорость. В силу способа нахождения времени запаздывания тепловой неоднородности при прохождении пары термопар осреднение производится по всему времени измерения. Осреднение по пространству осуществляется по

области между парой термопар.

2.2. Электромагнитные методы измерения скорости

В проводящей среде применимы методы, основанные на эффектах искажения внешнего магнитного поля и генерации токов в движущейся среде. Хорошо известно, что в среде, движущейся в магнитном поле, возникает ЭДС, ортогональная направлению движения и магнитного поля. Первая попытка измерения этого эффекта в природных условиях была предпринята Фарадеем в 1832 году при измерениях разности потенциалов между берегами Темзы, текущей в магнитном поле Земли [54]. В 1920 г. Юнг, Джерард и Джевонс провели измерение ЭДС, индуцируемой между двумя электродами, помещенными в воду, приливным течением в устье реки Дарт (Девон) [55]. Измеренный сигнал неплохо согласовывался с приливным течением. Применение явления индукции непосредственно к расходомерии проводящей среды было впервые проведено Вильямсом [56] при измерении разности потенциалов между двумя электродами, размещенными в стенках непроводящей круглой трубы, по которой протекал раствор медного купороса. Созданное Вильямсом устройство, представляло собой простейший электромагнитный расходомер. Очевидные преимущества такого рода устройств заключаются в малой инерционности и сопротивлении потоку, достаточно высокой чувствительности и линейной связи измеряемого сигнала со скоростью потока. Кроме того, осреднённый выходной сигнал расходомера в пульсирующем течении соответствует непосредственно среднему расходу жидкости. Тарировочный коэффициент зависит от распределения и индукции магнитного поля, концевых эффектов (при сильно ограниченной длине магнитов), но не зависит от свойств жидкости, что позволяет использовать одну тарировочную кривую при измерении расхода различных сред.

В настоящее время широкое распространение получили методы, допускающие внешнее по отношению к каналу с жидкостью, размещение генерирующих и

измерительных систем, поскольку в такой конфигурации достаточно просто осуществлять охлаждение источников магнитного поля, будь то постоянные магниты или катушки возбуждения. Последнее критично при использовании расходомеров на жидких металлах, в которых высокие температуры могут привести к перегреву магнитов выше точки Кюри или повреждению катушек. Кроме того, внешняя систем измерения расхода может быть установлена на уже существующий трубопровод (например в системе теплообмена ядерного реактора) без необходимости демонтажа последнего.

Электромагнитные расходомеры изучаются и разрабатываются довольно долгое время с целью оптимизации их параметров для лабораторных и промышленных приложений [47, 57–60]. В настоящее время применяются кондукционные и индукционные расходомеры, локальные датчики потенциала, бесконтактные силовые анемометры и др.

Кондукционные расходомеры

При осесимметричном течении проводящей жидкости в круглой трубе, помещенной в однородное магнитное поле, величина разности потенциалов между электродами, размещенными ортогонально внешнему магнитному полю, не зависит от конкретной формы профиля скорости [57]. Тем менее, наличие концевых эффектов в области спадения магнитного поля ограниченного в пространстве магнита и ограниченное число датчиков электрического потенциала приводят к некоторому усложнению связи разности потенциалов на измерительных электродах и скорости течения среды. В этом случае, коэффициентом пропорциональности будет служить полный поток магнитной индукции через область, ограниченную электродами [57, 59]. Величина последнего зависит от геометрии канала и может быть найдена экспериментально при тарировке датчика. При больших магнитных числах Рейнольдса, индуцированные в жидкости токи приводят к изменению структуры исходного магнитного поля и, как следствие, нелинейной характеристике

расходомера. В этом случае магнитный поток в канале становится функцией скорости. Данный эффект используется в индукционных расходомерах, но является нежелательным в кондукционных.

Для измерения расхода жидких металлов хорошо подходят кондукционные расходомеры постоянного поля. Конструктивно они могут выполнены в виде круглой трубы из химически и термостойкого неферромагнитного материала с размещенными по бокам мощными постоянными магнитами так, что вектор индукции магнитного поля направлен перпендикулярно основному потоку в канале. При этом измерительные электроды размещаются на диаметрах круглого канала. Увеличение числа электродов в плоскости измерения позволяет повысить точность измерений, учитывая так же возможную асимметрию профиля скорости [50]. При такой конструкции электрический ток к жидком металле генерируется движением последнего во внешнем магнитном поле. Взаимодействие наведённого тока с исходным полем порождает ЭДС, измеряемую при помощи соответствующих пар электродов. Величинам измеряемой ЭДС прямо пропорциональна синусу угла между направлением индукции магнитного поля и линией соединяющей концы измерительных электродов.

Кондукционные локальные датчики скорости

В случае локализованного в пространстве магнитного поля измерение проводится лишь в области, расположенной непосредственно под полюсами магнита. Примером таких измерительных приборов могут послужить локальные датчики потенциала [35, 47, 47, 59, 61–63], представляющие собой компактный магнит (постоянный или управляемый электрическим сигналом), оснащённый по краям измерительными электродами и размещаемый непосредственно в исследуемой жидкости. Измерения, проводимые датчиками потенциала, могут быть важны в случае течений со сложной структурой. Кроме того, данный тип приборов позволяет проводить локальные измерения скорости в сильно нагретых и химически

активных средах, таких как жидкие металлы, в которых иные контактные методы неприменимы. Малая инерционность датчиков позволяет проводить измерения скорости в нестационарных (в том числе в турбулентных) течениях [47, 57, 64, 65], что оказывается затруднительным при применении других методов.

Из-за наличия омических потерь при частичном замыкании тока между измерительными электродами, величина генерируемой течением жидкости ЭДС оказывается несколько меньше измеряемой разности потенциалов. Термоэлектрические эффекты в зонах контакта измерительных электродов с рабочей жидкостью так же создают дополнительную ЭДС, усложняя анализ полученного сигнала [59]. В этом случае при тарировке датчика необходимо учитывать пульсации температуры в потоке и экспериментально находить термоэлектрические коэффициенты в неподвижной среде. В работе [59] приводится описание прибора, позволяющего измерять локальные пульсации температуры за счет совмещения измерительных электродов кондукционного датчика скорости и термопар. Описанный математический аппарат позволяет выделить в получаемом электрическом сигнале составляющие ЭДС, вызванные неоднородностью температуры и движением среды.

Хотя в большинстве локальных кондукционных датчиков скорости используют постоянными магниты, возможно использование электромагнита, катушка возбуждения которого выносится из области течения проводящей среды [57, 66]. Измерительные электроды и магнитопровод могут быть заключены в защитный кожух для уменьшения контакта с химически агрессивной и (или) сильно нагретой средой. Размещение источника магнитного поля вдали от рабочей жидкости обеспечивает возможность увеличить размер генерирующей поле катушки, а также обеспечить относительно простую терморегуляцию.

Наличие локализованного сильного магнитного поля в слое проводящей среды создаёт так называемое магнитное препятствие – зону, в которой профиль скорости уплощается, а сопротивление набегающему потоку увеличивается вследствие эффекта Гартмана. В этом случае локализованное в пространстве постоянное магнитное поле действует на проводящую жидкость подобно твёрдому

препятствию – ниже области действия магнитного поля по потоку происходит изменение структуры течения и возникновение вихревых дорожек [67, 68], кроме того в области действия магнитного поля изменяется теплоперенос и массообмен. Все эти эффекты следует учитывать при проектировке измерительных участков трубопроводов, поскольку магнитное препятствие значительно изменяет свойства течения.

Восстановление функции тока

Другим вариантом измерительных техник на основе определения электрических потенциалов среды является восстановление функции тока при наличии внешнего постоянного магнитного поля B .

$$\psi = \frac{\varphi}{B} \quad (18)$$

В работе [69] показано, что величина функции тока ψ имеет прямую связь с величиной электрического потенциала φ в той же точке, согласно соотношению (18), что сводит проблему нахождения функции тока к технической задаче размещения в проводящей среде измерительных электродов. Идеологически, данный метод является частным случаем кондукционного расходомера. Однако его отличительной чертой является восстановление поля функции тока, что требует дифференцирования полученных экспериментальных данных (что, вообще говоря, является нетривиальной задачей и может привести к значительным ошибкам при обработке данных [70]). Другим минусом этой техники можно назвать требование наличия постоянного и однородного магнитного поля во всём объёме металла, что не всегда возможно обеспечить на практике.

Индукционные расходомеры

Поскольку при движении проводящей среды во внешнем магнитном поле создаётся дополнительное индуцированное поле, которое в первом приближении пропорционально расходу, измерение величины этого поля даёт возможность

определить расход текущей через канал жидкости. Одно из основных преимуществ индукционного расходомера – отсутствие механического контакта с движущейся средой, что особенно важно при течении расплавленных металлов. К преимуществам прибора так же можно отнести возможность использования относительно слабых магнитных полей, что снижает влияние расходомера на скорость и структуру течения [57].

$$Q = k \frac{(A_1 - A_2)}{(A_1 + A_2)} \quad (19)$$

Простейший индукционный расходомер представляет собой две соосные катушки, для которых канал с проводящей средой является сердечником. Одна из катушек создаёт в канале переменное магнитное поле, в то время как вторая регистрирует искажение поля, вызванное движением среды. На практике чаще используются индукционные расходомеры с несколькими (2 – 4) детектирующими катушками, расположенными симметрично относительно катушки возбуждения. Такая конструкция помогает увеличить точность измерений и учитывать изменение магнитного поля выше и ниже по потоку. Величину расхода жидкости можно вычислить по нарушению симметрии в распределении магнитного поля согласно соотношению (19). Здесь A_1 и A_2 – амплитуды электрических сигналов на катушках, расположенных ниже и выше по потоку, k – калибровочный коэффициент. Разность сигналов на измерительных катушках $A_1 - A_2$ соответствует составляющей напряжения, вызванной движением жидкости, в то время как сумма $A_1 + A_2$ отвечает составляющей напряжения, порождаемой трансформаторным эффектом. Отношение этих величин не зависит от проводимости среды [50, 60, 71].

Повышение числа измерительных катушек может повысить точность измерений и исключить влияние проводимости среды за счет сложения и вычитания сигналов непосредственно в электрической схеме без использования цифровой обработки [58, 71]. В этом случае согласованно включенные катушки дают сигнал пропорциональный проводимости среды, в то время как сигнал встречно включенных катушек пропорционален произведению скорости и электропроводности [58].

Изменяя частоту возбуждающего поля можно добиться повышения качества измерений для данных формы канала и вида рабочей жидкости [31]. Кроме того, используя описанную методику, можно найти расход жидкости по сдвигу фаз измеряемых сигналов [72].

Следует учесть, что протекание электрического тока по катушке возбуждения и тепловой контакт проводника с сильно нагретым каналом может привести к понижению чувствительности расходомера по причине изменения активного сопротивления катушек, а также к некоторому изменению их диаметра, что сказывается на реактивном сопротивлении и величине магнитного потока, пронизывающего измерительные катушки. Также важно отметить, что магнитное поле, создаваемое катушкой возбуждения, сглаживает неоднородности температуры при неизотермическом течении, что может быть критично при исследовании отдельных режимов теплопереноса [50].

Погружные датчики магнитных возмущений

Для измерения скорости движения проводящей среды не обязательно устанавливать системы возбуждения и детектирования магнитного поля вне объёма жидкости. Возможно устройство, представляющие собой капсулу, вносимую в поток и содержащую генерирующую и измерительную системы. Внутри капсулы размещаются катушка возбуждения магнитного поля и набор измерительных катушек [57, 73]. Принцип действия прибора то же, что и у более распространённых индукционных расходомеров: измерительные катушки регистрируют нарушение симметрии магнитного поля, вызванное движением проводящей среды вокруг датчика. В отличие от расходомера, охватывающего весь канал, данный датчик позволяет проводить локальные измерения скорости.

Современные технологии позволяют использовать датчики Холла для детектирования магнитного поля и его изменений вместо более объёмных катушек. Датчик Холла – это полупроводниковое устройство для измерения величины

магнитного поля. Этот подход используется в локальном датчике магнитных возмущений [74]. Датчик представляет собой постоянный магнит в форме прямоугольного параллелепипеда, по двум противоположным сторонам от которого располагаются датчики Холла. Течение жидкости искажает силовые линии поля, что регистрируется сенсорами [74].

Явным недостатком обоих методов является чувствительность магнитной и измерительной систем к высоким температурам при использовании их для измерения скорости течения жидких металлов. Кроме того, внесение датчика в поток создаёт дополнительные возмущения течения, что оказывается недопустимо в отдельных случаях.

Датчики на основе измерений силы Лоренца и генерации вихревых токов

Течение электропроводной среды во внешнем магнитном поле приводит к возникновению в проводнике силы, названной в честь Хендрика Лоренца [57, 75]. Эта сила направлена ортогонально направлениям внешнего магнитного поля и потока жидкости. Причиной возникновения данной силы служит генерация в проводящей среде вихревых токов, интенсивность которых связана (в случае текучих проводящих сред) со скоростью течения жидкости [76]. Возникающие вихревые токи взаимодействуют с исходным магнитным полем и таким образом порождают силовое воздействие электромагнитной природы.

$$f \sim \sigma V B^2 \quad (20)$$

Сила f , действующая на движущуюся проводящую среду, пропорциональна её проводимости σ , скорости движения V и квадрату магнитной индукции B (20). Согласно третьему закону Ньютона, на источник этой силы (т.е. систему генерации магнитного поля) со стороны движущейся среды действует сила равная по модулю, но противоположная по направлению. Измерив эту силу возможно найти скорость течения среды [57]. Данное явление лежит в основе анемометрии Лоренца [75]. Описанный метод не имеет устоявшегося перевода в отечественной литературе.

Название анемометрия Лоренца является калькой с устоявшегося в англоязычной среде названия *Lorentz Force Velocimetry*.

Метод анемометрии Лоренца применим вне зависимости от веса магнита. Однако очевидно, что технически более удобным в использовании является датчик на основе компактных и легковесных постоянных магнитов. Кроме того, значительная масса магнитной системы требует применения специфического измерительного оборудования, способного фиксировать малые изменения массы на фоне значительного среднего значения.

Конструктивно анемометр Лоренца может быть выполнен в виде постоянного магнита, размещённого на упругом подвесе, способном отклоняться от положения равновесия под действием силы Лоренца со стороны движущегося проводника. Другим вариантом может являться размещение нескольких магнитов на вращающейся (под действием электромагнитной силы) подложке. Угол отклонения от равновесного положения (в первом случае) или круговая частота вращения подложки (во втором) прямо связаны с силой внешнего воздействия, а следовательно (согласно соотношению (20)) связаны и со скоростью течения среды [75].

Вихревые токи возникающие в проводящей жидкости, находящейся под действием внешнего магнитного поля, приводят к возникновению момента электромагнитных сил, действующего на источник магнитного поля. Момент сил будет стремиться привести магнитную систему во вращение, согласованное с движением проводящей среды, что обеспечит постоянство во магнитного потока (поворот магнита компенсирует изменение, внесённое вихревыми токами) [76]. Анемометр, основанный на данном принципе, может быть выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита, размещённого на оси, обеспечивающей вращение с минимальным трением, и помещённого вблизи канала с движущейся проводящей средой. При этом угловая скорость вращения магнита линейно связана со скоростью движения проводящей среды и более сложным образом зависит от индукции магнитного поля и проводимости жидкости (через эффективную глубину проникновения магнитного поля в проводник) [76].

2.3. Ультразвуковые методы

К традиционным для лабораторных исследований динамики жидких металлов техникам измерения скорости движения среды относятся наблюдение за треками светоотражающих частиц [64] и измерения отдельных компонент вектора скорости при помощи ультразвука [77, 78].

Первый метод можно отнести к оптическим. Поверхность металла покрывают слоем оптически прозрачной жидкости (как правило это растворы кислот). В ходе химической реакции металла с покрывающей его средой образуются оптически непрозрачные (или имеющие отличный от основной среды показатель преломления) частицы (например пузырьки газа), траектории и скорость движения которых соотносятся с соответствующими величинами на поверхности металла при не слишком большой толщине слоя визуализирующей жидкости. Данный метод позволяет получить качественную картину структуры течения жидкого металла и оценить порядок величины скорости.

Разновидностью трекового метода можно считать наблюдение за оксидными частицами на поверхности металла в инфракрасном диапазоне [79]. Главное отличие от традиционных оптических методов заключается в выборе диапазона длин волн электромагнитного излучения.

Второй широкий класс измерительных техник связан с ультразвуковыми измерениях скорости [33, 80]. Ультразвуковые методы измерения делятся на три больших класса: времяимпульсные (в англоязычной литературе *time-of-flight methods*), доплеровские (*Doppler velocimetry*) и методы корреляции изображений (*imaging/correlation-based methods*) [78].

В первом случае излучатель посылает звуковой сигнал, который перемещается в среде быстрее скорости звука за счет переноса возмущений плотности и давления в среде потоком. Два приёмника, размещенных вверх и вниз по потоку, принимают сигнал и по разности времени достижения приёмников рассчитывается скорость потока. При этом отсутствует необходимость знать скорость звука в среде или

добавлять звукоотражающие частицы. Точность метода в лабораторных условиях может достигать 2–3 мм/с [78].

Во втором случае производится изменение частоты излучения между последующими ультразвуковыми импульсами, отражающимися от частиц в движущейся среде. Наличие звукоотражающих частиц является необходимым для данного метода. Пространственное положение точки, в которой измеряется скорость течения, определяется по времени движения ультразвукового импульса (времени между излучением и приёмом импульса). Преобразователь ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) излучает набор высокочастотных волновых пакетов. Последние претерпевают отражение от микрочастиц содержащихся в среде. Частицы, увлекаемые движением жидкости несут информацию о локальной скорости в точках их расположения. Несмотря на малость частиц, объём, в котором проводится измерение скорости имеет конечный размер. Данный объём можно представить как усеченный конус слегка расширяющийся вдоль хода ультразвукового луча. Вблизи излучателя форма измерительного объёма близка к цилиндрической, а диаметр немногим меньше диаметра датчика скорости. На достаточном расстоянии от излучателя диаметр конуса определяется размерами датчика, скоростью звука в среде и длиной ультразвуковых импульсов. Высота конуса определяется глубиной проникновения луча в среду, а угол раскрытия – длиной ультразвуковой волны и диаметром излучателя. Ультразвуковой луч рассеивается на больших дистанциях. Интенсивность звука уменьшается с расстоянием по квадратичному закону.

При анализе отраженного от частиц сигнала эхо обычно предполагается, что интенсивность ультразвукового луча и распределение звукоотражающих частиц в измерительном объёме постоянны и равномерны. Тем не менее реальное распределение частиц в среде является хаотичным, что приводит к уширению полосы частот ультразвука и усложнению спектрального анализа [81]. Наибольшие ошибки, связанные с конечными размерами измерительного объёма, имеют место в турбулентных течениях и течениях с большими градиентами скорости. В этом случае ультразвуковое эхо может вырождаться в случайный сигнал. При малых градиентах

скорости осреднение по многим отраженным сигналам даёт достоверное значение измеряемой компоненты скорости [82].

Каждый датчик УДА измеряет одну компоненту вдоль ультразвукового луча. Использование же массива датчиков позволяет восстанавливать двумерное [49, 83, 84] или даже трёхмерное [82] поле скорости. Точность восстановления зависит от выбранной математической модели интерполяции экспериментальных данных, а также от количества и частоты расположения датчиков. Подробное экспериментальное изучение структуры двумерных и трёхмерных течений применимо не только для расчета технических устройств, но и для верификации численных моделей.

Другим вариантом восстановления двумерного поля скорости является физическое перемещение или вращение датчика скорости. В работе [49] рассматривается двумерное поле скорости в плоском прямоугольном канале, заполненном сплавом GaInSn. Металл приводился в движение за счет индукционного насоса бегущего поля. Измерения проводились при помощи поворачивающегося ультразвукового датчика вдоль 463 линий под разными углами к оси канала. По 323768 измеренным профилям восстанавливалось двумерное поле скорости путём аппроксимации данных системой линейных уравнений. Результаты ультразвуковых измерений сравнивались с данными локального кондукционного датчика скорости, расположенного ниже по потоку. В работе рассматриваются гартмановское течение с уплощением профиля скорости магнитным полем постоянных магнитов и течение металла под магнитным препятствием. Использованный метод измерений позволил восстановить двумерное поле скорости.

Одной из важных проблем ультразвуковых измерений является вопрос о прохождении ультразвуком межфазных границ (в том числехождение стенок экспериментальных установок, каверн, пузырей и т.п.). Значительный скачок акустического сопротивления (произведения скорости звука на плотность среды) приводит к отражению звуковой волны и порождает сложности при измерениях. В [77, 85] приводится формула расчета коэффициента прохождения звуковой волны

через стенку с учетом толщины последней. При широко распространённом в лабораторных исследованиях выборе материалов (оргстекло и сплавы на основе галлия), разница звуковых сопротивлений рабочей жидкости и стенок канала достаточно мала, чтобы толщина стенок не оказывала существенного влияния на коэффициенты отражения R и прохождения D . Множественные переотражения ультразвука на границах стенок сосуда, ограничивающего объём рабочей среды, приводит к интерференции и изменению эффективного коэффициента прохождения [77]. Таким образом, изменение толщины стенки позволяет повысить эффективность передачи звуковой энергии при том же выборе материалов и скачке звукового сопротивления. Работа [77] представляет интерес с измерительной точки зрения расчетом толщины стенок из разных материалов (нержавеющая сталь, алюминий и тефлон) с целью повышения коэффициента прохождения звуковой волны, поскольку проблема прохождения ультразвука через стенки рабочих полостей является важным лимитирующим фактором для ультразвуковой анемометрии. Наилучший результат (минимальный скачок звуковых сопротивлений) демонстрирует тефлон, однако данный материал крайне плохо смачивается жидкостями (в том числе и металлическими расплавами) и имеет свойство разрушаться под действием щелочных металлов. В работе исследуется течение жидкого натрия в канале квадратного сечения с магнитным препятствием при помощи УДА.

При изучении течений сильно нагретых сред (расплавы металлов, полупроводников и др.) следует изолировать пьезоэлемент ультразвукового датчика во избежание перегрева и, как следствие, фазового перехода излучателя при температурах выше точки Кюри. Решение данной проблемы имеет два основных варианта. Первый путь – создание высокотемпературных датчиков на основе, например, LiNbO_3 (точка Кюри 1210°C). Тем не менее, чувствительность материала к акустическим воздействиям понижается с ростом температуры, что делает принципиально невозможными измерения при нагреве пьезоэлемента свыше 650°C (предельная рабочая температура современных коммерческих датчиков составляет 200°C [86]).

Другим вариантом решения является создание волновода, обеспечивающего

понижение температуры от уровня нагрева исследуемой среды до рабочей температуры пьезоэлемента. Работа [86] посвящена описанию волновода из нержавеющей стали для датчика УДА. Описываемый датчик позволяет проводить измерения в расплавленном металле, разогретом до температуры 620°C, и допускает акустический контакт со сталью. Датчик представляет собой пьезоэлемент, соединённый со стержнем из фольги толщиной 0.1 мм, намотанной на капиллярную трубку. Края волновода запаяны лазерной плавкой стали. Эксперименты на воде показали падение звуковой энергии при контакте сталь–вода из-за значительной разницы в акустических сопротивлениях. Тем не менее, профили скорости, полученные при использовании волновода и стандартного ультразвукового датчика близки, хотя первый и является более зашумленным. Применительно к расплавам металлов, были проведены эксперименты по нахождению скорости инжескированных пузырей азота в расплаве PbBi (температура среды 180÷300°C). Ошибка при измерении скорости пузырей значительна (до 10–15%), в то же время измерения скорости самого металла довольно точны. Измерения в расплаве CuSn при температуре около 620°C позволили получить вполне четкие профили скорости, что говорит о работоспособности метода использования волновода из химически и механически устойчивого материала.

$$d < \frac{c \cdot N_c}{2f_0} \quad (21)$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right)}} \quad (22)$$

Работа [87] одна из первых рассматривает ультразвуковые измерения скорости течения ртути. Течение рассматривается в замкнутом канале, движение ртути осуществляется за счет индукционных насосов. В работе приводятся профили скорости ртути в канале специфической формы: две концентрические трубы; внешняя труба оканчивается сферическим сегментом, а внутренняя погружена в этот сегмент таким образом, что ртуть из внешней трубы перетекает во внутреннюю внутри полусферы. В результате множественных измерений получены поля скорости в

полусфере. Теоретическая часть посвящена рассмотрению вопроса о прохождении акустической волны через плоскую стенку в зависимости при различных звуковых сопротивлениях стенки и среды. Чрезмерное увеличение толщины стенки приводит к искажению исходного звукового сигнала, поскольку переотражения внутри стенки создают вторичный ультразвуковой импульс, который приводит к ошибке расчета скорости. Критерием выбора толщины стенки используется количество импульсов N_c в каждом акте излучения волнового пакета пьезоэлементом. Приведенный в работе результат демонстрирует наличие критической толщины стенки для различных частот ультразвука в зависимости от параметра $N_c = \{4, 8, 16, 20, 24, 28, 32\}$. Для достижения максимального значения прохождения D звуковой волны (22), толщина стенки d должна удовлетворять условию (21), где c — скорость звука в материале стенки, f_0 — частота ультразвука, $Z_{1,2}$ — акустическое сопротивление материала стенки и рабочей жидкости соответственно, d — толщина стенки, λ — длина волны ультразвука. Несоблюдение условий (22) и (21) может приводить к существенным сложностям при анализе получаемого эхо-сигнала.

Одним из приложений ультразвуковой анемометрии является исследование многофазных сред. Этот метод может применяться как для нахождения положения твёрдых частиц [88] так и газовых пузырей [89]. Более того, анализ сигнала эхо позволяет также находить положение межфазной границы при кристаллизации металла [90], что технически сложно выполнимо другими методами. Во всех описанных ситуациях граница раздела сред определяется по пику в пространственном профиле эха. Наличие данного пика обусловлено изменением скорости звука и отражением на границе раздела.

Третий метод – ультразвуковая визуализация (UIV) – основывается на тех же принципах, что PIV при замене оптических волн на звуковые [78]. Скорость течения находится по алгоритму корреляции ультразвуковых изображений. Положение «частиц» рассчитывается по времени задержки между излучением ультразвукового импульса и фиксации отраженного от частиц сигнала. Смещение в физическом пространстве вычисляется методом минимизации ошибки при кросскорреляции

изображений (полей интенсивности отраженных ультразвуковых волн). Отношение полученной величины смещения к временному интервалу между двумя кадрами служит оценкой скорости движения среды. Данный метод не позволяет производить измерения внутри каверн и пузырей, заполненных газовой фазой по причине значительного отражения звука на границе твердое тело/газ или жидкость/газ.

Как и в случае доплеровской анемометрии ультразвуковая визуализация требует наличия звукоотражающих частиц в среде. Тем не менее, наличие избыточного числа частиц может значительно понизить отношение сигнал/шум вплоть до полного рассеяния ультразвука в среде. Рассеяние и отражение ультразвуковых волн определяется не только теплофизическими и акустическими свойствами рабочих сред, но так же частотой ультразвука и формой волны. Наиболее эффективно рассеяние волн происходит на частицах с размерами порядка длины волны. Для оптических систем характерные длины волн имеют порядок 500 нм, в то время как характерные длины звуковых волн имеют порядок 0.1 мм. Эта величина близка к характерным размерам дисперсионной фазы во многих гетерогенных средах.

3. Измерения физических свойств жидких проводников

Измерение теплофизических свойств при высоких температурах является важной, но сложной задачей. Важность заключается не только в технологической значимости наличия точных и надежных данных для обработки материалов, но и в углублении нашего понимания фундаментальных физических явлений, определяющих теплофизические свойства.

Частично задачу можно упростить за счет использования переходных субсекундных методов. В этом случае жидкое состояние создается в течение такого короткого периода, что форма образца сохраняется и предотвращается коллапс. Этот метод применим при температурах, немного превышающих температуру плавления образца, и дает надежные данные, например, об излучательной способности и тепловом расширении металлов.

Другой подход состоит в поддержании жидкого образца в устойчивом состоянии в течение длительного периода времени. Это может быть достигнуто с помощью электромагнитной левитации для электропроводящих расплавов. В данном методе образец подвешивается высокочастотными электромагнитными полями. Будучи бесконтактной техникой, электромагнитная левитация обеспечивает минимальное химическое загрязнение образца. Благодаря устранению зародышеобразования, вызываемого стенками тиглей, становится возможным переохладение образца на несколько сотен градусов в течение практически неограниченного времени. Кроме того, в расплаве не возникают турбулентные течения, и как следствие, в образце не происходит дополнительного рассеяния электромагнитных полей, что оказывается важно при измерениях вязкости [91].

Измерение проводимости

Одним из классических методов измерения проводимости металлов является применение мостовой схемы Уитстона. Мост Уитстона предназначен для измерения сопротивлений методом сравнения. При этом методе не требуется измерять

токи и напряжения, что обуславливает получение более точных результатов. Мост Уитстона включает в себя четыре сопротивления, образующих своего рода четырехугольник, в одну диагональ которого включается источник тока, а в другую – гальванометр G . При уравновешенном мосте сопротивление образца R_x может быть найдено из соотношения

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (23)$$

В случае цилиндрического образца, проводимость металла может быть найдена тривиально из соотношения

$$\sigma = \frac{l}{R_x S}, \quad (24)$$

где l – длина образца, S – площадь сечения образца.

Для сравнительных изменений проводимости (например при изменении концентрации примесей в ходе процесса очистки металла) возможно заменить резистор R_2 образцом металла в начальном состоянии (проба в момент времени $t = 0$) либо образцом заданной химической чистоты. В качестве измерительного образца R_x используются пробы металла взятые последовательно в ходе протекания некоторого процесса. При этом показания гальванометра дают качественную оценку изменения проводимости по сравнению с эталонным образцом [92]. Описанный метод требует калибровки показания гальванометра для определения абсолютных значений проводимости.

Важным недостатком мостовых схем являются жесткие требования к термостабилизации анализируемых образцов металлов, поскольку омические потери при протекании через образец электрического тока приводят к разогреву проводника и, как следствие, к изменению его проводимости. Потому, измерение и контроль температуры являются отдельной технической задачей, которая должна быть решена при подготовке к экспериментам.

Бесконтактные методы измерения электропроводности во многих случаях имеют существенные преимущества перед контактными способами. В частности, они позволяют контролировать чистоту металлов по остаточному удельному

сопротивлению. Бесконтактные методы можно использовать для измерения электропроводности металлов, сплавов, полупроводников и электролитов, в том числе и в тех случаях, когда образец помещен в герметичную ампулу для изоляции исследуемого материала от окружающей среды.

Общий принцип бесконтактных или индукционных измерений проводимости основывается на измерении вариаций полного сопротивления Z колебательного контура, при помещении внутрь катушки индуктивности сердечника из исследуемого электропроводного материала. Комплексное сопротивление $Z = R + i\omega L(\sigma)$ может быть определено различными методами в зависимости от геометрии образца и структуры колебательного контура, например, путем измерения сдвига фаз между током и напряжением [92, 93], где R – активное сопротивление контура, ω – циклическая частота тока и L – индуктивность системы.

Измерение свойств жидких проводников в турбулентных потоках

Измерение статистических параметров взаимодействия скалярных полей свойств жидкости (таких как температура или концентрация электролита) с полем турбулентного потока, важно как для понимания практических систем (таких как смесители и химические реакторы) так и для фундаментальных исследований процессов турбулентного перемешивания. Турбулентность приводит к усилению диффузии магнитного поля, которое при постоянной магнитной проницаемости можно рассматривать как увеличение эффективного сопротивления жидкого металла [94, 95]. Информация, полученная из «точечных» измерений скалярного поля, полезна для сравнения с существующими теориями турбулентного перемешивания, а также для предоставления эмпирических данных для расчета рассеяния акустических и электромагнитных волн случайным скалярным полем.

Флуктуации проводимости могут быть связаны с пульсациями температуры жидкости или концентрации электролитического раствора. В 1960-х был предложен метод измерения пульсаций проводимости при помощи локального зонда с объёмом

измерительной области много меньшим, чем характерный масштаб турбулентных пульсаций [96]. В этом методе электрическая цепь представляет собой замкнутый через ячейку с проводящей средой контур. Локальные изменения проводимости жидкости в измерительной ячейке вблизи зонда приводят к изменению полного сопротивления электрического контура. В свою очередь вариации сопротивления электрической цепи могут быть измерены традиционными методами.

В методе [96] один из измерительных электродов выполнен в виде электропроводной стенки измерительной ячейки. Второй электрод представляет собой локальный платинированный контакт размером порядка 10 мкм. Электрические измерения проводились по мостовой схеме, одно из плеч которой – измерительная ячейка. Для повышения точности измерения токосъёмный электрод был заземлён. Измерения проводились в электролитическом растворе.

Схожая метод применён в [97] для измерения вариаций проводимости жидкого натрия при турбулентном течении. Измерения между двумя медными электродами равного сечений. Авторы указывают на снижение проводимости металла приблизительно на 4% при достижении магнитного числа Рейнольдса $Re_m \sim 8$.

Индукционные измерения возможны и при исследовании турбулентных свойств движущейся среды. В [94, 95] проводились измерения эффективной турбулентной электропроводности жидкого натрия при помощи индукционного метода. Тороидальная полость с жидким металлом была окружена обмоткой генерирующей переменное магнитное поле тороидальной катушкой. Две измерительные катушки были расположены вокруг полости диаметрально для измерения амплитуды и фазы индукции наложенного магнитного поля. Изменение сдвига фаз между измеренным магнитным полем и переменным током в тороидальной катушке является величиной, которую можно рассматривать как меру логарифмического изменения коэффициента турбулентной электропроводности металла.

4. Вихревые течения жидких металлов

Развитие магнитной гидродинамики во многом продиктовано практическими нуждами металлургической промышленности. Высокие рабочие температуры, химическая активность металлических расплавов и разнообразие технических задач потребовали разработки широкого класса технологий обработки жидких металлов. Среди приложений МГД-технологий можно отметить устройства для перемешивания [30, 90, 98–101], транспортировки [32, 102–104], литья [99, 105], очистки [106–108], плавки [109, 110] и получения металлов из руд [111, 112].

Принципов работы вышеперечисленных устройств основываются на закономерностях магнитной гидродинамики. Исследование структуры течений и динамики физических процессов, проходящих в указанных устройствах необходимо, для усовершенствования существующих и разработки новых технологий.

4.1. Генерация транзитного течения

Высокая надёжность и относительная простота конструкции обусловили широкое применение МГД-насосов. В МГД-насосах, как правило, реализуются схемы с бегущим и вращающимся магнитными полями. Эти поля используются для осуществления бесконтактной транспортировки расплавленного металла по каналу [102, 104]. Принцип действия индукционных насосов схож с линейными двигателями: бегущее магнитное поле порождает в рабочем теле (в случае насоса в качестве рабочего тела служит жидкий металл) вихревые токи, направленные параллельно плоскости линейного индуктора. Взаимодействие магнитного поля индуктора с индуцированными токами порождает выталкивающую силу, направленную вдоль направления бегущего поля. В зависимости от технологических потребностей, индукционные насосы могут быть выполнены как с плоским [104, 113], так и с цилиндрическим [114, 115] каналом. Одной из областей применения индукционных насосов является транспортировка жидкометаллического теплоносителя в ядерных реакторах [116, 117].

Существенным ограничением в применимости индукционных насосов является рабочая температура жидкого металла. При высоких (более 300°C) температурах расплава всё более остро встаёт проблема охлаждения генерирующих катушек и магнитопроводов. Перегрев насоса значительно снижает его работоспособность, что может привести к аварийным ситуациям на производстве.

Кондукционный способ генерации течений менее чувствителен к высоким температурам рабочей среды в силу отсутствия изолированных обмоток. Тем не менее, принципиальным недостатком кондукционных насосов является наличие контактного сопротивления между токоподводом и рабочим телом (жидким металлом). Перегрев стенок канала в области токоподводов обуславливает снижение долговечности насосов [118, 119]. Принцип действия кондукционных безобмоточных насосов заключается во взаимодействии продольного электрического тока, проходящего через канал, с его собственным магнитным полем. Для усиления магнитного поля, как правило, используются ферромагнитные массивы различной геометрии [32, 120].

4.2. Генерация вихревых течений

Основным условием генерации вихревого течения в объёме жидкости является наличие вихревой составляющей вынуждающей силы. Согласно выражению (9), ротор электромагнитной силы отличен от нуля при условии неоднородного растекания электрического тока, либо наличия градиентов магнитного поля. Оба механизма возникновения завихренности течения охватывают широкий класс практических задач.

Резкие неоднородности магнитного поля возникают при использовании как постоянных магнитов [121], так и магнитопроводов [32, 122, 123], не имеющих собственной намагниченности, но концентрирующих силовые линии магнитного поля тока. В обоих случаях, речь идёт о течении, возникающем при равномерном протекании через слой жидкого металла постоянного электрического тока большой

(порядка килоамперов) величины. На границах магнита/магнитопровода происходит быстрое падение индукции магнитного поля, что приводит к возникновению вихревой компоненты электромагнитной силы и, как следствие, к генерации гидродинамических вихрей [120]. Примером практического применения механизма генерации вихрей могут послужить центробежные насосы [124, 125]. В данном устройстве транспортировка металла осуществляется под действием градиента давления, вызываемого центробежной силой, генерируемой в металле посредством высокоинтенсивного вихревого течения. Другим примером применения вихревых течений является плоский центробежный насос [123, 126–128], в котором градиент давления (и транзитное течение) создаётся посредством множества вихрей в вытянутом плоском канале.

4.3. Электровихревые течения

Отдельный класс МГД-течений связан с неоднородным растеканием электрического тока и генерации вихревых течений посредством создания вынуждающей силы, возникающей при взаимодействии исходного тока с собственным магнитным полем. Такие течения получили названия электровихревых (ЭВТ). История изучения ЭВТ насчитывает уже около полувека [129–132]. Характерной чертой, определяющей ЭВТ является неоднородное растекание электрического тока, как правило, большой (порядка единиц и десятков кА) интенсивности от локализованного в пространстве токопровода. Классическое ЭВТ исследовалось как численно так и экспериментально в постановке растекания тока от точечного источника в полусферу, являющуюся вторым электродом и заполненную жидким металлом [129, 130]. Такая постановка связана не только удобством теоретического решения, но и практическими приложениями, такими как электродуговая плавка [109] и сварка [110]. Тем не менее, генерация ЭВТ возможна и в иной геометрической постановке, например, в цилиндрической полости [131, 132] или плоском слое [133–135]. Последний случай характерен для алюминиевых элект-

тролизёров, в которых вихревые течения способны приводить к неустойчивости поверхности металлического расплава [32, 111, 134].

В последние годы интерес к ЭВТ обострился в связи с развитием технологий жидкометаллических батарей (ЖМБ). Рабочая область ЖМБ конструктивно схожа с ваннами электролизёров [112, 136, 137], и в ходе процессов зарядки и разрядки ЖМБ в объёме жидких электродов возникают ЭВТ, способные привести к истончению слоя электролита вплоть до короткого замыкания и потери всей накопленной электроэнергии.

4.4. Вихревые течения в плоских слоях

Экспериментальные исследования ЭВТ сопряжены с рядом трудностей. Даже при использовании легкоплавких металлов или сплавов остаётся необходимость в источниках постоянного тока высокой величины, что не всегда удобно для лабораторных исследований.

В качестве физической модели, отражающей топологию ЭВТ, был предложен метод генерации течений при помощи переменного магнитного поля, локализованного в пространстве [111]. Течения, порождаемые таким образом, можно условно назвать магнитовихревыми (МВТ), подчеркивая одновременно аналогию с ЭВТ и отличие в механизме генерации течений: локализованное в пространстве переменное магнитное поле (для определённости будем считать его направленным вдоль оси Oz) порождает в проводящей среде вихревые токи в плоскости xOy . Если среда является текучей, то возникающие в результате взаимодействия вихревых токов и исходного поля силы, будут создавать течение, топологически схожее с ЭВТ. Поскольку основной мотивацией изучения МВТ является упрощение экспериментального моделирования и изучения структуры и эволюции ЭВТ, следует конкретизировать практическую реализацию метода – локализованные в пространстве магнитные поля создаются при помощи магнитопроводов с генерирующими катушками. В свою очередь, распределение электромагнитных сил вокруг магни-

топровода оказывается идентичным распределению сил вокруг локализованного токоподвода при ЭВТ [138, 139].

Хотя основной мотивацией изучения МВТ является опосредованное моделирование ЭВТ, существуют примеры практического применения МВТ как такового. Примером может служить создание плоского перемешивателя для жидких металлов [64]. Здесь в слое металлического создаётся многовихревое течение за счет силового воздействия от нескольких индукторов. Эта простая конструкция может быть востребована для создания небольших партий металлов и сплавов.

4.5. Устойчивость вихревых течений

В большинстве экспериментальных исследований и технологических устройств, область электромагнитного силового воздействия, существенно меньше, чем характерные размеры полости с жидким металлом. Это обусловлено техническими ограничениями на размер токоподводящих электродов, электромагнитов и их магнитопроводов. При этом возникают вихревые течения с несколькими крупномасштабными вихрями [111]. Такое течение сохраняет свою структуру только при воздействии силы небольшой величины. При увеличении интенсивности силового воздействия течение становится неустойчивым пороговым образом [64]. Это проявляется в миграции вихрей в плоскости слоя.

В работах [111, 140] исследовалось МГД течение, а также его устойчивость. Течение в плоском слое создавалось под воздействия внешнего переменного магнитного поля направленного поперек слоя. При расположении сердечника в геометрическом центре слоя, электромагнитная сила действует радиально в центр объёма жидкости и порождает четырехвихревое течение. Данная структура является неустойчивой и вырождается крупномасштабное одновихревое течение, сопровождаемое колебаниями свободной поверхности слоя. Обнаруженное явление разрушения четырехвихревого течения с образованием одновихревого течения более крупного масштаба находятся в согласии с законом неубывания энтропии в

плоском квазидвумерном слое [70]. Этот факт получил экспериментальное подтверждение для МГД течений в слоях с большим количеством вихрей [141, 142]. Также в [143] показано, что электровихревое течение в слое со свободной поверхностью разрушается с образованием одного крупномасштабного вихря из четырёхвихревой структуры. Неустойчивость электровихревого течения с одним и двумя крупномасштабными вихрями в плоском слое жидкого металла с твердыми границами была обнаружена и исследовалась в работе [144].

При всём многообразии возникающих в практических задачах МГД-течений, их можно условно разделить на две группы по иной классификации: течения, благоприятные для технологического процесса, и неблагоприятные течения. Естественной потребностью является генерация и поддержание течений первой группы и подавление второй. Таким образом, основные исследовательские усилия должны быть направлены на изучение механизмов генерации течений в конкретных практически важных постановках и способов управления структурой и эволюцией этих течений.

Большое разнообразие измерительных методик с одной стороны предоставляет возможности для изучения МГД-процессов в технических аппаратах, с другой стороны требует учета специфики отдельных задач и грамотного выбора средств измерения, обеспечивающих надёжность и повторяемость результатов.

Указанные проблемы хорошо видны на примере решения задачи об исследовании вихревого течения жидкого металла в плоском слое.

Глава 1

Вихревые течения в плоских слоях жидких металлов

1.1. Введение и постановка задачи

Электрический ток во внешней цепи и неоднородность распределения электромагнитных сил являются основными причинами, порождающими неустойчивости и нежелательные вторичные электровихревые течения в электролизёрах и разрабатываемых в последние годы ЖМБ. Впервые метод моделирования электровихревых течений путем приложения локализованного переменного магнитного поля был предложен в [111]. Распределение электромагнитных сил на полюсах индуктора переменного магнитного поля идентично распределению сил вдоль цепи электропитания. Данный метод оказался удобным для лабораторного моделирования вихревых течений в силу компактности установок и сравнительно малых затрат энергии на генерацию течения (см., например [64, 111]). В этих работах было установлено, что локализованное воздействие электромагнитной силы на геометрический центр металлического слоя приводит к появлению колебательного течения жидкого металла. Это течение имеет четырехвихревую структуру, но в случае смещения области электромагнитного воздействия в слое создается двухвихревая структура. Двухвихревое течение оказывается стабильным в том смысле, что размер и положение крупномасштабных вихрей постоянны [64, 122].

Силовые шины электропитания электролизёров генерируют дополнительные магнитные поля, которые изменяют топологию сил. Та же проблема возникает в случае сборки жидкометаллических батарей. Поэтому важно оценить влияние смещения области электромагнитного воздействия от канонической структуры постановки (как правило, симметрия токоподвода относительно слоя жидкости). Ожидается, что течение в промежуточных областях будет претерпевать качественные изменения, пока оно не будет асимптотически приближаться к известным

структурам. Тем не менее, пространственная структура переходных потоков остается неизвестной, что поднимает проблему выбора геометрии задачи, которая будет соответствовать указанной интенсивности течения жидкости.

Целью исследования является экспериментальное изучение структуры и характеристик вихревых течений в плоском слое электропроводной жидкости (в дальнейшем имеется в виду жидкий металл) под действием пространственно локализованного переменного магнитного поля. Объектом исследования данной части диссертационной работы являются течения, генерируемые в плоских слоях жидкого металла и методы достоверного измерения характеристик этих течений. Толщина слоя много меньше его планарных размеров.

1.2. Влияние стенок на качество ультразвуковых измерений

Основным инструментом для исследования структуры вихревых течений в данной задаче является ультразвуковой доплеровский анемометр (УДА). Как было отмечено в обзоре литературы, качество ультразвуковых измерений в значительной мере зависит от физических параметров звукопроводящей стенки (толщина, плотность, скорость звука 2828 м/с, скачок акустического сопротивления на границе с рабочей жидкостью). Поэтому перед началом исследования течений надлежит разработать и проверить методику измерений на тестовых течениях в канонической постановке.

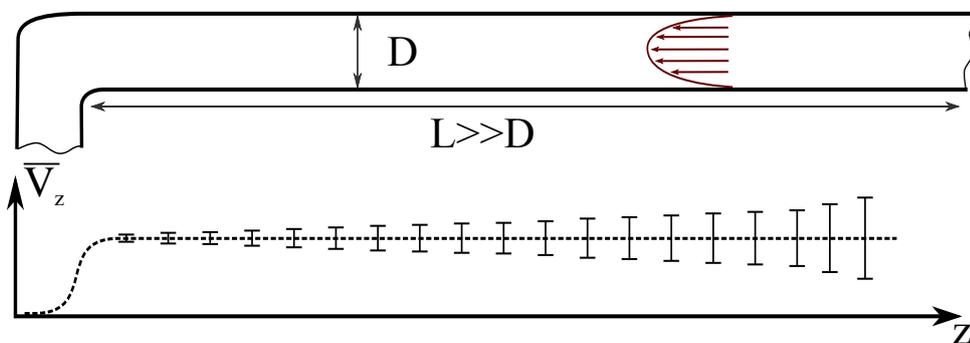


Рис. 1.1. Схематическая постановка задачи: течение в прямолинейной круглой трубе (сверху) и ожидаемый профиль продольной компоненты скорости (внизу).

Первая подзадача посвящена исследованию влияния параметров звукопроводящей стенки на качество ультразвуковых измерений скорости потока жидкого металла. В качестве модельного течения выбрано течение Пуазейля в трубе кругового сечения (рис. 1.1). Длина канала более чем в 40 раз превышает его диаметр, что позволяет обеспечивать постоянную во времени и пространстве величину аксиальной компоненты скорости. На рис. 1.1 схематически представлена постановка задачи: в идеализированном случае набегающий поток обеспечивает представленный на рисунке профиль скорости. Снижение величины скорости при малых z обуславливается поворотом потока на выходе из трубы. Ожидаемое увеличение амплитуды пульсаций скорости (обозначено на рисунке вертикальными линиями) объясняется расхождением ультразвукового луча и появлением дополнительной погрешности, связанной с частичным рассеянием эхо.

1.2.1. Тестовая установка

Тестирование влияния материала и геометрической формы звукопроводящей стенки на качество измеряемого УДА сигнала проводилось на испытательном галлиевом контуре. Принципиальная схема контура приведена на рис. 1.2. Контур оборудован специальным измерительным модулем 1, допускающим установку волноводов различной геометрической формы. Контур заполнен жидким сплавом $\text{Ga}_{86.3}\text{Sn}_{10.8}\text{Zn}_{2.9}$ wt.%, имеющим следующие физические свойства при рабочей температуре: плотность 6256 кг/м^3 , кинематическая вязкость $3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, электропроводность $3.56 \cdot 10^6 \text{ См/м}$, скорость звука в среде . Металл в контуре приводится в движение при помощи электромагнитного насоса 2. Расход жидкости измеряется электромагнитным расходомером 3. Выходной сигнал расходомера измеряется при помощи электронного вольтметра Agilen 34401A $6 \frac{1}{2}$ Digit Multimeter. Установленный насос позволяет поддерживать расход металла с точностью $0.6 \text{ см}^3/\text{с}$. Для предотвращения нагрева металла за счёт джоулевого тепла контур оборудован системой термостатирования 4. Для предотвращения окисления металла

кислородом атмосферы перед заполнением из контура откачивался воздух вакуумным насосом 8. Измерения скорости проводились при трёх расходах жидкости $Q = 17.5, 32.1, 58.2 \text{ см}^3/\text{с}$.

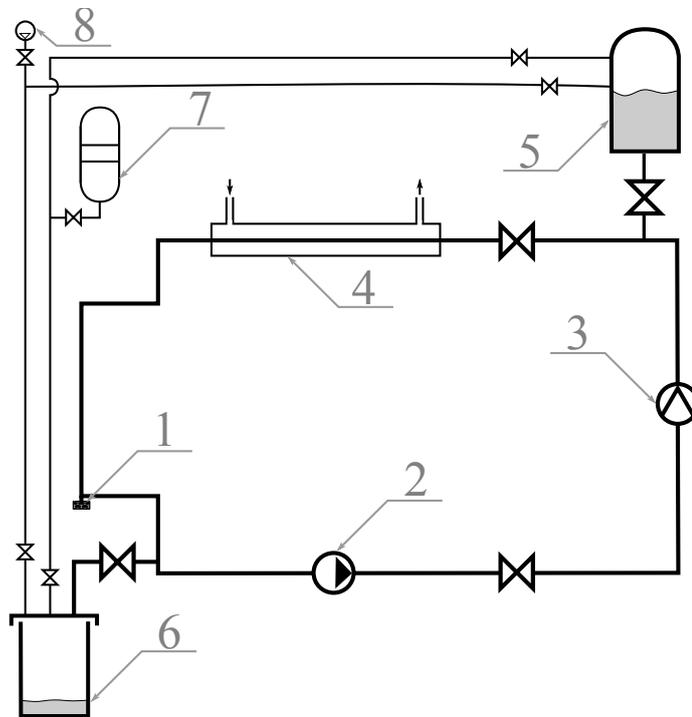


Рис. 1.2. Схема испытательного контура: 1. измерительный модуль УДА, 2. электромагнитный насос, 3. индукционный расходомер, 4. система термостатирования, 5. расширительный бачок, 6. танк-хранилище, 7. атмосфера, 8. вакуумный насос.

Измерительный модуль УДА (рис. 1.3) установлен таким образом, что набегающий однородный поток жидкого металла обеспечивает стационарный профиль скорости на всей глубине проникновения ультразвукового луча. Звуковой луч создаётся датчиком 1 и проходит по волноводу 2 в жидкий металл. Датчик и волновод удерживаются в крепёжной втулке 3. Место контакта волновода с жидкостью герметизируется при помощи резиновой прокладки 4, которая прижимается шайбой 5 под давлением направляющей втулки 6. Крепёжная втулка 3 соединена с каналом 7 сваркой. Для всех использованных волноводов шероховатость звукопроводящих поверхностей и отклонение от торцов цилиндра от плоскопараллельности не превышает 50 мкм.

Перед началом исследований были записаны опорные сигналы скорости без

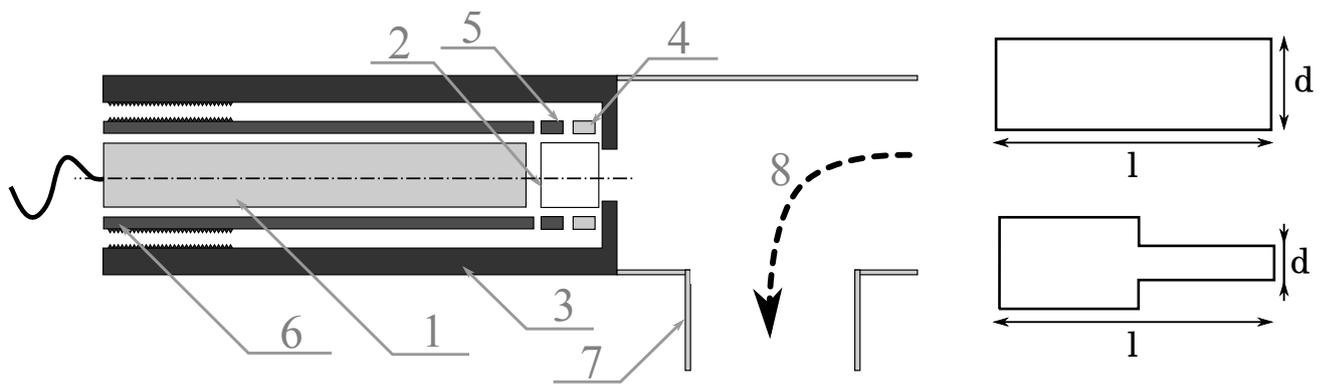


Рис. 1.3. Схема измерительного модуля УДА в разрезе (слева) и схемы двух видов волноводов (справа): 1. датчик УДА, 2. тестовый волновод, 3. крепёжная втулка, 4. уплотняющая прокладка, 5. прижимная шайба, 6. направляющая втулка, 7. канал с жидким металлом, 8. поток металла.

использования волноводов. В этом случае звукоизлучающая поверхность датчика УДА непосредственно контактировала с жидким металлом.

1.2.2. Ультразвуковые измерения

Эффективность прохождения ультразвука через стенки экспериментальной установки определяется разницей акустических сопротивлений материалов стенки и рабочей жидкости. Акустическое сопротивление определяется как произведение скорости звука в среде на её плотность. По мере увеличения разности акустических сопротивлений сред увеличивается доля энергии звуковой волны, отраженной от границы раздела. Уменьшение интенсивности ультразвука порождает сложности при измерениях в силу изменения отношения полезный сигнал/шум. Поскольку в практических приложениях звук проходит через ограниченный в пространстве объём, отражение волн происходит на двух границах раздела – при вхождении звуковой волны в материал стенки и переходе из стенки в объём рабочей жидкости. Доля звуковой энергии прошедшей через стенку определяется не только физическими свойствами веществ, но так же толщиной стенки. Аналитически возможно найти величину коэффициента прохождения звуковой волны через стенку конечной толщины в полубесконечное пространство с отличным от материала стенки звуковым сопротивлением [85]. Коэффициент прохождения волны из среды 1,

имеющей толщину d_1 , в полубесконечную среду 2 можно найти из выражения:

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi d_1}{\lambda_1} \right)}}, \quad (1.1)$$

где $Z_{1,2}$ – акустическое сопротивление материала стенки и рабочей жидкости соответственно, λ_1 – длина волны ультразвука в материале стенки и D – коэффициент прохождения ультразвука через стенку канала.

Ультразвуковой луч не является лучом в строгом геометрическом смысле слова. По мере распространения ультразвука в пространстве форма его луча изменяется, происходит рассеяние энергии звуковой волны, в результате чего звук распространяется конусом с углом раскрытия в несколько градусов. Непостоянство формы фронта волны вдоль ультразвукового луча приводит к осцилляциям дифракционного затухания и повышает рассеяние энергии. Использование волновода позволяет увеличить эффективную длину распространения ультразвука за счет предотвращения отклонения направления распространения волны от заданной траектории.

$$d = \frac{c \cdot n}{2f} \quad (1.2)$$

Таким образом, наибольшая эффективность переноса энергии ультразвуковых волн через стенки рабочего канала при использовании волновода может быть достигнута за счёт двух факторов. Во-первых, уменьшение скачка акустического сопротивления уменьшает интенсивность отраженных от межфазной границы волн. Во-вторых, выбор толщины стенки таким образом, что возникающая между проходящей и отраженной волнами интерференционная картина обеспечивала максимальное излучение ультразвуковых волн внутренней стенкой канала. Исходя из выражений (1.1) толщина стенки должна удовлетворять равенству (1.2), т.е. обеспечивает минимизацию слагаемого связанного со скачком акустических сопротивлений. Здесь d – толщина волновода, c – скорость звука в материале волновода, f – частота ультразвуковой волны, n – натуральное число.

Таблица 1.1. Физические свойства отдельных материалов: Z – акустическое сопротивление, ρ – плотность среды, c – скорость звука в среде, λ – длина волны ультразвука частотой 4 МГц.

Материал	ρ , кг/м ³	c , м/с	Z , кг/м ² ·с	λ , мм
Медь	8960	5010	$1.3026 \cdot 10^7$	1.2525
Нержавеющая сталь	7890	5790	$4.5683 \cdot 10^7$	1.4475
GaZnSn	6256	2828	$1.7691 \cdot 10^7$	0.7070
Жидкий галлий	5910	2740	$1.6193 \cdot 10^7$	0.6850
Органическое стекло	1180	750	$1.6193 \cdot 10^7$	0.6875
Ультразвуковой гель	1030	1550	$0.1597 \cdot 10^7$	0.3875

Распространёнными материалами при работе с легкоплавкими сплавами на основе галлия являются органическое стекло, медь, нержавеющая сталь. Свойства перечисленных веществ приведены в таблице 1.1. Как видно, разница звуковых сопротивлений галлиевых сплавов и оргстекла довольно мала, что позволяет использовать данный материал в конструкции экспериментальных установок. При этом ожидается, что толщина стенок не оказывает существенного влияния на коэффициенты отражения и прохождения ультразвука. Использование металлических стенок требует приложения значительных усилий для обеспечения хорошего акустического контакта между излучателем и рабочей средой. Для этих целей могут использоваться специальные покрытия [145] или волноводы [77, 146]. Тем не менее, как будет показано ниже, использование волноводов даже из материалов обеспечивающих малый скачок акустического сопротивления способно оказать влияние на эффективность и качество измерений скорости.

$$L = \max(z) : \frac{|\bar{V}(z) - V_{flow}|}{|V_{flow}|} < k \quad (1.3)$$

В качестве численной характеристики качества измерений введем эффективную глубину измерений профиля скорости L . Согласно (1.3) L определяется как максимальная глубина z , на которой относительная разница между значением

скорости, измеренным с помощью УДА $\bar{V}(z)$ и с помощью электромагнитного расходомера V_{flow} не превышает k . Для оценки достоверности измерений было принято $k = 0.1$.

Значение скорости V_{flow} определялось из средней скорости потока, исходя из предположения, что поперечный профиль скорости потока в трубе соответствует закону Пуазейля, а ультразвуковой датчик усредняет значения скорости в усеченном конусе с меньшим основанием равным основанию цилиндрического волновода и углу раскрытия 2.21° . Для трёх рассмотренных расходов жидкости $Q = \{17.5, 32.1, 58.2\} \text{ см}^3/\text{с}$, средние по измерительному конусу значения скорости составляют, соответственно, $V_{flow} = \{4.98, 9.15, 16.58\} \text{ м/с}$.

1.2.3. Результаты

На рис. 1.4 и 1.5 представлены профили скорости набегающего на измерительную систему потока жидкого металла при измерениях с использованием волноводов различной длины l и диаметра d и при непосредственном контакте поверхности ультразвукового датчика с жидким металлом (выделены черным цветом на графиках). Можно отметить значительное увеличение пульсационной составляющей потока в измеренном профиле скорости при больших расходах металла, чего не наблюдается при непосредственном контакте датчика УДА с рабочей средой. Кроме того, применение волновода и, как следствие, появление дополнительных границ раздела фаз с различным акустическим сопротивлением приводит к повышению рассеяния энергии ультразвуковых импульсов и ослаблению общей мощности ультразвука, проникающего в объём жидкого металла. Это выражается в уменьшении уровня средней скорости и увеличении пульсаций скорости. В этом случае прибор интерпретирует звуковой шум как наличие пульсаций скорости. Следует оговориться, что здесь и далее речь идёт о скорости в смысле показаний ультразвукового анемометра, а не истинной гидродинамической скорости движения жидкости, поскольку показания расходомера подтверждают

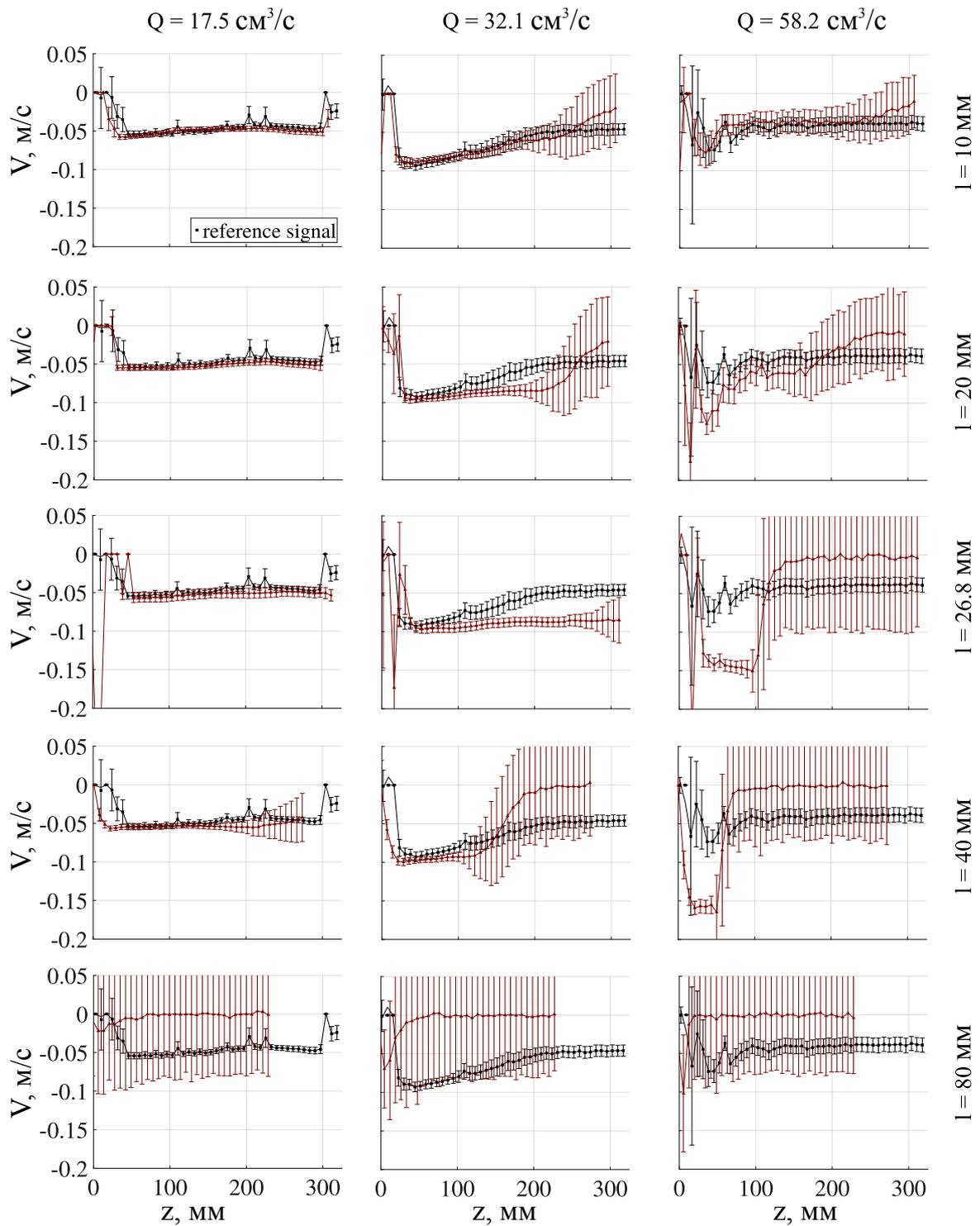


Рис. 1.4. Средние профили скорости набегающего потока жидкости, измеренные при трёх расходах Q жидкого галлиевого сплава через канал. Вертикальные отрезки отмечают среднеквадратичные пульсации скорости. Измерения производились с использованием волноводов из плексигласа диаметром $d = 6 \text{ mm}$ и длинами $l = 10 - 80 \text{ mm}$. Сравнение производится с опорным сигналом (черная кривая), полученным при прямом контакте датчика УДА с жидким металлом.

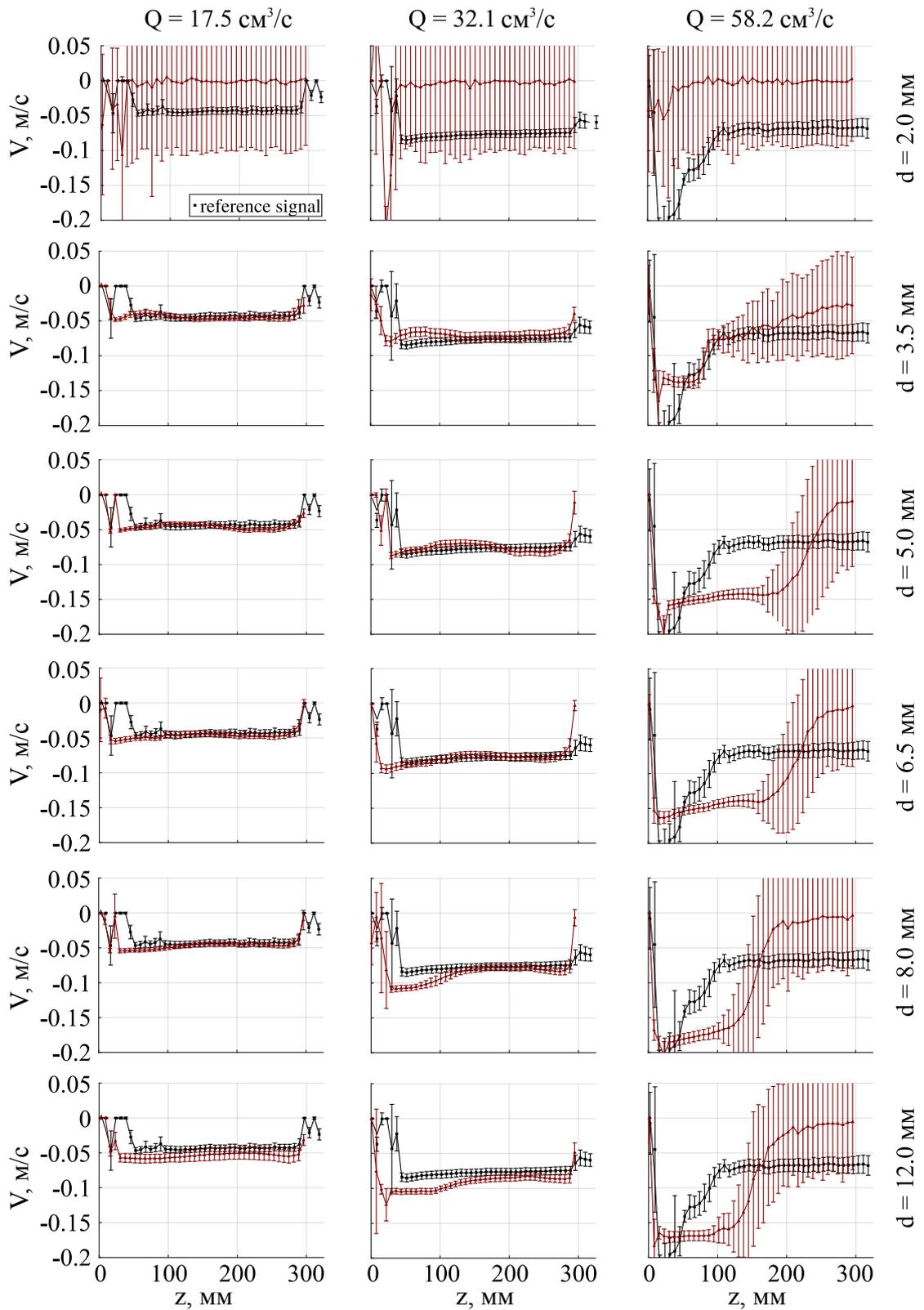


Рис. 1.5. Средние профили скорости набегающего потока жидкости, измеренные при трёх расходах Q жидкого галлиевого сплава через канал. Вертикальные отрезки отмечают среднеквадратичные пульсации скорости. Измерения производились с использованием волновода из плексигласа толщиной $l = 20 \text{ мм}$ и диаметрами $d = 2 - 12 \text{ мм}$.

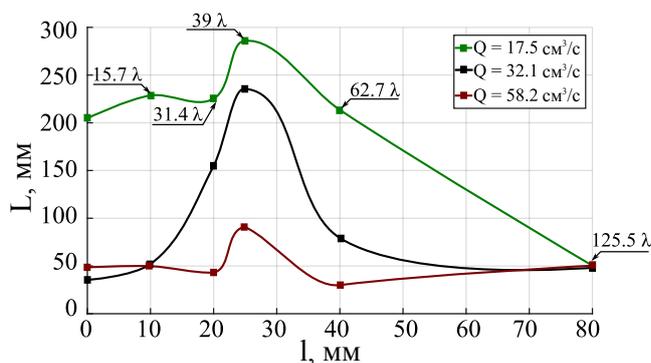


Рис. 1.6. Зависимости параметров качества измерений от длины волновода l .

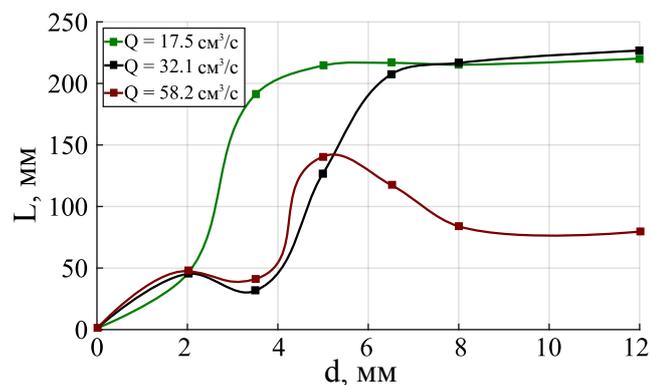


Рис. 1.7. Зависимости параметров качества измерений от диаметра волновода d .

неизменность интегральных характеристик течения, а волновод не вносит дополнительных возмущений в структуру потока. Ослабление энергии ультразвука обуславливается рассеянием звуковых волн в объёме дисперсной смеси жидкий галлий – оксиды галлия, а так же частичным отражением звуковых волн на границах волновода. Усиление снимаемого с пьезоэлемента датчика УДА электрического сигнала ограничено пределом дискретизации АЦП прибора и, при максимально возможном усилении сигнала, приводит так же к усилению шумов, что и «создаёт» пульсации скорости при измерении на большой глубине.

Важно отметить, что длина волны ультразвука в органическом стекле составляет около $\lambda = 0.6875$ мм. Следовательно, в цилиндрический волновод длиной $l = 26.8$ мм укладывается 38.98 длин волн – это самое близкое к целочисленному число длин волн среди всех рассмотренных длин волнопроводов. Данные измерений показывают, что оказывается разумным выполнять как условия минимизации скачка акустического сопротивления, так и кратности целому числу длин волн.

Изменение диаметра волновода позволяет сфокусировать энергию звуковой волны, излучаемой датчиком УДА. Анализ профилей скорости (рис. 1.4) показывает, что использование волновода диаметром меньше диаметра ультразвукового датчика позволяет увеличить эффективную глубину измерения профилей скорости за счет фокусировки луча. В то же время уменьшение диаметра волновода меньше некоторого критического значения приводит к экранировке значительной части

звуковой энергии и нарушении формы излучаемого и принимаемого сигнала за счет дифракции.

На рис. 1.6 приведены характеристики качества измерений средней составляющей скорости течения жидкости. Наибольшая эффективная глубина измерения профилей оказывается при использовании волновода длиной $l = 26.8$ мм, что составляет приблизительно 39λ (несущая частота ультразвука 4 МГц). Величина коэффициента прохождения в этом случае стремится к единице ($D \rightarrow 0.999$). Хорошо видно, насколько снижается качество измерения профилей скорости при увеличении длины волновода.

Рис. 1.7 демонстрирует зависимость характеристики качества ультразвуковых измерений скорости от диаметра волновода. Изменение диаметра волновода оказывает относительно слабое влияние на качество измерений при условии преодоления порога, при котором происходит разрушения плоского фронта звуковой волны на границах волновода. Тем не менее, наилучшие характеристики измерений оказываются при использовании волноводов диаметрами 5.0 и 6.5 мм. Этот эффект достигается за счет фокусировки ультразвукового луча стенками волновода.

Предполагается, что ступенчатая форма волновода (тип II) позволяет вырезать центральную часть, соответствующую наименьшим углам расходимости, из конуса распространения ультразвука. Оговоримся, что ступенчатая форма волновода типа II связана с конструктивными требованиями монтажа волновода в измерительный блок. При этом изменяется диаметр фронтальной части волновода. Для краткости и удобства описания назовём эту часть волновода «ступенью». Анализ профилей скорости (рис. 1.4), полученных при использовании волноводов различного радиуса, позволяет высказать следующую гипотезу о механизме влияния формы волновода на качество измерений. При наименьшем диаметре ступени ($d = 2.0$ мм) наблюдается почти полное отсутствие полезного сигнала. В этом случае происходит нарушение плоскопараллельного распространения ультразвука, вследствие чего не может происходить нормальный процесс изучения и приёма отраженных (ультра)звуковых пакетов. Иными словами, ступень наименьшего диаметра

действует как звукорассеивающее препятствие. Волновод со ступенью диаметром 3.5 мм обеспечивает те же возможности измерения профилей скорости, что и отсутствие волновода при умеренных расходах жидкости ($Q = 17.5$ и 32.1 см³/с). При максимальном расходе $Q = 58.2$ см³/с волновод обеспечивает сравнительно небольшую глубину измерений (горизонтальный участок профиля скорости), хотя и большую, чем в опорном измерении. Дальнейшее увеличение диаметра ступени слабо сказывается на качестве измерений при расходах $Q = 17.5$ и 32.1 см³/с. Рис. 1.7 демонстрирует асимптотический рост эффективной глубины измерений с выходом на участок плато при увеличении диаметра ступени при умеренных расходах. При максимальном расходе жидкости наблюдается локальный максимум эффективной глубины измерения с дальнейшим выходом на участок постоянных значений. Это может быть связано с искажением звукового поля датчика УДА. Диаметр пьезоэлемента датчика составляет 8.0 мм [147]. Потому, при использовании волноводов диаметром большим или равным этому значению весь звуковой луч проходит через волновод без существенных искажений. И потому данные измерений проведённых с волноводами диаметрами $d = 8.0$ и 12.0 мм оказываются практически идентичными. В то же время волноводы со ступенью достаточно большого диаметра, чтобы не нарушать процесс измерений, но меньшего, чем диаметр пьезоэлемента предположительно отсекают часть конуса расходящегося ультразвукового луча: часть колебаний распространяется плоскопараллельно и проходит через ступень в жидкость, другая же часть отражается и рассеивается на кольцевой области вне ступени за счет сравнительно малой площади для распространения. В результате происходит как бы выделение центральной части звукового конуса, обладающей наименьшим углом расходимости.

Снижение эффективности и качества измерений скорости при увеличении скорости потока жидкости Q обусловлено несколькими факторами. Первый – частичная турбулизация потока. Для рассматриваемых расходов $Q = \{17.5, 32.1, 58.2\}$ см³/с, средние числа Рейнольдса потока составляют $Re = \{700, 1300, 2400\}$ соответственно. Поток с максимальной рассматриваемой скоростью является

турбулентным. В то же время ультразвуковой датчик измеряет только усредненную составляющую скорости. Кроме того, развитие турбулентности уменьшает среднюю скорость осевого потока и выравнивает профиль поперечной скорости. Так же развитие турбулентности приводит к увеличению эффективности тепло-массопереноса в потоке, что должно влиять на распределение звукоотражающих частиц. Повышение эффективности перемешивания оксидных частиц также может привести к увеличению рассеяния ультразвука на хаотических движущихся трассерах. Таким образом, с увеличением расхода жидкости эффективная глубина прохождения ультразвука уменьшается из-за процессов рассеивания звуковой энергии в неоднородном турбулентном потоке.

Из рис. 1.4 и 1.5 можно видеть, что качество измерений снижается по мере роста расхода жидкости даже в отсутствии волновода (опорный сигнал). При расходе $Q = 32.1 \text{ см}^3/\text{с}$ величина измеренной скорости падает почти вдвое по мере удаления точки измерений от датчика УДА. В то же время, значения скорости на начальном участке профилей, полученных с использованием волновода и в опорном измерении, совпадают. Отдельные волноводы обеспечивают постоянство составляющей средней скорости на гораздо большем расстоянии, чем опорный сигнал. В потоке с расходом $Q = 58.2 \text{ см}^3/\text{с}$ средняя составляющая скорости измеряемая УДА намного ниже, чем скорость рассчитанная по показаниям электромагнитного расходомера. Использование волноводов при этом обеспечивает наличие на профилях скорости участка со значениями близкими к расчетным (например, рис. 1.4: $l = 26.8 \text{ мм}$ или рис. 1.5: $d = 5.0 \text{ мм}$ и $d = 6.5 \text{ мм}$). С одной стороны это указывает на положительное влияние волноводов со специфическими геометрическими параметрами на качество измерений, а с другой стороны позволяет сделать вывод, что ухудшение качества измерений связано с распространением ультразвука. Потому мы полагаем, что основной причиной снижения эффективности измерения скорости является именно увеличение рассеяния ультразвука из-за усиленного перемешивания оксидных частиц при высоких расходах жидкости.

Как было отмечено выше, плексиглас имеет акустическое сопротивление,

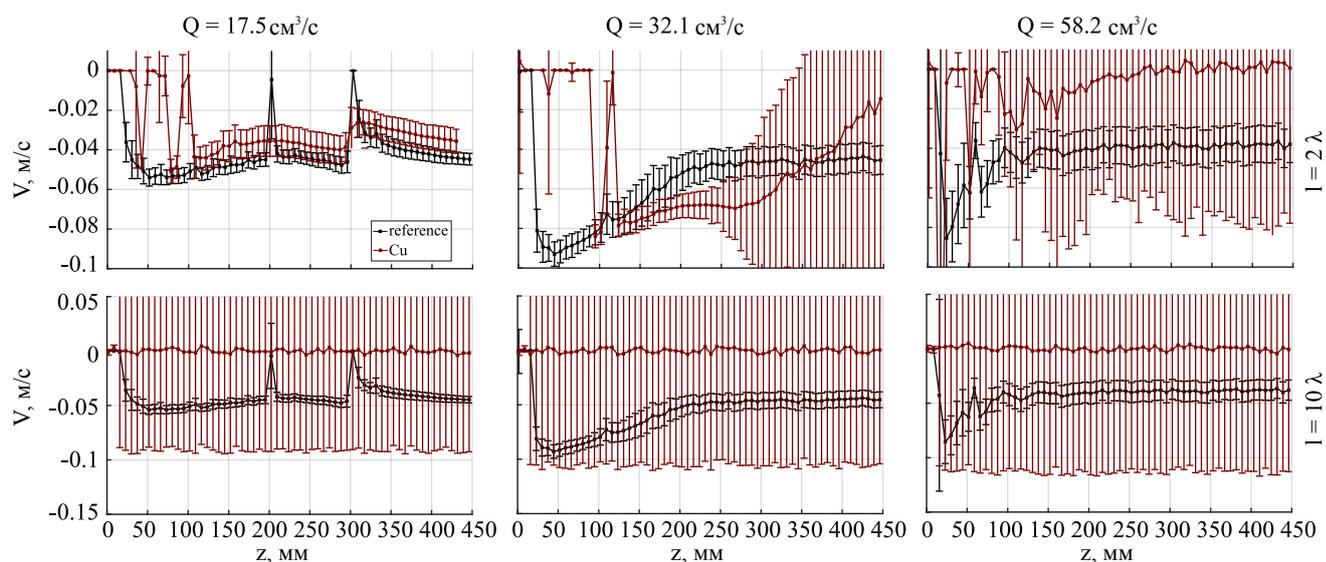


Рис. 1.8. Средние по времени профили скорости набегающего потока, измеренные при трех расходах Q жидкого металла с использованием медных волноводов длиной $l = 2.5$ и 12.5 мм (2 и 10 длин волн λ соответственно).

близкое к сопротивлению используемого галлиевого сплава. Однако в экспериментальных исследованиях не всегда возможно минимизировать скачок акустического сопротивления между материалом стенки и жидкостью. Рассмотрим цилиндрические волноводы из металлов (меди и нержавеющей стали) длиной, кратной целому числу длин волн в рассматриваемых материалах. Скачок акустического сопротивления $\left| \frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right|$ составляет 0.63 для меди и 2.20 для нержавеющей стали.

На рис. 1.8 и 1.9 представлены профили скорости полученные при измерениях с цилиндрическими волноводами (тип I), изготовленными из меди и нержавеющей стали толщиной 2 и 10 длин волн λ (2.5 мм и 12.5 мм для меди и 2.9 мм и 14.5 мм для нержавеющей стали). Для обеспечения лучшего механического контакта между материалом волновода и жидкостью металлические волноводы перед установкой в измерительный модуль были облужены в галлиевом сплаве.

Результаты, представленные на рис. 1.8 и 1.9, повторяют общие тенденции, наблюдаемые при использовании волноводов из оргстекла. Волноводы длиной 2λ позволили получить профили скорости схожие с опорным сигналом при умеренных расходах жидкости ($Q = 17.5$ и 32.1 см³/с). В то же время при максимальном расходе металлические волноводы не позволили получить сколько-нибудь надёжные

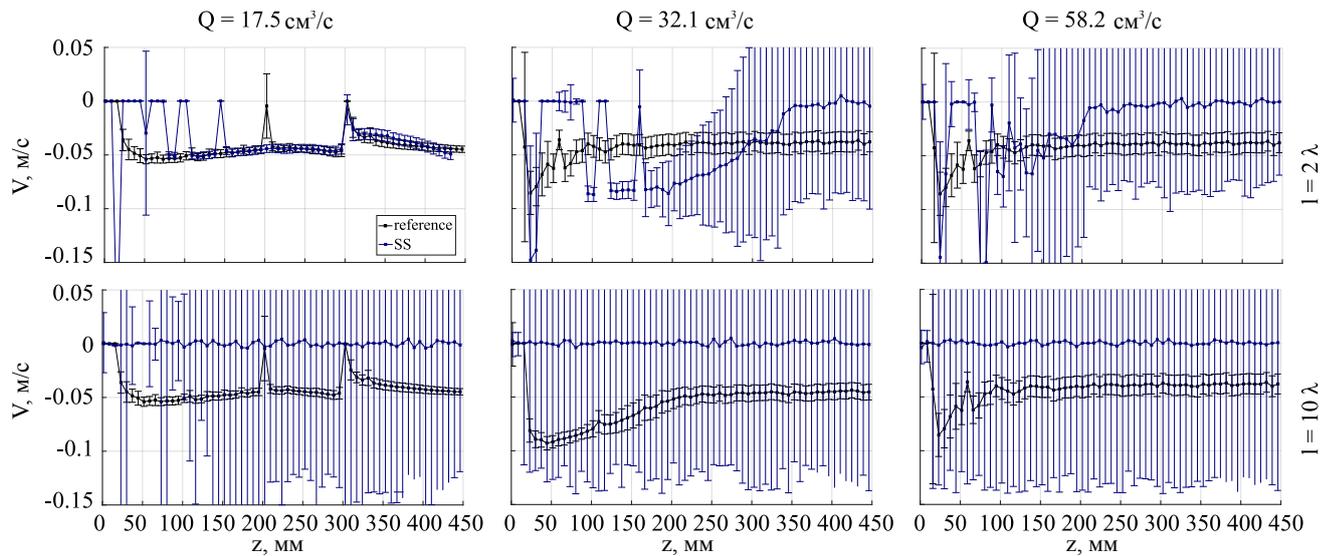


Рис. 1.9. Средние по времени профили скорости набегающего потока, измеренные при трех расходах Q жидкого металла с использованием волноводов из нержавеющей стали длиной $l = 2.9$ и 14.5 мм (2 и 10 длин волн λ соответственно).

профили скорости. Сигнал, полученный с применением волноводов из меди и нержавеющей стали длиной 10λ представляет собой акустический шум и не позволяет получить сведения о скорости потока.

Снижение качества измерений при использовании металлических волноводов может быть связано с возникновением вторичных акустических мод в волноводах вследствие высокой разницы акустических сопротивлений материалов ультразвукового датчика, волновода и жидкого металла. Полное разрушение полезного сигнала при использовании металлических волноводов длиной 10λ может объясняться возникновением большего количества вторичных мод колебаний по сравнению с «тонкими» волноводами длиной 2λ . Как и в случае волноводов из оргстекла, наибольшие трудности связаны с измерением наиболее интенсивного потока ($Q = 58.2$ см³/с). Сравнивая профили представленные на рис. 1.8 и 1.9 и на рис. 1.4 можно заключить, что волноводы из меди и нержавеющей стали не позволили получить достоверные профили скорости при максимальном расходе жидкого металла. В дополнение к вышеуказанным причинам ухудшения сигнала при повышении скорости течения жидкости, можно высказать гипотезу, что значительное отражение ультразвуковых импульсов снижает долю энергии попадающей в жидкость.

При этом в жидкости происходит рассеяние той части энергии ультразвуковых колебаний, которая проходит через волновод. Наличие участка с нулевой скоростью на профилях, полученных при расходах $Q = 17.5$ и $32.1 \text{ см}^3/\text{с}$ и длине волноводов 2λ мы объясняем звоном металлических волноводов, возникающим вследствие плохого демпфирования вторичных акустических мод.

Обобщая результаты, можно утверждать, что стенки экспериментальной ячейки, выполненной из органического стекла толщиной не более 10 мм не окажут заметного влияния на качество ультразвуковых измерений на глубине до 100 мм. Использование стенок толщиной, кратной целому числу длин волн, позволит повысить эффективную глубину измерений, однако приведёт к возникновению дополнительных технических сложностей при изготовлении экспериментальной ячейки, связанных с точным заданием толщины и полировкой стенок относительно большой протяжённости. Кроме того, применение волновода определённых геометрических параметров позволяет повысить эффективную глубину измерений скорости и стабильность получаемых профилей по сравнению с конфигурацией непосредственного контакта датчика с рабочей средой. Положительный эффект достигается за счет фокусировки ультразвукового луча стенками волновода.

Поэтому для работ по исследованию структуры вихревых течений было решено использовать ячейку из плексигласа с толщиной стенок 10 мм – эта толщина является одним из промышленных стандартов производства органического стекла, что значительно упрощает изготовление экспериментальной ячейки.

1.3. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 1.10) включает в себя кювету из органического стекла 1, заполненную жидким галлиевым сплавом (температура плавления 17.8°C); С-образный индуктор 2, порождающий течение металла за счёт индуцирования в металле токов под действием переменного поля и возникновения электромагнитных сил. Питание индуктора осуществляется от источника тока 3

Pacific Smart Source 360 ASX-UPC3. Величина индукции магнитного поля в зазоре электромагнита определяется силой тока питания катушек индуктора. Последняя измеряется при помощи токовой платы National Instruments NI 9227.

Измерение и реконструкция профилей скорости жидкого металла в выбранном сечении кюветы осуществлялись при помощи ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) DOP 2000, Signal Processing, Switzerland. Датчик УДА 4 располагался на расстоянии 16 мм от края кюветы (в области изменений структуры течений). Используемый в качестве рабочего тела галлиевый сплав при рабочей температуре имеет следующие свойства: плотность 6256 кг/м^3 , кинематическая вязкость $3.1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, проводимость $3.56 \cdot 10^6 \text{ См/м}$.

Кювета имеет рабочую полость в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами сторон $(200 \times 100 \times 10) \text{ мм}^3$. Размеры полюсов индуктора $d_x = 69 \text{ мм}$ на $d_y = 57 \text{ мм}$. Поскольку омические потери при протекании по металлу индуцированных токов, а также вязкое трение жидкости приводят к значительному разогреву рабочей среды, в кювете размещен спай термопары К-типа (хромель-алюмель). Положение полюсов индуктора относительно слоя металла определяется параметром δ – расстоянием между геометрическими центрами слоя и полюсов

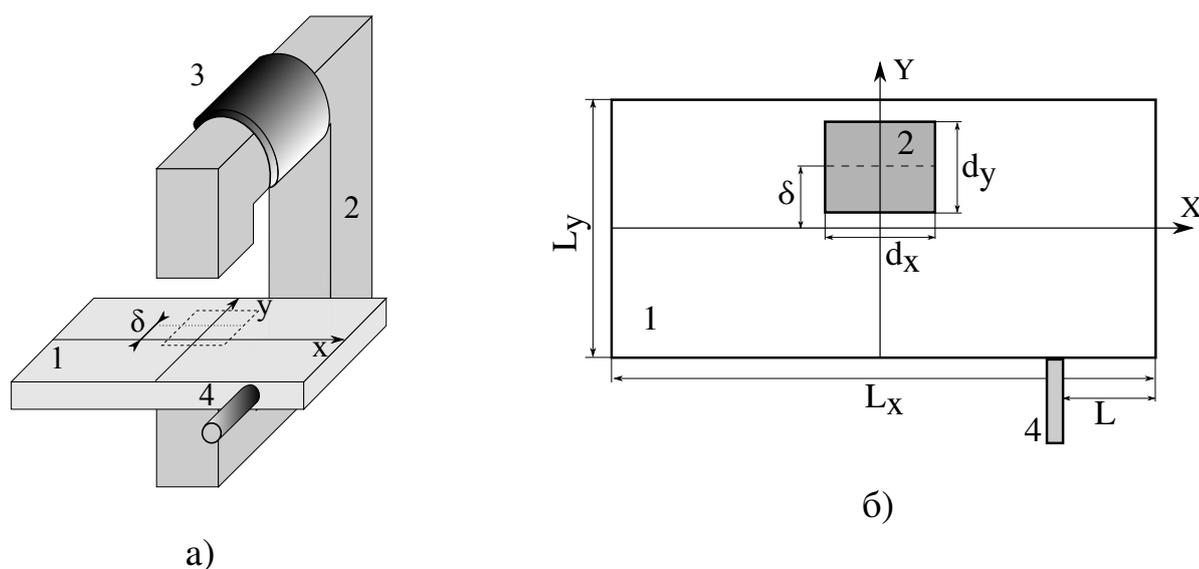


Рис. 1.10. Схема экспериментальной установки (а – общий вид, б – вид сверху): 1. кювета с жидким металлом, 2. С-образный индуктор, 3. катушки, 4. датчик УДА.

вдоль оси ОУ. В ходе всех экспериментов температура металла была в интервале от 35 до 40°С. Это достигалось за счет баланса между нагревом металла за счет омических потерь и вязкого трения и теплообмена с окружающей средой через стенки кюветы.

Перед началом опытов была найдена зависимость величины магнитного поля в зазоре индуктора от силы питающего тока катушек. Измерения производились при помощи тесламера Lake Shore 421 Gaussmeter с точностью 1 мкТл. Кроме того, найдены пространственные профили магнитного поля вдоль координатных осей. Можно считать, что магнитное поле имеет лишь вертикальную (ортогональную к поверхности слоя металла) компоненту, поскольку её величина превышает величины планарных компонент вектора магнитной индукции на два порядка.

Измерения зависимости электромагнитной силы от величины и частоты внешнего поля проводились на модельной установке. Установка состоит из электромагнита переменного поля в зазор которого помещена алюминиевая пластина толщиной 3 мм. Пластина крепится на одном из концов рычага, выполненного из органического стекла. Другой конец рычага закреплён упругим резиновым шнуром таким образом, что в отсутствие внешнего магнитного поля пластина находится в равновесии (при этом нижний край пластины находится на уровне нижнего края полюсов электромагнита). Конец рычага, на котором размещена алюминиевая пластина, так же соединён с грузиком (массой $m = 200$ г) при помощи нерастяжимой нити. Весы (точность измерения 0.01 г), на которые помещён грузик калиброваны таким образом, что в отсутствие внешнего поля показывают массу груза равной нулю. В момент включения питания катушек индуктора, в зазоре образуется переменное магнитное поле, которое порождает в проводящей пластине вихревые токи. Взаимодействие этих токов с исходным магнитным полем приводит к появлению выталкивающей силы F . Поскольку пластина закреплена на одном из плеч рычага, образуется момент сил, стремящийся повернуть рычаг. С другой стороны, на конце рычага закреплён грузик, на который действует сила тяжести $m \cdot g$, порождающая свой крутящий момент. За счет взаимной компенсации двух

моментов рычаг находится в состоянии механического равновесия. При этом эффективный вес грузика изменяется под действием подъёмной силы со стороны рычага. Зная эффективную массу груза Δm по показаниям весов и длины плеч r_1 и r_2 , легко найти величину электромагнитной силы, согласно соотношению (1.4), проистекающему из равенства моментов сил.

$$F = \frac{r_2 \cdot g \cdot \Delta m}{r_1} \quad (1.4)$$

По описанной методике были получены зависимости величины электромагнитной силы от величины (рис. 1.11а) и частоты (рис. 1.11б) питающего индуктор тока. Величина силы Лоренца имеет квадратичную зависимость от тока. В то же время, при увеличении частоты тока, величина электромагнитной силы выходит на участок насыщения начиная с 75 Гц. Для достижения максимального влияния на жидкий металл со стороны внешнего магнитного поля, в гидродинамических экспериментах использовалось магнитное поле с частотой 100 Гц. Толщина скин-слоя при данной частоте более чем в два раза превышает толщину слоя металла.

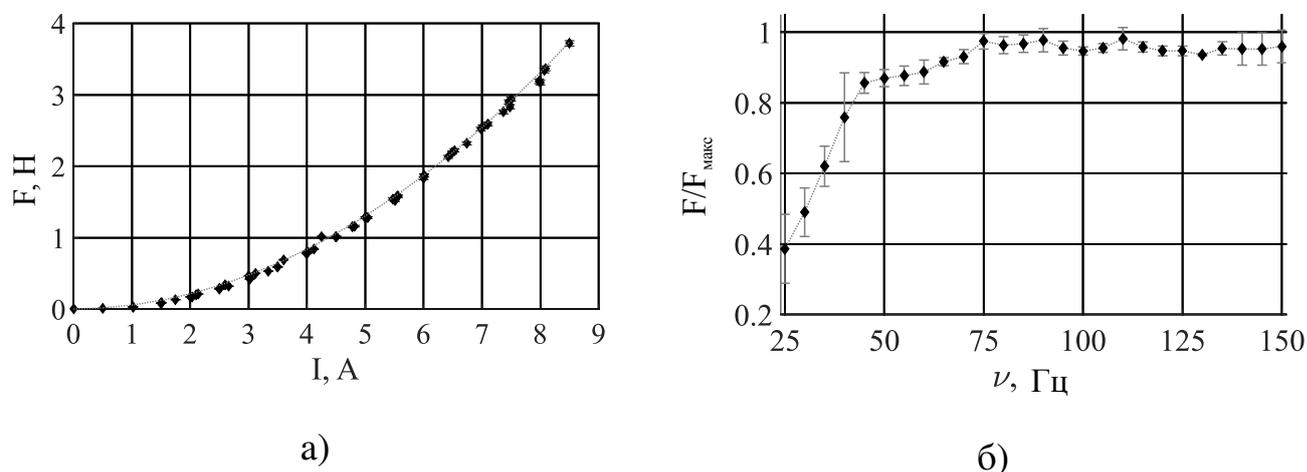


Рис. 1.11. Зависимость величины электромагнитной силы от а) силы питающего тока (сплошная линия отмечает аппроксимацию экспериментальных данных квадратичной функцией); б) частоты питающего тока.

Основной вклад в погрешность определения электромагнитной силы вносит погрешность измерения эффективной массы грузика. В случае высокочастотного воздействия (с частотой более 50 Гц) влияние инерционных эффектов мало,

поскольку система не успевает совершать отклик на каждое колебание магнитного поля (и следовательно силы F). При малых (ниже 50 Гц) частотах инерция приводит к колебаниям грузика на весах, что понижает точность измерения.

Для вертикальной компоненты индукции магнитного поля была найдена зависимость от питающего тока вида $B(I) = 4.89 \cdot I$ мТл. Стоит отметить, что магнитное поле локализовано в области полюсов индуктора. Величина магнитной индукции уменьшается более чем в два раза на расстоянии около 20 мм от края полюсов.

1.4. Характеристики течений

Основными ожидаемыми структурами течения являются два и четыре крупномасштабных вихря. Для качественного определения этих структур введём параметры C_{2v} и C_{4v} .

$$C_{iv} = \left\langle \frac{\int_0^{L_y} V(t, y) \cdot \sin(i\pi y/2L_y) dy}{\sqrt{\int_0^{L_y} V^2(t, y) dy + \int_0^{L_y} \sin^2(i\pi y/2L_y) dy}} \right\rangle_t \Big|_{i=2,4} \quad (1.5)$$

Параметры C_{iv} характеризуют корреляцию измеренных профилей скорости с соответствующими модельными профилями.

Здесь $V(t, y)$ – измеренное значение скорости в точке с координатой y в момент времени t , L_y – ширина слоя в направлении ОУ, угловыми скобками с индексом обозначено осреднение по времени. Параметры C_{iv} представляют собой нормированные кросс-корреляционные функции измеренных и модельных профилей скорости. Модельные профили являются идеализированными версиями двухвихревого (первая мода) и четырёхвихревого (вторая мода) течений. Отличие C_{iv} от нуля означает, что измеренный профиль скорости качественно близок к модельному профилю. Таким образом, можно определить границу между режимами

возникающих течений.

$$W_f = \langle V(y, t)^2 \rangle_t \Big|_{y=y_0} \quad (1.6)$$

$$W_p = \langle (V(y, t) - \langle V(y, t) \rangle_t)^2 \rangle_t \Big|_{y=y_0} \quad (1.7)$$

Для качественной характеристики течений введём среднюю локальную энергию течения и среднюю локальную энергию пульсаций скорости согласно соотношениям (1.6) и (1.7) как средние по времени от квадрата скорости в выбранной точке профиля и квадрата скорости пульсаций в выбранной точке профиля соответственно. Скорость пульсаций 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.

$$k_S = \frac{1}{v_{max} - v_{min}} \sum_i \frac{E(v_i) \cdot \Delta v}{E_{max}} \quad (1.8)$$

В качестве частотной характеристики осцилляций крупномасштабных вихрей введём выделенную частоту колебаний профиля скорости 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 присваивается нулевое значение. В качестве меры наличия в спектре выделенной частоты введём коэффициент k_S согласно соотношению (1.8), как среднее по частотам от нормированной на единицу спектральной плотности энергии. Определенный таким образом коэффициент имеет предельное значение, равное единице, при полностью заполненном спектре. Пороговым было принято значение $k_S^* = 0.2$. При превышении k_S^* спектр сигнала считался заполненным без выделенных частот. На рис. 1.12 приведены примеры нормированных на максимальное значение спектров сигналов, отвечающих малым (рис. 1.12а) и большим (рис. 1.12б) значениям k_S .

Интенсивность воздействия электромагнитного поля на жидкий металл может

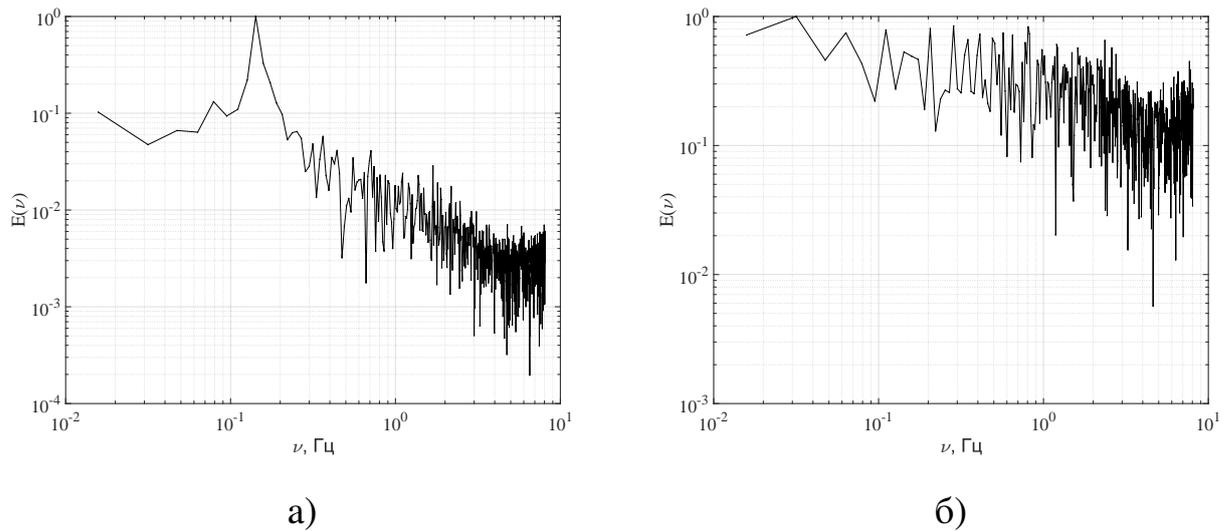


Рис. 1.12. Примеры спектров сигналов, отвечающих различным значениям коэффициент k_S : а) $k_S = 0.05$, б) $k_S = 0.25$.

быть описана безразмерным силовым параметром

$$S = \frac{d_Z h B_0^2}{\mu_0 \rho \nu^2}, \quad (1.9)$$

где d_Z — высота слоя металла, h — толщина немагнитного зазора индуктора, B_0 — амплитудное значение магнитной индукции в зазоре, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная, ρ — плотность металла, ν — кинематическая вязкость.

1.5. Методы измерений

Для изучения структуры течения жидкого металла в слое используется ультразвуковой доплеровский анемометр. В ходе ультразвуковых измерений находились профили скорости вдоль оси ультразвукового луча в выбранном сечении слоя металла. Временной промежуток между записями профилей скорости, при оптимальных параметрах настройки УДА, составляет 124.9 мс, что накладывает ограничение на максимально разрешимую частоту 4 Нз при спектральном анализе колебаний скорости.

1.5.1. Особенности ультразвуковых измерений скорости жидкого металла

В ходе предварительных опытов было установлено, что качество сигнала УДА ухудшается со временем вплоть до полной потери полезного сигнала, что может быть связано с перераспределением звукоотражающих частиц в объёме жидкого металла. Для получения достоверных экспериментальных данных была разработана специальная методика измерений, учитывающая особенности поведения исследуемой системы [10]. Методика была испытана и опробована на колебательном течении, средняя интенсивность которого остаётся постоянной, а характерный период гидродинамических пульсаций не превышает 4 Гц. Более подробно структура и эволюция течения будут описаны ниже (раздел 1.6.1).

Первым шагом к исключению факторов, ухудшающих качество измерений скорости стало изучение эволюции энергии течения со временем при постоянных внешних условиях. Была произведена запись профилей скорости при помощи УДА в течении 66 минут (2^{15} профилей). Для дополнительного контроля в крышку кюветы был вмонтирован кондукционный датчик скорости (КДС). В дальнейшем при обработке данных УДА рассматривалась точка профиля лежащая в области размещения КДС. Сигналы КДС и термопары записывались параллельно данным УДА. Это позволяло производить качественное сравнение эволюции сигналов двух независимых методов. Важно отметить, что принцип работы КДС основан на генерации ЭДС потоком жидкого металла и не зависит от акустических свойств среды. После окончания измерений, каждая запись разделялась на 30 отдельных частей. По каждой части находилось среднее значение интересующих нас величин. Для характеристики качества профилей скорости введём величину N_l – относительное количество «потерянных» точек профиля. «Потерянной» считалась точка, значение которой не превышает 5% от минимума скорости. Величина N_l определялась как отношение количества «потерянных» точек к общей длине временного ряда скорости.

Анализ измерений УДА показывает значительный спад энергии течения

W_f , определяемой по показаниям УДА, после примерно 30 минут измерений (рис. 1.13а), в то время как литературные источники [64] говорят о постоянной во времени средней энергии течения. Для исследования этой особенности была найдена зависимость N_l от времени (рис. 1.13б). Таким образом, мы пришли к выводу, что долговременные (более 2000 с) измерения скорости, проводимые с помощью УДА, не дают качественных результатов.

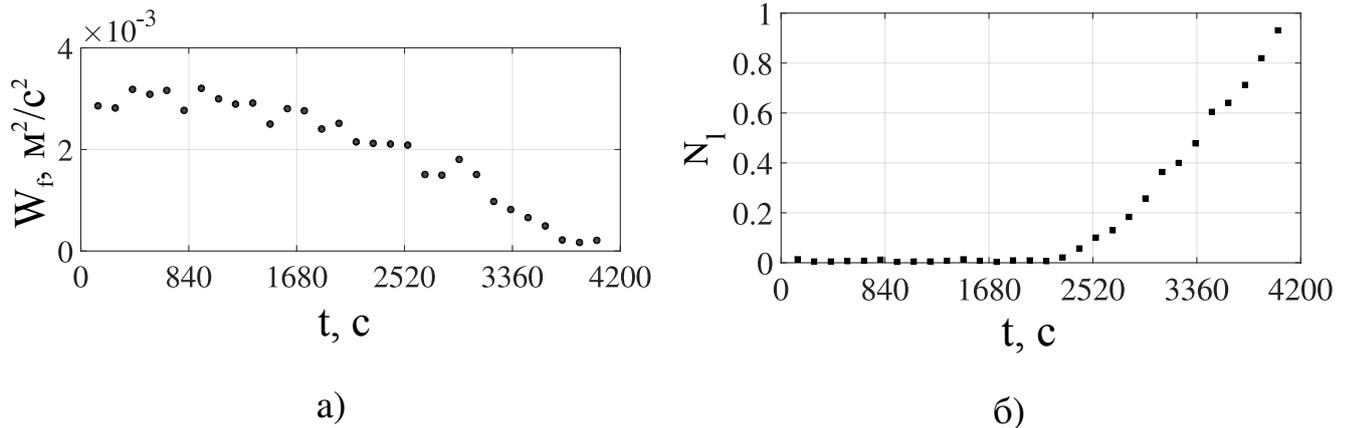


Рис. 1.13. Эволюция средней кинетической энергии, определяемой по показаниям УДА, (а) и числа потерянных точек профиля скорости (б) со временем.

Перемешивание и нагрев жидкого металла, а также высыхание ультразвукового геля могут влиять на процесс измерения скорости. Следующим шагом в работе стала попытка устранить влияние этих факторов. Измерения скорости слабоинтенсивного течения производились при помощи УДА при питающем токе силой 4.0 А и частотой 50.0 Гц (силовой параметр $S \sim 3 \cdot 10^8$). Каждый эксперимент состоял из 12 записей профилей скорости. Время одной записи составляло 256 с (2048 профилей скорости). Перемешивание металла осуществлялось течением высокой интенсивности (ток питания 8.0 А, $S \sim 6 \cdot 10^8$) в течении 180 с.

В первом эксперименте измерения проводились без замены высыхающего геля в интервалах между записями профилей скорости (режим 2.1). Во втором случае производилась обновление геля после каждой записи (режим 2.2). В третьем эксперименте (режим 2.3) жидкий металл в кювете предварительно нагревался до 50°C в системе термостатирования. После этого повторялся режим 2.1. На рис. 1.14

показаны зависимости энергии течения W_f и количества потерянных точек N_l времени. Видно, что все режимы перемешивания металла позволяют добиться постоянства средней энергии течения во времени. В то же время, пульсационная составляющая энергии течения возрастает со временем. При этом КДС показывает постоянство как средней так и пульсационной составляющей скорости. Временные ряды N_l являются даже более важной характеристикой качества сигнала, чем W_f . Рис. 1.14б иллюстрирует повышение стабильности измерений при предварительном подогреве металла. В этом режиме количество потерянных точек не превышает 7%. Перемешивание металла при изменении температуры влечёт к потере до 60% полезного сигнала. Следовательно, предварительный подогрев жидкого металла и постоянство температуры рабочей среды во время измерений повышают стабильность измерений скорости и энергетических характеристик течения.

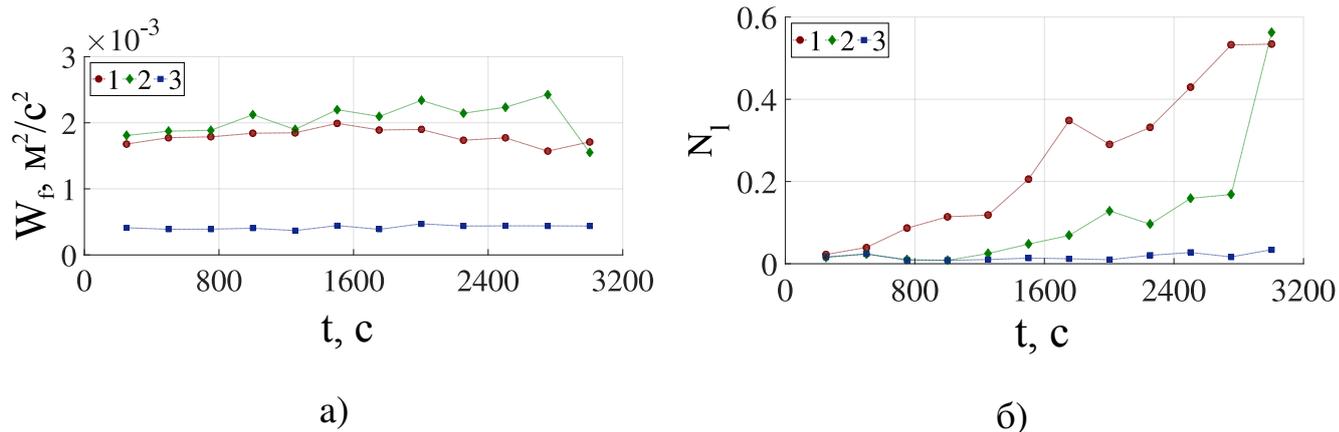


Рис. 1.14. Эволюция средней кинетической энергии (а) и числа потерянных точек профиля скорости (б) со временем: 1 – перемешивание после каждой серии записей профилей скорости, 2 – обновление ультразвукового геля и перемешивание после каждой серии записей, 3 – предварительный подогрев металла перед началом измерений и перемешивание после каждой серии измерений.

На следующем этапе работы было найдено оптимальное время релаксации системы. Под релаксацией здесь понимается временной отрезок, в течение которого происходит теплообмен с окружающей средой без внешнего электромагнитного воздействия. Этот период должен иметь наименьшую возможную продолжительность и при этом обеспечивать постоянство средних по времени характеристик среды и течения. Для определения времени релаксации была проведена серия

дополнительных экспериментов. Идеологически повторялся режим 2.3 – металл подогревался перед началом измерений. В дальнейшем среда перемешивалась течением высокой интенсивности ($S \sim 6 \cdot 10^8$). Измерения проводились в течении 1956 с (16384 профилей скорости). Каждый сигнал разделялся на 20 частей. Как и в предыдущих случаях, на каждом временном отрезке рассчитывались средние по времени величины. После каждого измерения начинался процесс релаксации системы длительностью 15, 30, 45 или 60 минут. По завершении времени релаксации измерение повторялось.

Используя описанную методику, были получены зависимости W_f и N_l от времени для пяти времён релаксации (рис. 1.15). Ожидалось, режим после 60 минут релаксации будет наиболее близок к начальному состоянию. Тем не менее, установлено, что промежутки релаксации в 15 и 30 минут обеспечивают уровень энергии течения, количественно согласующийся с измерениями в начальном состоянии. Кроме того, во всех режимах величина N_l не превышала 5%, хотя режим с периодом релаксации 30 минут обеспечивает наибольшую потерю полезного сигнала. Таким образом, наиболее удобным для эксперимента был выбрано время релаксации 15 минут. В этом случае рост N_l не превышал процента.

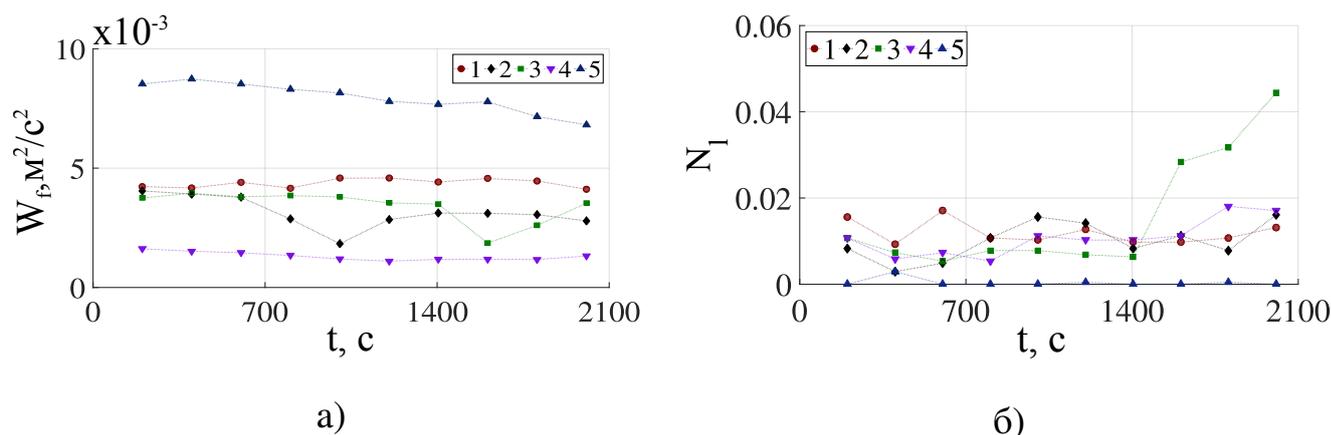


Рис. 1.15. Эволюция средней кинетической энергии (а) и числа потерянных точек профиля скорости (б) со временем при различных периодах релаксации системы: 1 – начальное состояние, 2 – период релаксации 15 минут, 3 – период релаксации 30 минут, 4 – период релаксации 45 минут, 5 – период релаксации 60 минут.

Результаты подготовительной работы позволили разработать методику изме-

рений, обеспечивающую высокое качество и воспроизводимость энергетических характеристик и заключающаяся в строго периодичном включении питания индуктора. Это обеспечивало снижение омических потерь до величины, постоянной в ходе опыта. Постоянство температуры обеспечивалось в дальнейшем балансом между теплоотдачей в окружающую среду и нагревом за счет вязкого трения и джоулева тепла в ходе измерений. После выхода в область рабочих температур металла, течение останавливалось и наступал период релаксации системы. После периода релаксации, на источнике питания задавались частота и сила тока, производились измерения скорости. На рис. 1.16а представлены временные ряды скорости, полученные при непосредственном измерении и с использованием разработанной методики. Хорошо видна разница в двух сигналах: без применения описанной методики сигнал представляет собой редкие выбросы на фоне нулевого сигнала. Так же было произведено качественное сравнение эволюции кинетической энергии среднего течения, рассчитанной по показаниям УДА и КДС (рис. 1.16б). В силу технической сложности тарировки КДС, количественное сравнение сигналов не представляется возможным. Тем не менее, качественно характер эволюции энергии течения, найденной двумя методами совпадает. Крайне малые изменения энергии течения, записанные при помощи КДС и УДА, подтверждают неизменность характера течения, что согласуется с предыдущими исследованиями [64].

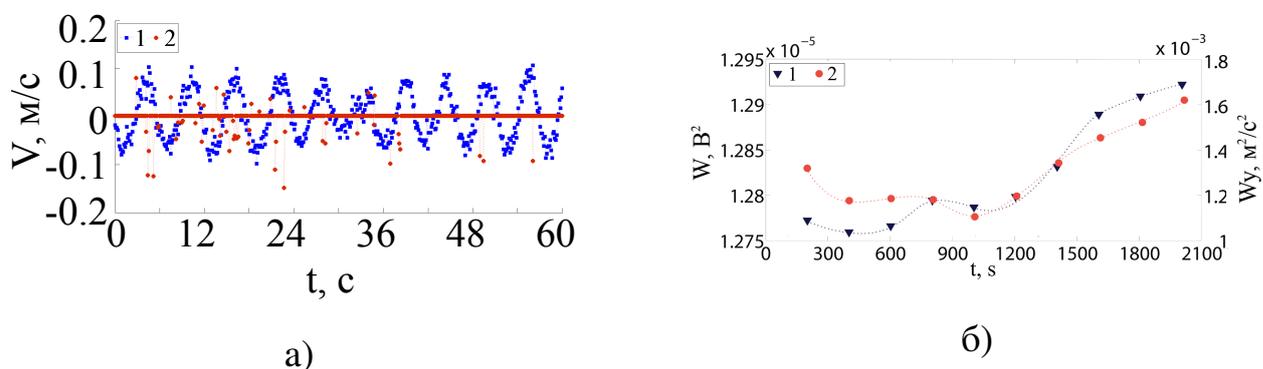


Рис. 1.16. а) Временной ряд скорости в точке профиля: 1 – измерения с использованием разработанной методики, 2 – непосредственное измерение скорости; б) Эволюция кинетической энергии среднего течения: 1 – показания УДА, 2 – показания КДС.

1.6. Структура плоского вихревого течения

1.6.1. Четырёхвихревое течение

При совмещении геометрических центров слоя металла и полюсов индуктора ($\delta = 0$) генерируется четырёхвихревое течение. Размеры и интенсивность вращения вихрей изменяются со временем. Эти изменения проявляются в виде колебаний профилей скорости. На рисунке 1.17а представлены характерные для четырёхвихревого течения средние профили скорости. Вертикальные отрезки демонстрируют амплитуду пульсаций скорости на фоне среднего по времени значения. Как видно, средние профили имеют форму близкую к кубической параболе. При этом величина пульсаций скорости значительно выше скорости среднего течения. Рисунок 1.17б демонстрирует характерный временной ряд скорости в точке профиля, отвечающей наибольшей амплитуде скорости. Наблюдаемые осцилляции скорости близки к синусоидальным. Общий характер течения согласуется с предыдущими результатами [64].

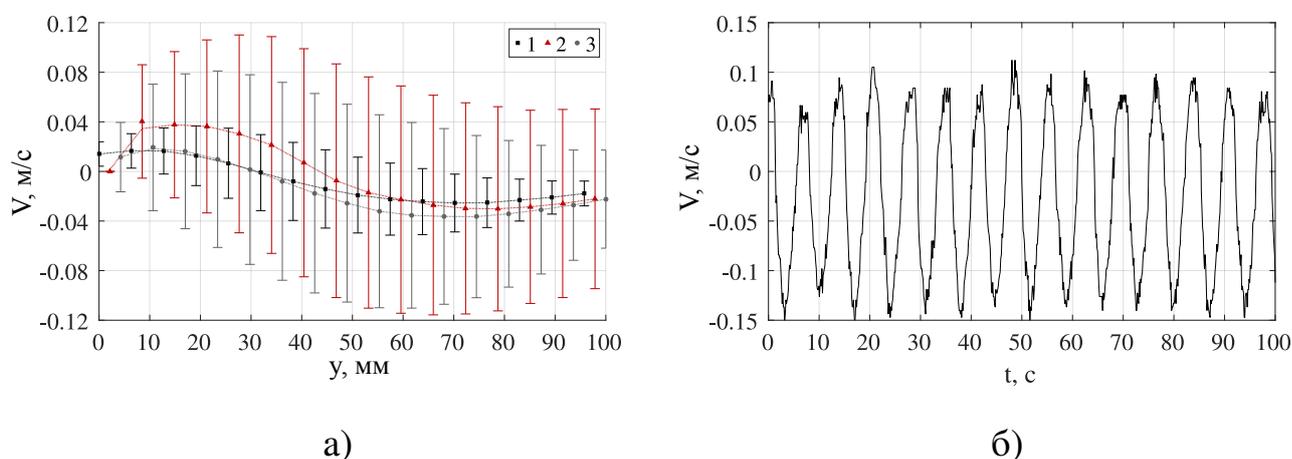


Рис. 1.17. Четырёхвихревое течение: а) Средние профили скорости при токах 3.0, 6.0 и 9.0 А (вертикальные отрезки демонстрируют амплитуду пульсаций скорости), б) временной ряд скорости в сечении слоя.

1.6.2. Двухвихревое течение

При смещении полюсов индуктора к краю слоя, в металле формируется двухвихревое течение. В отличие от четырёхвихревого, двухвихревое течение является квазистационарным [144]. На фоне устойчивого среднего течения наблюдаются нерегулярные пульсации скорости (рис. 1.18а). Форма средних профилей скорости близка к параболической. С увеличением внешнего электромагнитного воздействия возрастает и скорость среднего течения. При этом пульсации скорости изменяются слабо. На рисунке 1.18б представлен характерный временной ряд скорости двухвихревого течения в средней точке профиля. Выраженных колебаний скорости в этом случае не наблюдается.

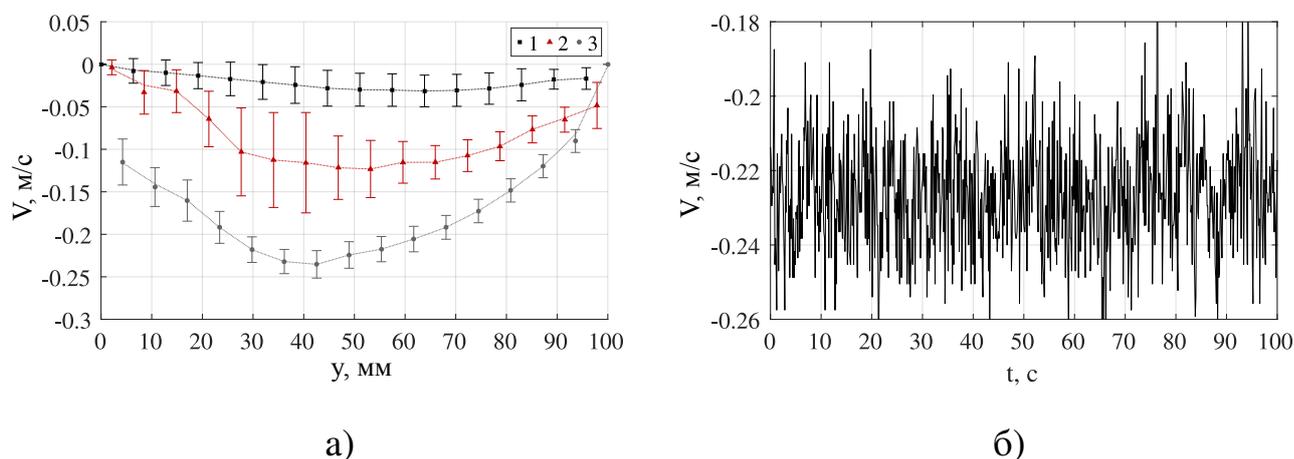


Рис. 1.18. Двухвихревое течение: а) Средние профили скорости при токах 4.0, 6.0 и 10.0 А (вертикальные отрезки демонстрируют амплитуду пульсаций скорости), б) временной ряд скорости в сечении слоя.

1.6.3. Переход от четырёхвихревой структуры к двухвихревой

Постепенное смещение области электромагнитного воздействия приводит к изменению структуры течения от четырёхвихревой к двухвихревой. Важно определить границу между указанными режимами при смещении области внешнего воздействия и изменении его интенсивности, поскольку характер описанных выше течений существенно различается. На рис. 1.20 представлено распределение

коэффициентов C_{2v} и C_{4v} в области параметров $S - \delta$. Здесь S – силовой параметр, δ – смещение полюсов индуктора относительно центра слоя. На карте режимов $S - \delta$ можно выделить три области. В области I, отвечающей малым смещениям ($\delta < 8$ мм), течение имеет преимущественно четырёхвихревую структуру (рис. 1.20а). Двухвихревое течение превалирует в области параметров II, отвечающей большим смещениям ($\delta > 8$ мм) и интенсивностям электромагнитного воздействия ($S > 2 \cdot 10^8$). В области III течение демонстрирует более сложную структуру, что выражается в искривлении параболического профиля скорости и смещении его медианы в сторону полюсов индуктора (рис. 1.19). Кроме того, двухвихревая структура является менее характерной, чем четырёхвихревая (величина параметра C_{4v} превышает величину C_{2v} более, чем на порядок во всей области параметров $S - \delta$).

На рисунке 1.19 представлены средние профили скорости при последовательном смещении δ области электромагнитного воздействия (интенсивность воздействия $S = 1.1 \cdot 10^8$). Как видно, профили скорости претерпевают качественное изменение по мере смещения области приложения магнитного поля в направлении ОУ. Точка перегиба кубического профиля смещается к краю слоя. Кроме того, кубические профили трансформируются в деформированные параболические (это соответствует переходу течения из области режимов I в область III на рис. 1.20). Таким образом, в выбранном сечении слоя изменяется количество крупномасштабных вихрей с двух до одного. Следует отметить, что в области режимов III крупномасштабный вихрь претерпевает деформацию. Дополнительно, максимальная скорость среднего по времени течения увеличивается по мере смещения δ .

На рисунке 1.21 представлено распределение средней локальной энергии течения и средней локальной энергии пульсаций от параметров S и δ . Как видно, осреднённое течение преобладает в области II, соответствующей преимущественно двухвихревому течению. В области I среднее течение проявляется лишь в пределе $\delta \rightarrow 0$. Кроме того, наибольшие пульсации скорости так же наблюдаются в

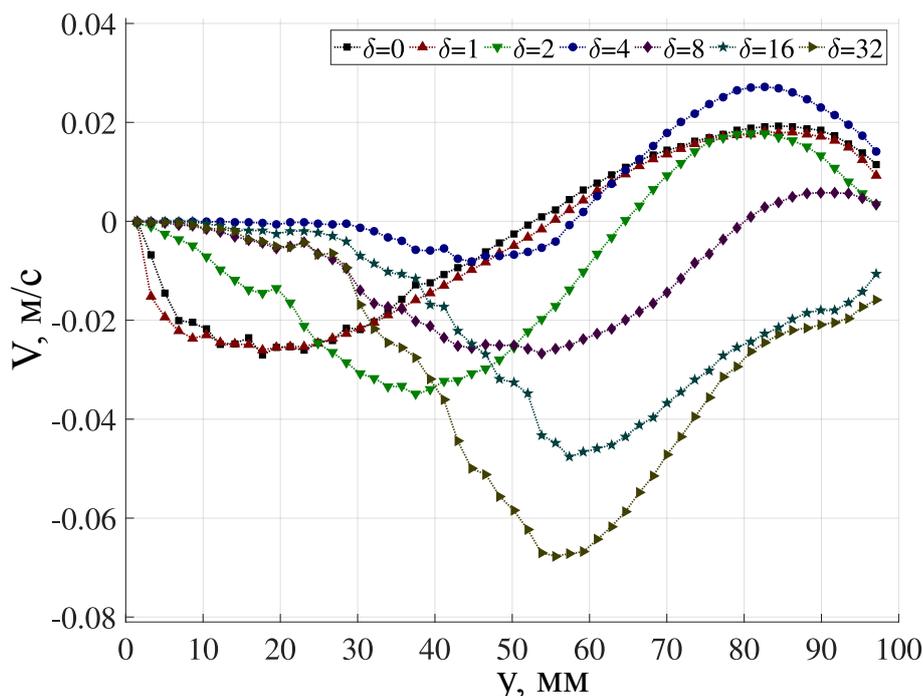


Рис. 1.19. Средние профили скорости вихревого течения жидкого металла в выбранном сечении слоя при последовательном смещении δ области воздействия магнитного поля. Силовой параметр $S = 1.1 \cdot 10^8$.

области I. Следует отметить, что величина пульсационной составляющей энергии двухвихревого течения (область II) почти вдвое меньше, чем та же компонента энергии четырехвихревого течения. Интенсивность течения смешанного типа (область III) значительно меньше, интенсивности двух- и четырёхвихревых течений (рис. 1.21).

Течение в области параметров I является существенно колебательным. Характерная частота осцилляций вихрей лежит в диапазоне 0.2–0.3 Гц (рис. 1.22). Эти осцилляции выражаются в изменении размеров вихрей. В области параметров II течение проявляет колебательный характер лишь в небольшой зоне параметров $\delta - S$. Частота осцилляций вихря растёт с увеличением интенсивности электромагнитного воздействия. На границе режимов I и II присутствует область устойчивого колебательного режима $S \sim 6 \cdot 10^8$, $\delta \in (4 \div 16)$ мм. В области III течения смешанного типа проявляют нерегулярные пульсации скорости, что не позволяет выделить отдельные частоты колебаний. Коэффициент k_S , характеризующий заполнение

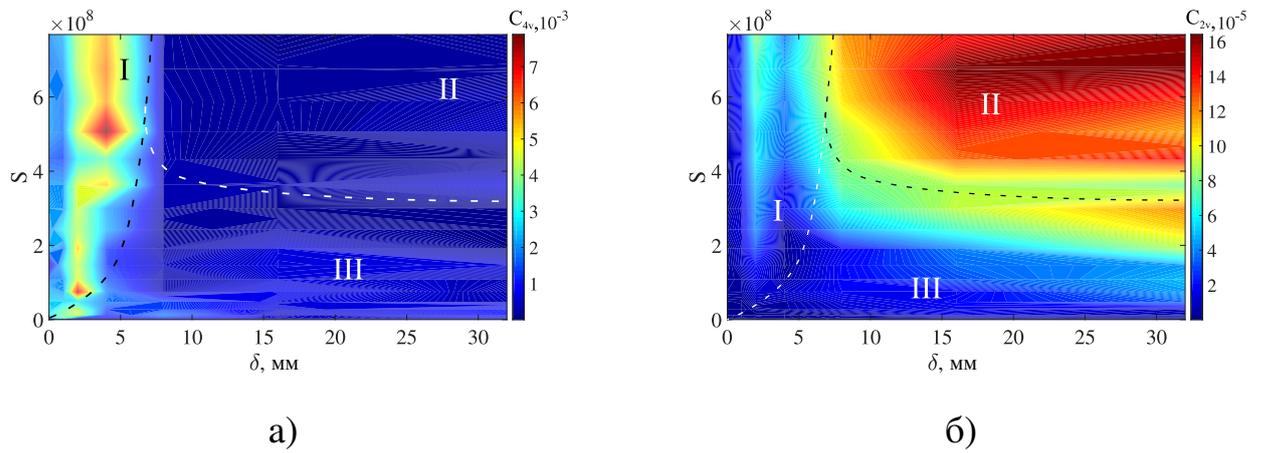


Рис. 1.20. Относительная интенсивность четырёхвихревой (а) и двухвихревой (б) мод течения на плоскости параметров $S - \delta$. Пунктирная линия разделяет области различных типов течений. В области I течение имеет преимущественно четырёхвихревую структуру, в области II – двухвихревую, в области III течение имеет структуру смешанного типа.

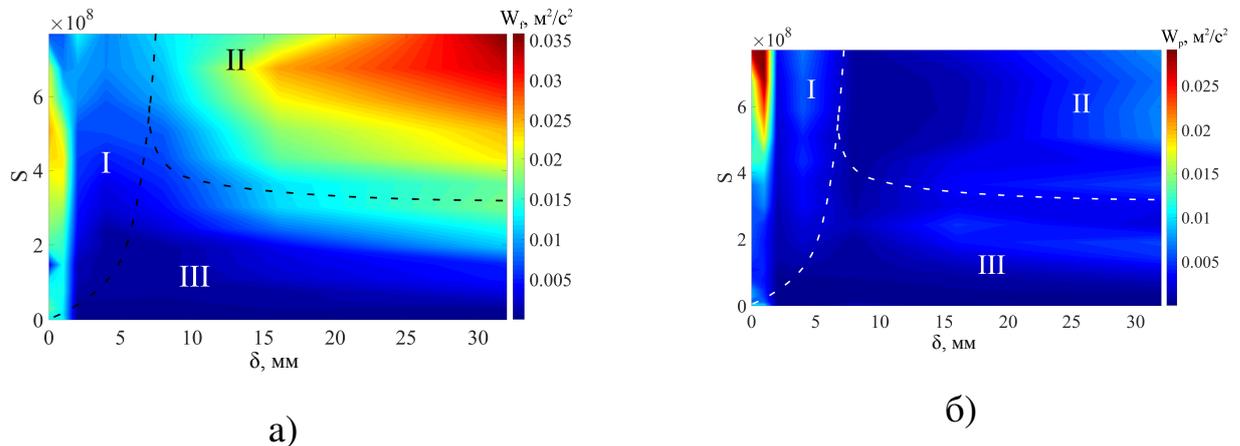


Рис. 1.21. Средней (а) и пульсационная (б) кинетическая энергия на плоскости параметров $S - \delta$. Пунктирная линия разделяет области различных типов течений.

спектра, имеет в области III значения, превышающие критическое ($k_S > 0.2$). С учетом малых значений энергии среднего течения и пульсаций скорости, можно сделать вывод о слабом квазистационарном характере течений в области III (измеренные значения скорости близки к порогу точности УДА).

1.7. Выводы по главе

Выводы по методической задаче:

Использование стенок малой толщины из плексигласа не оказывает существен-

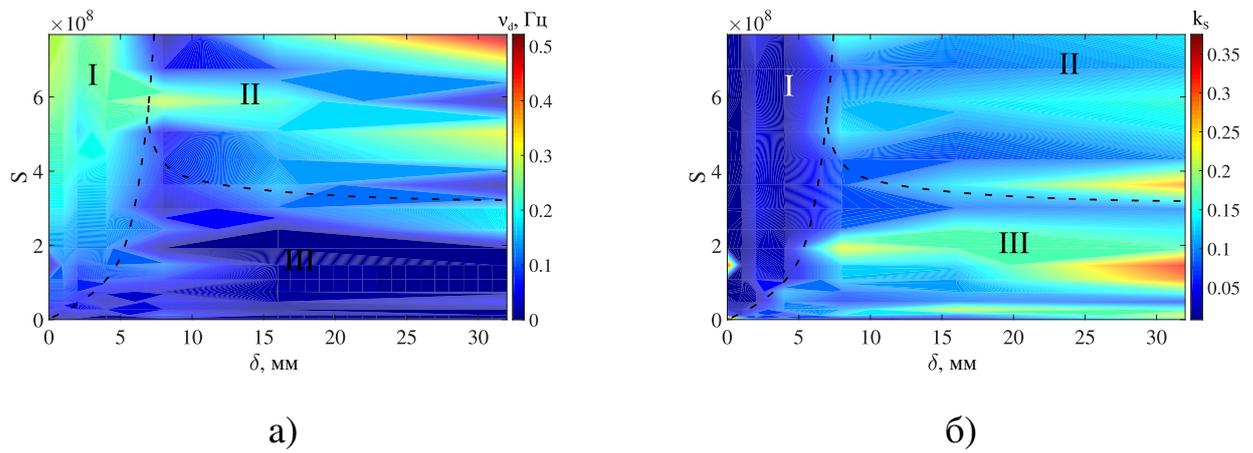


Рис. 1.22. Выделенной частота колебаний скорости v_d (а) и коэффициент заполнения спектра k_s (б) на плоскости параметров $S - \delta$. Пунктирная линия разделяет области различных типов течений.

ного влияния на качество ультразвуковых измерений скорости. При применении звукопроводящих стенок толщиной до 10 мм отличие измеряемых при помощи ультразвуковой доплеровской анемометрии профилей скорости от данных, полученных при непосредственном контакте датчика УДА с рабочей жидкостью не превышает 5% при измерениях на глубине до 200 мм. Измерения скорости на большей глубине сопряжены с рядом трудностей в связи с расхождением ультразвукового луча и рассеянием энергии звуковых волн в жидком металле со взвешенными звукоотражающими частицами оксидов.

Использование звукопроводящих стенок толщиной, кратной целому числу длин ультразвуковых волн, позволяет повысить эффективную глубину прохождения ультразвуковых пакетов при измерениях скорости за счет снижения влияния скачка акустического сопротивления на границе жидкость/звукопроводящая стенка. Так при использовании волновода длиной 26.8 мм (39 длин волн) из оргстекла эффективная глубина измерения достигает 200–250 мм при скоростях течения порядка 0.1 м/с. В то же время, при непосредственном контакте датчика УДА с рабочей жидкостью эффективная глубина измерений скорости находится в районе 100–150 мм при тех же измеряемых скоростях. Зависимость эффективной глубины измерений от скорости связана с рассеянием ультразвука на частицах оксидов металлов в потоке жидкой среды. По мере роста скорости течения увеличивается

эффективность перемешивания примеси и повышается степень рассеяния звуковых волн.

Применение волноводов диаметром меньшим, чем диаметр ультразвукового датчика, позволяет сфокусировать ультразвуковой луч. За счет этого снижается степень рассеяния энергии звуковых волн, что обеспечивает возможность измерения скорости на глубине более 300 мм при течениях со скоростями порядка 0.1 м/с и на глубине до 100 мм при течениях со скоростями вплоть до 0.15–0.2 м/с, что слабо реализуемо без использования волноводов.

Выбор органического стекла в качестве основного материала для стенок экспериментальных ячеек связан с малостью скачка акустического сопротивления между материалом стенки и рабочей жидкостью (сплав GaSnZn). Повышение скачка акустического сопротивления негативно влияет на качество измерений скорости методом ультразвуковой доплеровской анемометрии.

Изменение температуры рабочей жидкости в ходе процесса измерений скорости является нежелательным, поскольку приводит к ухудшению качества измерений и появлению дополнительных шумов. По-видимому, это связано с перераспределением звукоотражающих частиц в объёме жидкости и оседанию частиц оксидов на стенках измерительной ячейки. Наибольшая стабильность измерений достигается при предварительном подогреве металла до заданной рабочей температуры и последующем поддержании температуры жидкости на постоянном уровне. Процесс термостабилизации может быть реализован за счет чередования периодов нагрева жидкого металла за счет омических потерь при вихревых течениях электромагнитной природы и вязкого трения (период измерений) и периодов пассивного охлаждения при выключении внешних источников генерации течений (период релаксации).

Выводы по физической задаче:

Локализованное в пространстве и переменное во времени магнитное поле генерирует в жидкой проводящей среде вихревые течения. Структура поля электромагнитных сил в этом случае оказывается схожей с распределением сил

при электровихревом течении. Магнитопровод при этом оказывается некоторым эффективным аналогом токоподвода при ЭВТ. Такая аналогия позволяет моделировать течения электромагнитной природы в лабораторных условиях без использования высокомоощных источников питания за счет изменения механизма генерации течения, но при сохранении топологии вихревых структур.

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

Смещение области локализации электромагнитного воздействия из центральной части слоя к его краю приводит к постепенной перестройке 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, разграничивающая области четырёхвихревого, двухвихревого течений и течения смешанного типа на плоскости параметра силового воздействия S и смещения δ области действия переменного магнитного поля от геометрического центра слоя жидкого металла. Для каждого режима найдены характеристики энергии осреднённого и пульсационного течения, а также спектральные характеристики: характерные частоты пульсаций скорости и уровень заполнения спектра. 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.

Глава 2

Вихревые течения в условиях фазового перехода

2.1. Введение и постановка задачи

Перемешивание металлов в процессе кристаллизации позволяет улучшить качество слитков, гомогенизировать распределение примесей и измельчить зерна металла [148, 149]. Вследствие высокой температуры плавления и химической активности большинства жидких металлов и расплавов солей контактные методы перемешивания неприменимы для широкого класса электропроводящих жидкостей. Применение электромагнитных полей для бесконтактного управления течениями расплавов нашло обширное применение как в области выращивания полупроводниковых кристаллов, так и в металлургии [150].

Переменные магнитные поля порождают вихревые токи в проводящей среде. Взаимодействие этих токов с внешним магнитным полем приводит к генерации электромагнитной силы. В жидкой среде сила создает вихревые течения. В свою очередь течение жидкости увеличивает интенсивность тепло- и массообмена в расплавах [151, 152], обеспечивает сглаживание фронта кристаллизации [153] и повышает энергетическую эффективность процессов обработки расплава [154]. Электромагнитное перемешивание, основанное на применении вращающегося или бегущего магнитного поля при кристаллизации металлических слитков, нашло широкое применение в промышленности [155].

Управление скоростью и процессом кристаллизации посредством изменения параметров питания технологической установки (перемешивателя) становится возможным за счет цепочки взаимосвязанных процессов: энергоснабжение → электромагнитное поле → течение жидкого металла → теплообмен → форма фронта кристаллизации [151, 152, 156, 157].

В данном разделе рассматриваются три режима перемешивания жидкого

металла за счет приложения бегущего магнитного поля (БМП). В отмеченных выше работах исследуется влияние течений, генерируемых БМП, на процесс кристаллизации в слое малых размеров (как по отношению к индуктору БМП, так и по отношению к характерным размерам реальных технологических установок). В такой постановке, в слое электропроводящей жидкости генерируется один крупномасштабный вихрь, обеспечивающий основной конвективный теплоперенос. Тем не менее, увеличение размеров слоя и индуктора БМП приводит к изменению структуры течения. В слое генерируется многовихревые течения с вихрями различных размеров и интенсивности [3, 13]. Качественное изменение структуры течения и, как следствие, теплопередачи приводит к изменению условий образования твёрдой фазы из расплава. Потому следует принимать во внимание качественное изменение поведения физической системы при изменении её масштабов.

Структуры течений, возникающих в вертикальном слое жидкого металла, а также и влияние этих течений на процесс фазового перехода (а именно на скорость направленной кристаллизации металла и форму профиля твёрдой фазы) исследуются в масштабах, приближающихся к масштабам реальных промышленных установок. Течение создаётся посредством приложения бегущего магнитного поля, направленного вдоль слоя металла. Отличительной особенностью работы является рассмотрение режимов низкочастотной модуляции БМП, что потенциально позволяет снизить энергозатраты в реальных технологических процессах за счет понижения мгновенной потребляемой мощности в отдельные моменты времени. Рассматриваются три режима модуляций. В первом режиме БМП не подвергается модуляции, таким образом данный режим является опорным и повторяет технологические режимы перемешивания в машинах непрерывного литья. Во втором режиме БМП подвергается низкочастотной модуляции. Энергия магнитного поля изменяется по гармоническому закону от нуля до максимального значения. Третий режим назовём режимом реверсных модуляций. Под реверсной модуляцией будем понимать такой режим модуляции, при котором энергия БМП остается неизменной, но БМП изменяет своё направление с периодом равным периоду модуляции.

2.2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 2.1) состоит из кюветы 1, заполненной жидким галлиевым сплавом (температура плавления 17.8°C). Физические свойства сплава при комнатной температуре: плотность 6256 кг/м^3 , кинематическая вязкость $3.1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, проводимость $3.56 \cdot 10^6 \text{ См}$.

Размеры канала $450 \times 20 \times 75 \text{ мм}^3$. Узкие стенки канала оборудованы медными теплообменниками 2. Контроль температуры осуществляется при помощи двух криотермостатов 3 КРИО-ВТ-01 с точностью 0.5°C . Канал размещается на линейной индукционной машине 4 (ЛИМ) бегущего магнитного поля (БМП) размерами $480 \times 350 \text{ мм}^2$. Магнитное поле создаётся шестью катушками по 170 витков каждая и направлено противоположно оси X. Питание катушек осуществляется от трёхфазного программируемого источника тока 5 Pacific Smart Source 360 ASX-UPC3. Данный источник позволяет задавать форму выходного сигнала и осуществлять модуляцию бегущего магнитного поля. Несущая частота питания ЛИМА 50 Гц. Положение фронта кристаллизации, а так же измерения скорости возникающих в жидком металле течений осуществлялись при помощи ультразвукового доплеровского анемометра 6 (УДА) DOP 2000, Signal Processing. Четыре датчика УДА 7 размещались в узкой стенке канала таким образом, что ультразвуковые лучи проходили через отверстия в медном теплообменнике.

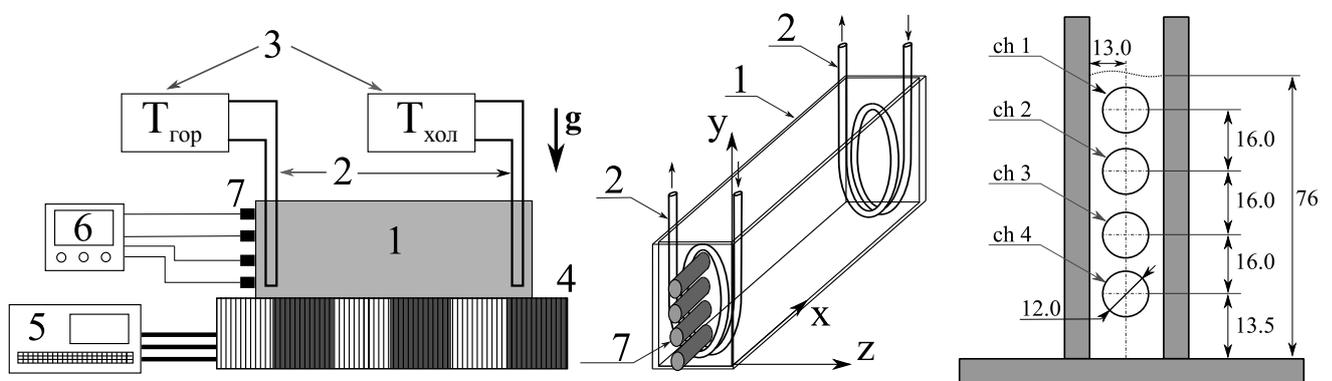


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки: 1. канал, заполненный жидким металлом, 2. теплообменники, 3. криотермостаты, 4. ЛИМ, 5. источник питания, 6. УДА, 7. датчики УДА.

Перед началом изучения структуры течения были произведены измерения профилей магнитного поля и порождаемой полем электромагнитной силы, действующей со стороны индуктора на проводящую среду. Компоненты вектора магнитной индукции измерялись при помощи трехканального тесламетра Lake Shore 4Gaussmeter. Положение датчика Холла устанавливалось с точностью 1.0 мм. На рис. 2.2 представлены распределения двух компонент вектора магнитной индукции. Третья компонента магнитного поля имеет величину на порядок меньшую поэтому исключена из рассмотрения. Из рис. 2.2 видно, что компонента поля B_x имеет пик на середине длины индуктора. Этот пик может быть объяснён асимметричным распределением фаз токов в катушках индуктора. Данный пик обеспечивает дополнительное ускорение жидкости в центральной части кюветы, что способствует повышению интенсивности крупномасштабного течения.

Измерения величины электромагнитной силы были проведены на модельной установке. Основная измерительная часть представляла собой медную пластину размерами $590 \times 290 \times 13$ мм³. Пластина была подвешена на нерастяжимых нитях на постоянном расстоянии от поверхности индуктора, таким образом, чтобы она могла свободно перемещаться в плоскости над индуктором. Измерения планарной и подъемной составляющих электромагнитной силы проводились при помощи динамометров. Для измерения вертикальной составляющей силы четыре динамометра были размещены между отрезками нитей вдоль длины подвесов.

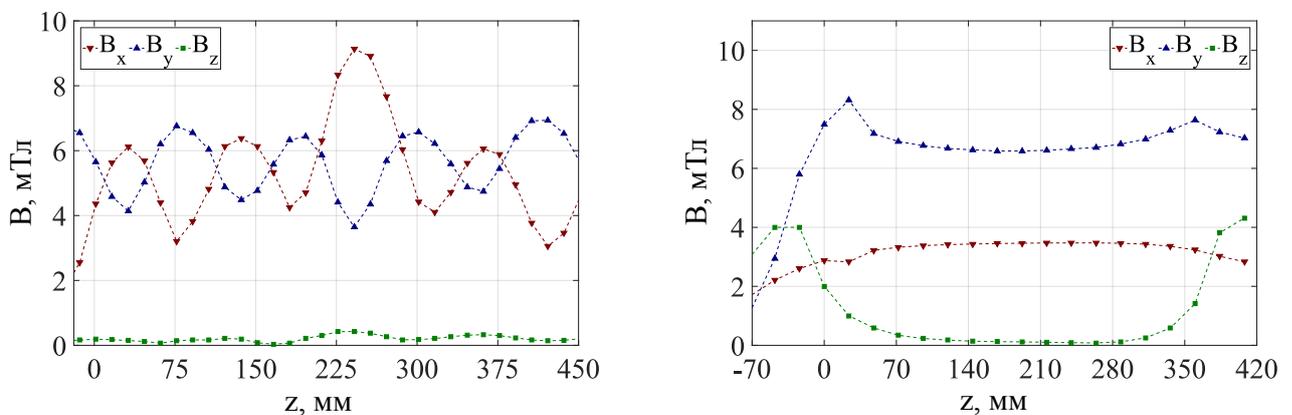


Рис. 2.2. Распределение магнитного поля ЛИМ вдоль двух координатных осей.

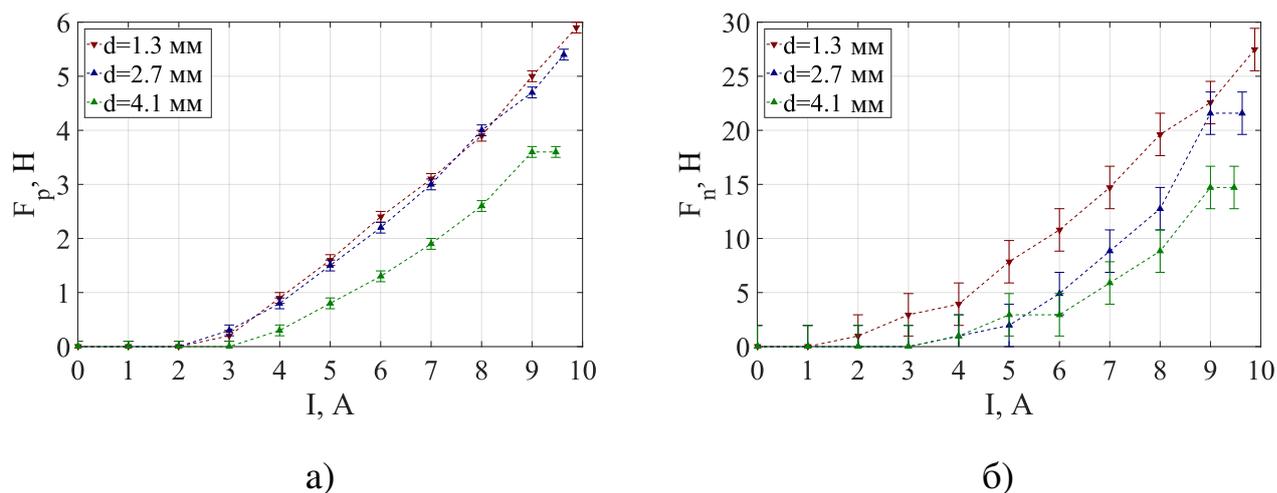


Рис. 2.3. Зависимости планарной F_p и нормальной F_n компонент электромагнитной силы от величины питающего ЛИМ тока.

Динамометр, измеряющий планарную составляющую силы, был жестко закреплён за край медной пластины и раму установки. При включении индуктора возникает электромагнитная сила, смещающая пластину в плоскости и уменьшающая ее вес. Точность измерения планарной и вертикальной составляющих силы составляла 0.1 Н и 1.0 Н соответственно. Результаты измерений компонент силы приведены на рис. 2.3.

2.3. Методика локализации фронта кристаллизации

Измерения скорости в объёме жидкого металла производились по методике описанной в разделе 1.5.1). Положение фронта кристаллизации так же определялось при помощи УДА по уровню отраженного ультразвукового сигнала. На межфазной границе (в данном случае граница жидкость/твёрдое тело) значительная часть ультразвуковых волн претерпевает отражение. Это выражается в виде пика в сигнале эхо. Положение пика на координатной оси соответствует положению фронта кристаллизации. Таким образом, положение межфазной границы может быть напрямую измерено при помощи УДА без контакта со средой или внесения искажений в форму фронта кристаллизации. Широко распространённый метод анализа температуры расплава при помощи матрицы термопар, вмонтированных в

торцевые стенки канала, используемый для нахождения фронта кристаллизации, а также контактные методы определения положения границы твёрдого массива при помощи щупов обладают очевидным недостатком. Эти методы вносят дополнительные возмущения в местах контакта с фронтом кристаллизации и искажают итоговую структуру отливки. Использование ультразвука позволяет избежать данной проблемы и обеспечивает возможность дальнейшего изучения кристаллической структуры металла по завершению процесса кристаллизации.

Как уже было отмечено в литературном обзоре, одной из важнейших проблем ультразвуковых измерений является вопрос о прохождении ультразвуком межфазных границ. Скачок акустического сопротивления на границе раздела фаз порождает сложности при измерениях скорости. Однако явления, возникающие на границах фаз позволяют использовать ультразвуковую анемометрию для изучения многофазных сред. Граница раздела определяется по пику в пространственном профиле эха. Наличие данного пика обусловлено изменением акустического сопротивления (произведения скорости звука и плотности среды) и отражением волн на границе раздела. Этот же метод применим и для нахождения уровня жидкости (в том числе жидкого металла) так в стационарном (неподвижная граница), так и в динамическом (колебания поверхности металла, продвижение фронта кристаллизации и др.) случае.

Поскольку метод ультразвуковых измерений является неинвазивным, он не вносит возмущений или загрязнений на поверхность жидкой среды, в отличие от контактных датчиков. Однако основным ограничением метода является диапазон рабочих температур. При изучении течений сильно нагретых сред (расплавы металлов, полупроводников и др.) следует защищать пьезоэлемент ультразвукового датчика от перегрева во избежание фазового перехода излучателя при температурах выше точки Кюри. Тем не менее, ультразвуковые измерения прекрасно зарекомендовали себя в лабораторных исследованиях. Поскольку анализ положения границ раздела фаз и скорости течения среды происходит на основании одних и тех же данных об излученных и принятых ультразвуковых импульсах, УДА

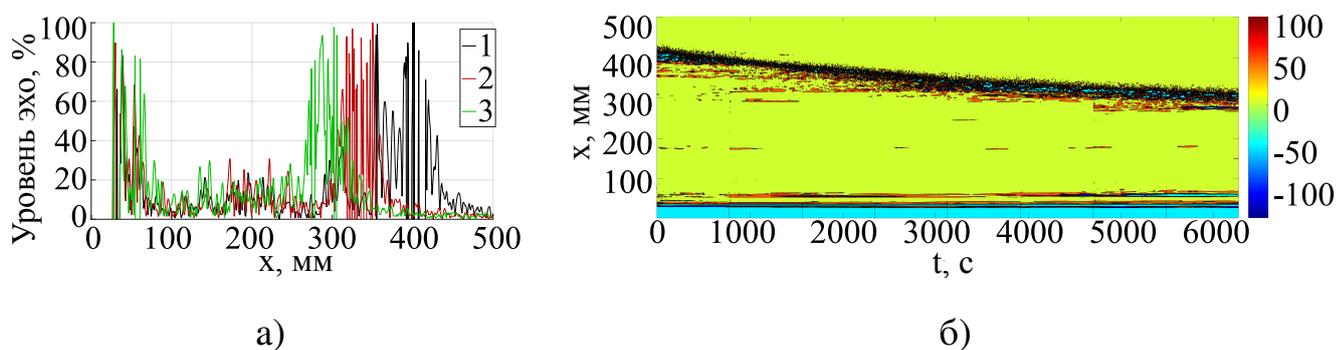


Рис. 2.4. а) Примеры профилей ультразвукового эхо в моменты времени t : 1. – 3.5 с, 2. – 3050 с, 3. – 6120 с; б) пример двумерного распределения уровня эхо вдоль продольной оси кюветы и оси времени.

позволяет получать дополнительную информацию о движении среды.

На рис. 2.4 приведены примеры профилей ультразвукового эхо в различные моменты времени. Первый пик на профилях эхо обусловлен прохождением ультразвука через стенку кюветы. При этом происходит частичное отражение звуковой волны на передней и задней границах стенки, что выражается в виде двух локальных максимумов в первом пике. Поскольку пройденное звуком расстояние определяется прибором по времени между излучением и регистрацией волнового пакета ультразвука, найденное расстояние непосредственно зависит от заданной скорости звука. Настройки УДА DOP 2000 не позволяют задать неоднородную вдоль ультразвукового луча скорость звука в настройках прибора. Следовательно, на профилях эхо толщина стенки кюветы должны быть пересчитана при постобработке данных для корректного отображения глубины прохождения ультразвука в материале с акустическими свойствами отличными от свойств жидкого металла. Второй пик на профиля эхо обуславливается наличием межфазной границы. До начала процесса кристаллизации положение этого пика соответствует положению задней стенки кюветы. В процессе кристаллизации межфазная граница смещается, что выражается в смещении пика на профиля эхо. Как будет показано ниже, для нахождения положения пика на пространственно временном распределении эхо-сигнала применялся специально разработанный и протестированный алгоритм поиска локальных максимумов зашумлённого эхо сигнала.

Для тестирования точности алгоритма анализа ультразвукового эха была собрана тестовая модель. Экспериментальная установка (рис. 2.5) для разработки и тестирования методов определения границы раздела фаз содержит цилиндрический стеклянный сосуд высотой 400 мм и диаметром 150 мм. Толщина стенок составляет 2.0 мм. Этот объём постепенно заполняется легкоплавким сплавом $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$ (wt.%) с минимально возможной вносимой массой $\Delta m = 1$ г, что соответствует приращению уровня металла $\Delta h \approx 0.01$ мм. Скорость звука в стекле составляет $c_{\text{glass}} = 5690$ м/с.

Тестовая установка оборудована двумя датчиками уровня: контактным и ультразвуковым. Для предотвращения образования на поверхности жидкого металла

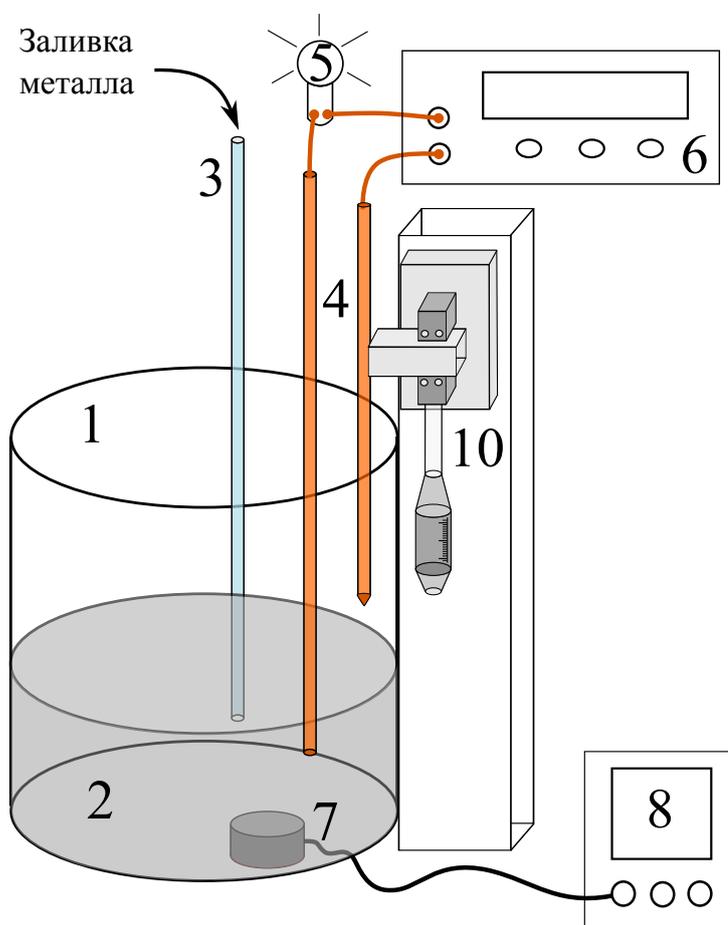


Рис. 2.5. Схема экспериментальной установки для тестирования методов определения уровня жидкого металла: 1. стеклянный сосуд, 2. жидкий металл, 3. заливочный канал, 4. контактный датчик, 5. индикатор контакта, 6. источник питания, 7. датчик УДА, 8. ультразвуковой доплеровский анемометр.

оксидной пленки (и ухудшения качества электрического контакта) металл залит тонким (2–3 мм) слоем из смеси изопропилового спирта (97 масс.%) и концентрированной соляной кислоты (3 масс.%). Данная смесь хорошо предотвращает контакт с атмосферным кислородом, обеспечивает разрушение всплывающих оксидных частиц и обладает электропроводностью на несколько порядков меньшей, чем электропроводность жидкого металла.

Наиболее тривиальным датчиком уровня электропроводящей жидкости является контактный датчик. Он представляет собой два электрода, подключенных к источнику постоянного тока. В разрыв цепи включен индикатор контакта. Один из электродов помещён на дно сосуда и находится в постоянном контакте с жидким металлом. Второй электрод закреплён на микрометрической подвижке, позволяющей с точностью 0.01 мм перемещать контакт вдоль вертикальной оси на расстояние до 50.0 мм. Электроды представляют собой медные стержни диаметром 2.0 мм, облуженные оловом для обеспечения устойчивого электрического контакта. Кончик подвижного электрода представляет собой конус, что обеспечивает снижение влияния мениска при контакте с жидким металлом. Кроме того, смесь изопропанола и соляной кислоты так же снижает поверхностное натяжение металла, что положительно сказывается на точности работы контактного датчика. Высота мениска жидкого металла не превышает 0.7 мм.

Принцип действия контактного датчика основывается на замыкании электрической цепи при контакте датчика с жидким металлом. При постепенном повышении уровня металлического расплава наступает момент касания датчика и жидкости. В этот момент происходит замыкание электрического контура и срабатывание индикатора, означающее, что уровень жидкости достиг предустановленной отметки. Установка контактного датчика на подвижной платформе, позволяет точно предустанавливать контрольную высоту металлического слоя в некотором диапазоне значений, определяемых пределами смещения измерительного электрода.

Повторимся, что идеологически контактный метод определения границы

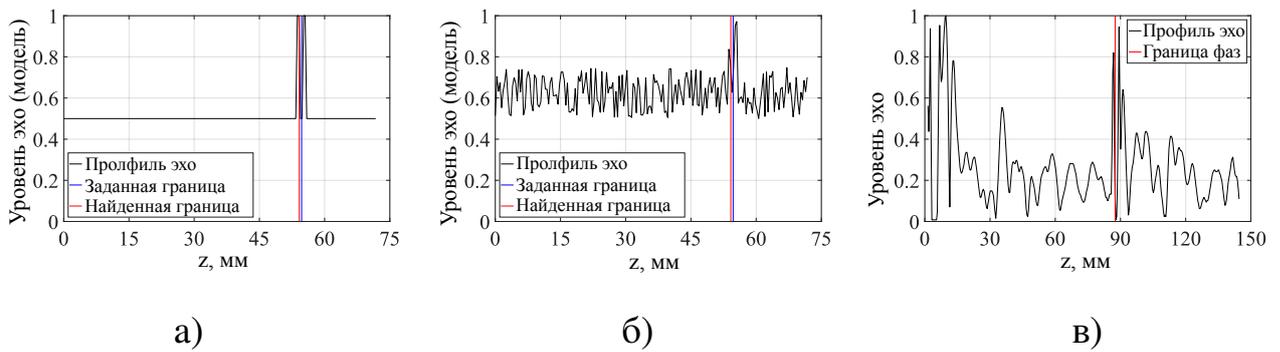


Рис. 2.6. Локализация границы раздела фаз при помощи УДА: а) модельный незашумлённый сигнал, б) модельный сигнал с наложением белого шума на уровне 25% от максимума полезного сигнала, в) реальный профиль ультразвукового эхо. Красная вертикальная линия отмечает положение границы раздела фаз, найденное при помощи разработанного алгоритма. Синяя вертикальная линия отмечает заданное положение границы (пика эхо) в тестовых сигналах.

жидкого металла является простейшим из всех. Однако его практическая реализация в технологических приложениях, таких как жидкометаллические батареи, алюминиевые электролизёры или хранилища металлического теплоносителя (жидкий натрий, свинец и др.) на АЭС, сопряжена со значительными трудностями. Наибольшие сложности связаны с неточностью определения контакта вследствие окисления как поверхности жидкого металла, так и самих электродов при высоких рабочих температурах. Второй важной проблемой является образование менисков и частичное смачивание электродов металлическим расплавом. Обе описанные проблемы решаются в настоящей работе за счет внесения дополнительного химически активного слоя на поверхность жидкого металла. Тем не менее, следует понимать, что данное решение является частным и подходит для лабораторной модели, но мало применимо в промышленных установках.

Нахождение границы раздела фаз при помощи УДА основывается на алгоритме поиска локальных экстремумов. На рис. 2.6 представлены примеры тестовых и реального профилей эхо, на основании которых вычисляется положение границы раздела фаз. Характерным признаком наличия межфазной границы на профилях эхо служат значительные величины уровня эхо. Эти «выбросы» обусловлены превышением уровнем эхо измерительного диапазона прибора за счет экстре-

мального уровня звука в областях множественного переотражения и наложения звуковых волн. Хотя в этих областях невозможно измерение скорости течения среды, «выбросы» эха являются желательными для локализации границ раздела. Положение соответствующих пиков рассчитывалось в среде Matlab по двухступенчатому алгоритму. На первой ступени производилась перенормировка сигнала к опорному значению равному нулю, на фоне которого существует множество локальных максимумов различной величины. К перенормированному сигналу применяется функция поиска локальных экстремумов, имеющих амплитуду не ниже 75% от максимума сигнала. Алгоритм обработки данных был проверен на тестовых сигналах (рис. 2.6а и 2.6б), моделирующих пики эха различной ширины и амплитуды, а так же при наличии в сигнале шума. Точность локализации пиков модельных сигналов укладывается в удвоенный шаг по пространственной координате $2 \cdot dz = 0.718$ мм. Такая величина шага dz выбрана исходя из пространственного разрешения УДА. Разработанный алгоритм нахождения межфазной границы был успешно применён для определения уровня жидкого металла в тестовой задаче. На рис. 2.6в представлен пример реального профиля эха, а так же найденное положение границы раздела фаз.

В ходе тестового эксперимента происходило постепенное повышение уровня жидкого металла с шагом в 1 мм. Уровень металла h контролировался контактным датчиком, параллельно производилась запись эхо-сигнала при помощи УДА. Полученные данные были обобщены для построения зависимости положения z границы раздела фаз, найденного при помощи УДА от уровня жидкости (найденного при помощи контактного датчика). На рис. 2.7 представлено сравнение указанных зависимостей. Для наглядности проведена прямая, иллюстрирующая показания контактного датчика.

Как видно, данные полученные двумя методами неплохо ложатся на одну прямую. Погрешность определения уровня жидкого металла ультразвуковым методом включает в себя пространственное разрешение доплеровского анемометра, погрешность метода анализа эхо и погрешность позиционирования контактного

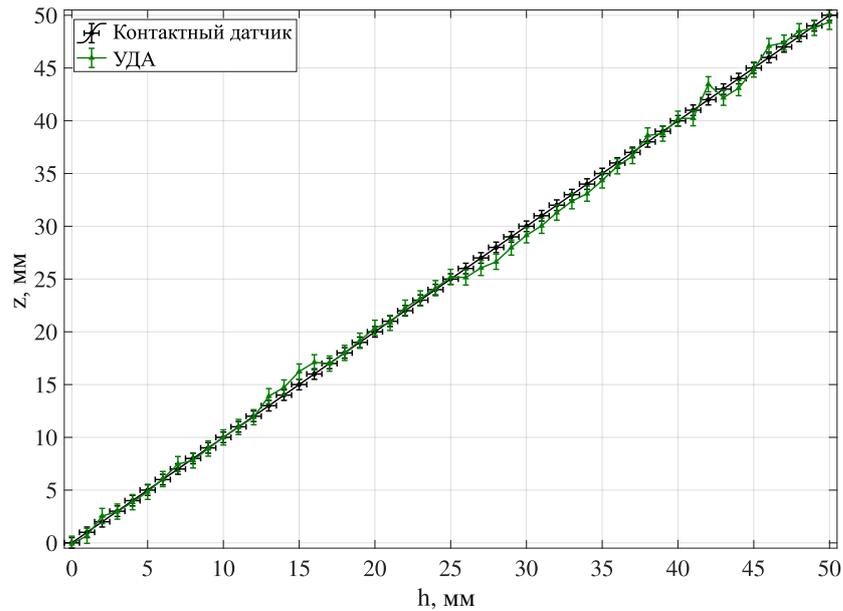


Рис. 2.7. Определение положения z границы жидкого металла двумя методами в зависимости от уровня h жидкости.

датчика, используемого для верификации остальных методов. Общая погрешность ультразвукового метода составляет не более 4%.

Применение разработанного алгоритма позволяет локализовать области раздела фаз с высокой точностью. Тем не менее, применение алгоритма обработки

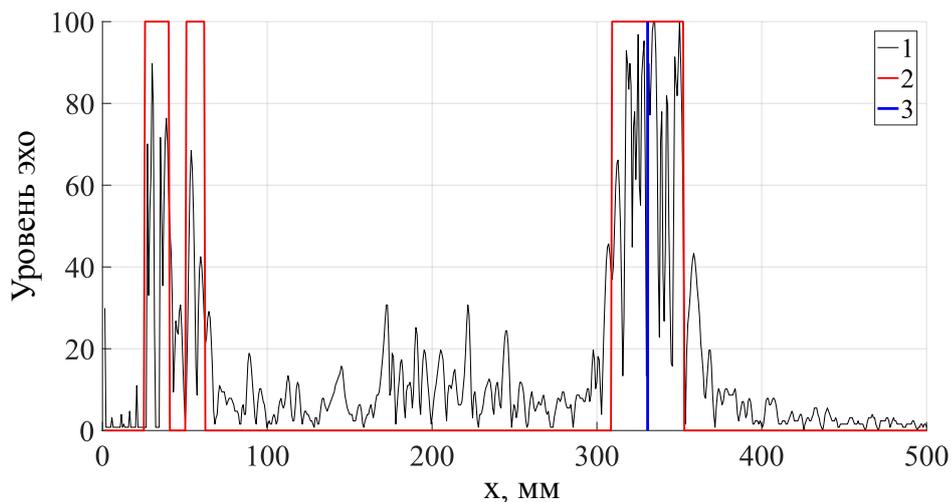


Рис. 2.8. Пример применения алгоритма обработки данных к профилю эхо в процессе кристаллизации: 1. профиль эха, 2. профиль локальных максимумов, получаемый алгоритмом, 3. положение фронта кристаллизации, найденное по алгоритму.

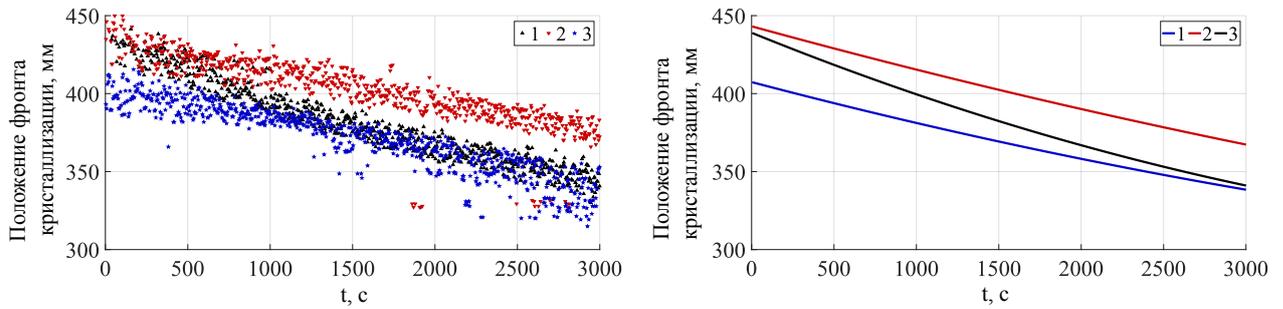


Рис. 2.9. Примеры эволюции положения фронта кристаллизации при питающем ЛИМ токе: 1. 0 А, 2. 3.0 А, 3. 5.0 А. Сплошные линии (справа) отображают результат аппроксимации экспериментальных точек полиномиальными функциями.

данных к профилям ультразвукового эха (рис. 2.8), получаемых в ходе процесса направленной кристаллизации показало, что существует дополнительный источник погрешности определения положения фронта кристаллизации связанный с физическими механизмами протекания процесса. Уширение пика эхо, по-видимому, связано с переходной зоной между жидкой и кристаллической фазами. В этой области металл находится в малоупорядоченном состоянии и представляет собой смесь мелких кристаллов и жидкости. Визуальные наблюдения за низкотемпературным сплавом через оптически прозрачную стенку кюветы демонстрируют подобную губке структуру на границе фаз. Подобная промежуточная среда хорошо рассеивает ультразвук, что не позволяет точно определять положение границы раздела, в том числе и по причине отсутствия границы в строгом математическом смысле слова. Потому, в качестве положения фронта кристаллизации принимается середина третьего локального максимума профиля эхо (синяя линия на рис. 2.8).

На рис. 2.9 приведены зависимости положения фронта кристаллизации от времени для трёх значений приложенного БМП. Графики получены по описанной методике. Ясно виден разброс экспериментальных точек в рамках каждого рассматриваемого режима превышающий погрешность метода. Найденные зависимости положения фронта кристаллизации от времени аппроксимировались линейными функциями. Средняя скорость движения фронта кристаллизации вычислялась аналитически путём дифференцирования построенных прямых. По мере смеще-

ния фронта кристаллизации уменьшается область, охваченная перемешивающим течением. За счёт этого интенсивность теплообмена уменьшается со временем, что приводит к снижению скорости движения межфазной границы.

Итоговая погрешность определения скорости при этом складывается из погрешности математического алгоритма, погрешности локализации фронта кристаллизации вследствие конечных размеров переходной зоны, погрешности аппроксимации экспериментальных точек линейными функциями и отклонения скорости движения фронта кристаллизации от постоянного значения.

2.4. Течение в изотермической жидкости

Рассмотрим сначала течения, генерируемые магнитным полем в экспериментальной кювете (рис. 2.1) в отсутствие градиентов температуры и фазовых переходов.

В качестве базового течения, модуляции которого влияют на характеристики перемешивания жидкого металла и ход процесса кристаллизации, рассматривалось течение возникающее в плоском слое галлиевого сплава под действие БМП.

На рис. 2.10 приведены средние по времени профили скорости. Вертикальные отрезки на графиках отмечают среднеквадратичное значение пульсаций скорости. Как видно, течение имеет двухвихревую структуру. Большой вихрь занимает центральную область кюветы. В то же время, в пристеночной области образуется меньший вихрь (рис. 2.10а, в). Его образование связано с ускорением жидкости по мере движения над плоскостью индуктора и изгибом линий тока на торцевой стенке кюветы. Скорость малого вихря несколько выше, чем скорость центрального. С увеличением интенсивности внешнего воздействия энергия вихрей увеличивается, что приводит к искажению свободной границы металла в области локализации вихрей.

Наибольшая скорость течения достигается вблизи нижней границы слоя, в области смежной с индуктором БМП (рис. 2.10 а). В этой же области наблюдается

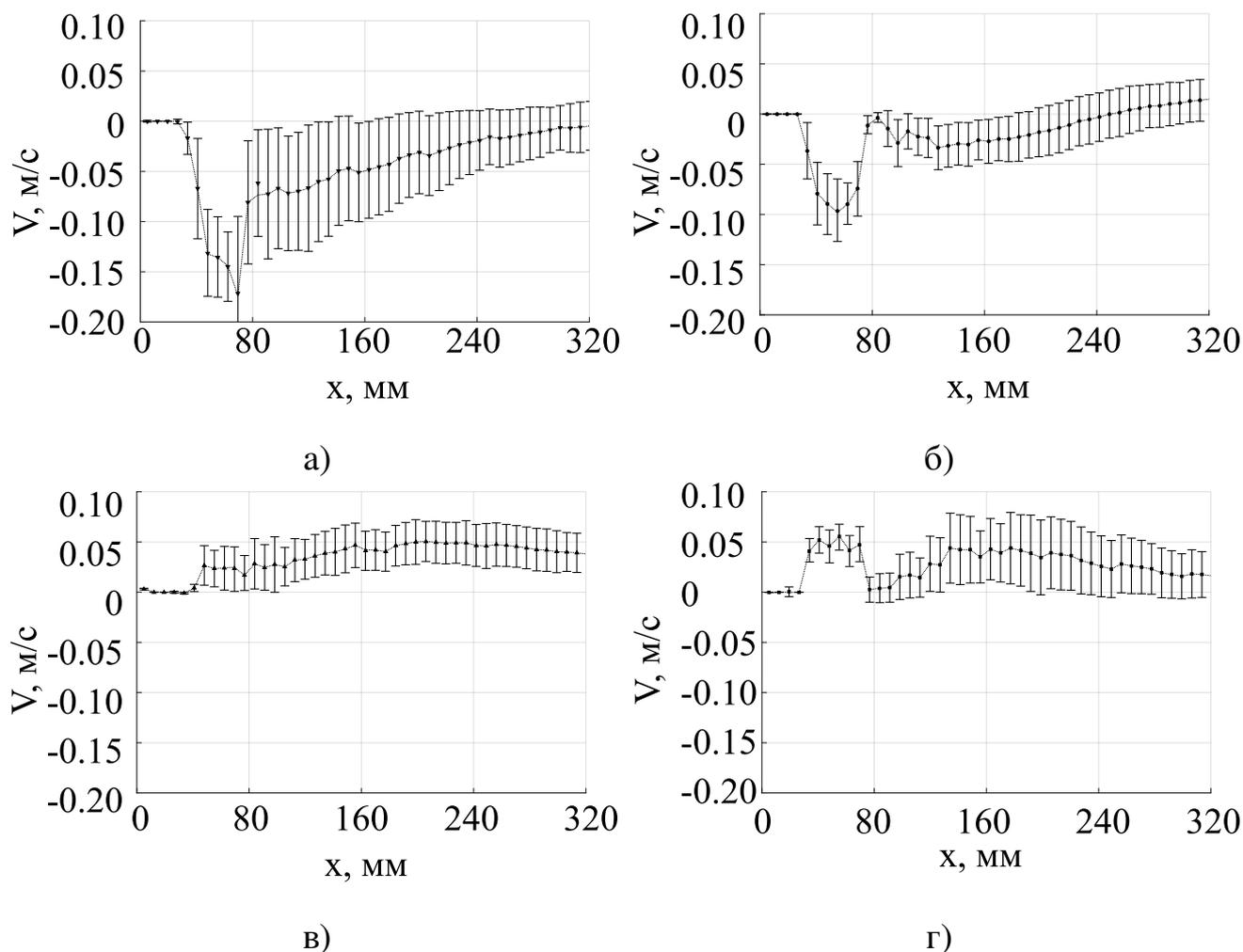


Рис. 2.10. Средние по времени профили скорости течения в нескольких сечениях по высоте слоя: а) 14 мм, б) 30 мм, в) 46 мм, г) 62 мм.

наибольшая амплитуда пульсаций скорости. Максимум амплитуды пульсации скорости наблюдается в первой трети слоя по его длине. Величина пульсации незначительно изменяется как по высоте, так и по длине ячейки.

Наложение низкочастотных модуляций на БМП приводит к изменению течения. Хотя пространственная структура остаётся неизменной – крупномасштабный вихрь с особенностью в виде вторичных мелкомасштабных структур на расстоянии 80 мм от стенки кюветы. Тем не менее, временные характеристики течения изменяются в соответствии с модуляцией вынуждающей силы.

Приведенные на рис. 2.10 профили скорости претерпевают качественное изменение: средняя составляющая потока уменьшается (вплоть до полного исчезновения при малых периодах реверсной модуляции), в то время как пульсационная

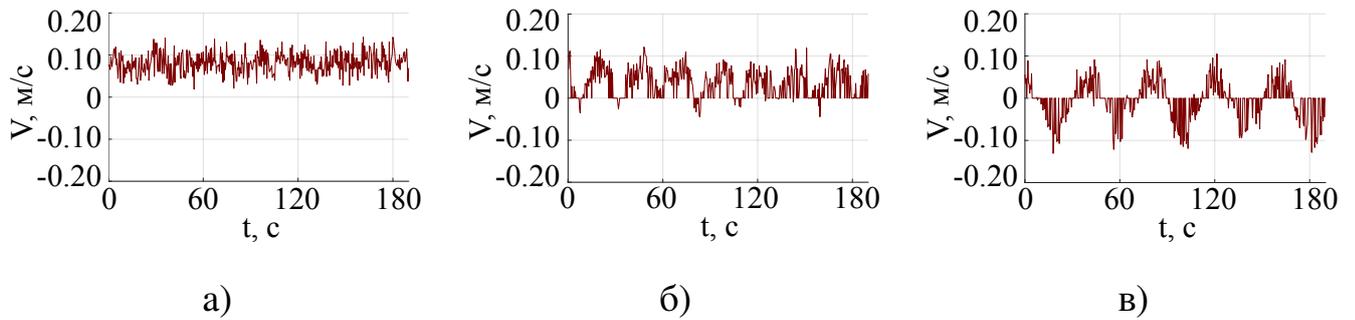


Рис. 2.11. Эволюция скорости течения жидкого металла в средней точке профиля при трёх режимах внешнего электромагнитного воздействия: а) БМП без модуляций, б) модулированное БМП, в) реверсная модуляция БМП. Во втором и третьем режимах период модуляции $\tau = 30$ с.

компонента повторяет распределение скорости при немодулированном силовом воздействии. В случае отсутствия модуляций течение имеет среднюю по времени составляющую, на фоне которой проявляют себя пульсации скорости умеренной амплитуды. При модуляции БМП, порождаемое течение становится существенно пульсирующим: скорость вихрей нарастает по гармоническому закону от нуля до максимального значения (в соответствии с изменением мощности приложенного поля). В третьем режиме (реверсная модуляция) течение оказывается осциллирующим в том смысле, что направление закрутки крупномасштабного вихря изменяется с частотой близкой к частоте реверсной модуляции. На рис. 2.11 представлены характерные временные ряды скорости в медиане профиля скорости. Наложение низкочастотных модуляций на внешнюю электромагнитную силу закономерно приводит к периодичности в генерации течения. Частота возникающих гидродинамических структур совпадает с частотой модуляции БМП, а амплитуда скорости совпадает с величиной средней скорости течения в случае отсутствия модуляций. Колебания скорости происходят вокруг ненулевого среднего значения с периодическим снижением скорости крупномасштабного течения до нуля. В режиме реверсной модуляции колебания скорости происходят около нулевого среднего значения, и крупномасштабное течение меняет свое направление с частотой модуляции БМП. При низкочастотной модуляции высокочастотные гидродинамические пульсации наблюдаются как на фоне среднего, так и крупномасштабного течений.

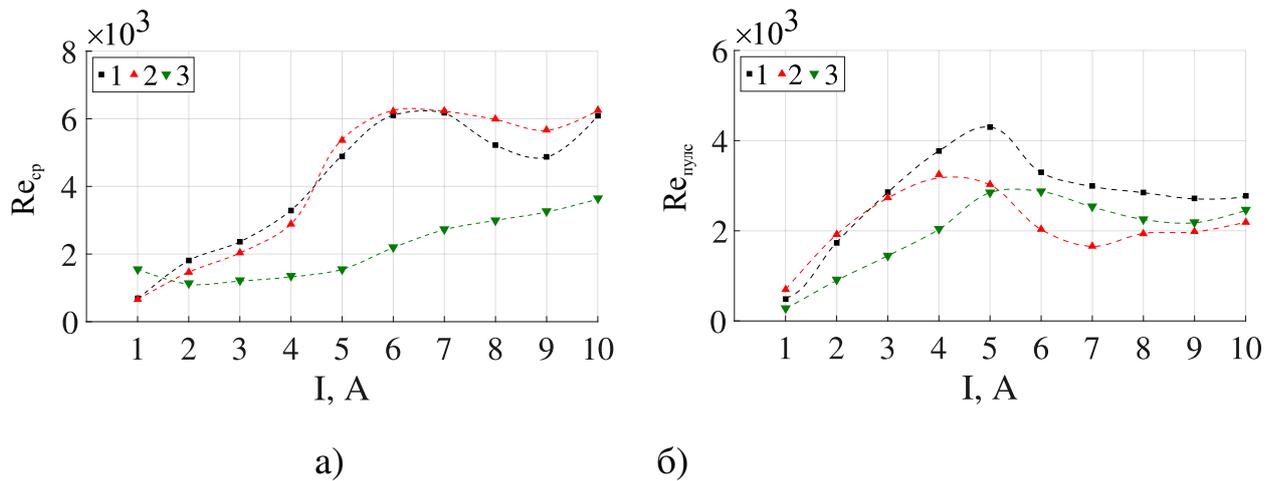


Рис. 2.12. Зависимости среднего (а) и пульсационного (б) чисел Рейнольдса от питающего индуктор БМП тока. В легенде указывается номер ультразвукового датчика по высоте слоя: 1) 14 мм, 2) 30 мм, 3) 46 мм.

В качестве основных характеристик эффективности перемешивания жидкого металла были выбраны среднее Re_{cp} и пульсационное $Re_{пульс}$ числа Рейнольдса, рассчитанные по максимуму средней и пульсационной составляющих x -компоненты скорости, толщине слоя и кинематической вязкости сплава. На рис. 2.12 и 2.13 представлены зависимости чисел Рейнольдса от интенсивности электромагнитного воздействия и периода модуляции БМП.

По мере увеличения интенсивности внешнего воздействия скорость течения нелинейно возрастает с выходом на участок «насыщения», начиная с токов питания индуктора 5 А. При этом как среднее так и пульсационные числа Рейнольдса достигают своего максимума (рис. 2.12). Максимально достижимое среднее число Рейнольдса лишь незначительно превышает максимум пульсационного числа Рейнольдса, что указывает на значительный вклад мелкомасштабных течений в общую структуру потока. Тем не менее, наличие участка «насыщения» говорит о неэффективности управления перемешиванием жидкого металла только за счет увеличения электрической мощности индукционной машины. Это приводит к необходимости разработки дополнительных механизмов внесения мелкомасштабных гидродинамических структур в основной поток. Таким механизмом могут послужить модуляции электромагнитного воздействия.

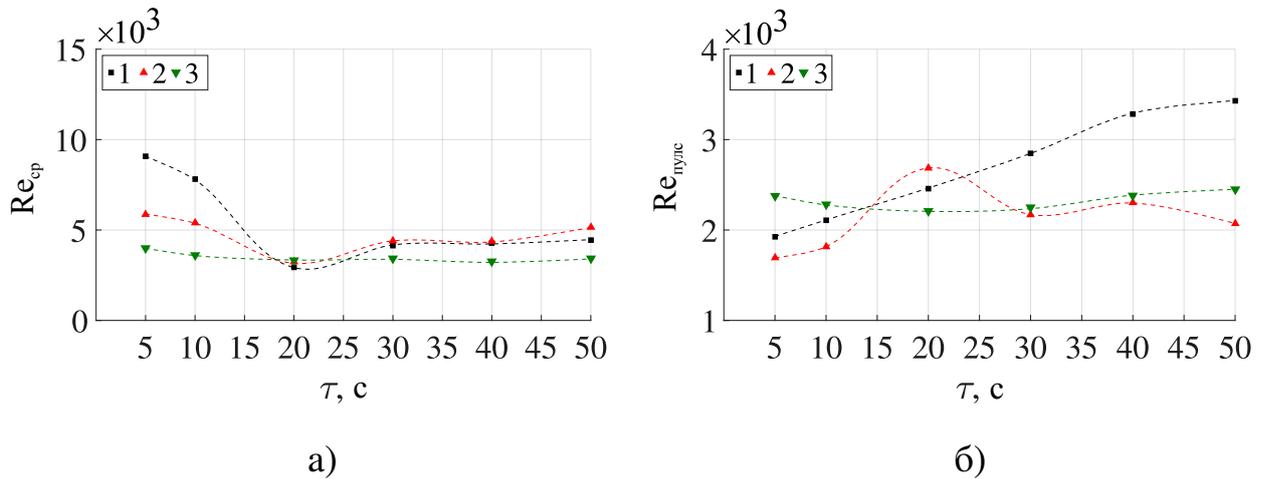


Рис. 2.13. Зависимости среднего (а) и пульсационного (б) чисел Рейнольдса от периода амплитудной модуляции. В легенде указывается номер ультразвукового датчика по высоте слоя: 1) 14 мм, 2) 30 мм, 3) 46 мм.

Модулированное течение создавалось при амплитуде питающего тока 5.0 А. Таким образом, условие минимизации энергопотребления при максимальном увеличении скорости течения металла было выполнено. В режиме модуляции амплитуда БМП изменялась по периодическому закону от нуля до амплитуды с периодом $\tau = 5 - 50$ с. Зависимости среднего и пульсационного чисел Рейнольдса для данного режима приведены на рис. 2.13. По мере увеличения периода модуляции $Re_{ср}$ уменьшается. В то же время происходит некоторое увеличение $Re_{пульс}$. 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.

Второй рассматриваемый режим модуляции БМП назовём реверсным. В этом режиме направление БМП изменялось с периодом τ . Реверсная модуляция порождала ярко выраженное пульсирующее течение в жидком металле. Течение в режиме реверсных модуляций характеризуется низкими значениями $Re_{ср}$ из-за периодического изменения направления вращения крупномасштабных вихрей.

Пульсационная составляющая реверсного течения имеет особенность в виде

значительного вклада мелкомасштабных структур (в смысле пространственных размеров и периодов оборота вихря) в общую картину течения по сравнению с ранее рассмотренными модами. Из-за ограниченного разрешения пространственных и временных масштабов вихревых структур УДА экспериментально полученные значения $Re_{\text{пульс}}$ оказываются ниже ожидаемых из теории и расчетов величин [12]. На основании данных моделирования (в основном объеме слоя) можно сделать вывод о двукратном увеличении $Re_{\text{пульс}}$ в случае низкочастотной реверсной модуляции по сравнению со случаями отсутствия модуляции или амплитудной модуляции.

2.5. Кристаллизация в условиях перемешивания

В ходе следующего этапа работы исследовалась возможность управления формой профиля кристаллической фазы за счет изменения условий на границе раздела фаз вынужденным течением. Течение в жидком металле создавалось воздействием модулированного БМП. Были 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. БМП было направлено вдоль оси ОХ. 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. Вновь акцентируем внимание на структуре течения жидкости: течение, обеспечивающее принудительное перемешивание имеет двухвихревую структуру. Большой вихрь возникает в центральной по длине части слоя. В то же время меньший вихрь образуется в области, прилегающей к горячему теплообменнику. Наложение низкочастотных модуляций изменяет структуру мгновенного распределения скорости. Описанные средние профили

претерпевают качественное изменение: осреднённая составляющая уменьшается (вплоть до полного исчезновения при малых периодах реверсных модуляций), в то время как пульсационная компонента имеет тенденцию повторять характер распределения скорости при немодулированном силовом воздействии.

В результате обработки профилей ультразвукового эхо были найдены положения и скорости движения фронта кристаллизации металла на четырёх отметках по высоте слоя. Для получения формы профиля кристаллической фазы слоя применялась спайн-интерполяция полученных экспериментально точек. На рис. 2.14 и 2.15 приведены профили средней скорости продвижения фронта кристаллизации.

Для количественной оценки влияния электромагнитного воздействия (принудительного перемешивания жидкого металла) на процесс кристаллизации введём величину F_R как среднеквадратичное отклонение формы фронта кристаллизации от плоскости (средней скорости V движения фронта). Назовём эту характеристику параметром неровности фронта кристаллизации.

2.5.1. Влияние постоянного перемешивания на процесс кристаллизации

В отсутствие перемешивания профиль твердой фазы имеет S-образную форму. Слабое адвективное течение обеспечивает приток охлаждённой жидкости к фронту кристаллизации в нижней части слоя и отток нагретого металла в верхней части. Таким образом, скорость движения фронта кристаллизации выше в нижней придонной части слоя. Возвратный поток, обогащенный нагретым металлом, повышает температуру в верхней части слоя и снижает скорость кристаллизации (рис. 2.14).

Наложение БМП приводит к генерации крупномасштабного течения в объёме металла. Влияние вынужденной конвекции на процесс кристаллизации металла в данной постановке не однозначно. В зависимости от интенсивности течения изменяется теплоперенос вдоль слоя (как по величине, так и по топологии). Вследствие этого изменяется распределение температуры на границе раздела фаз и скорость фазового перехода в каждой точке. Течение малой интенсивности

(питающий ЛИМ ток 2–3 А) усиливает неоднородность профиля кристаллизации по высоте (в нижней части слоя скорость кристаллизации увеличивается, в верхней – уменьшается). В этом случае медленный крупномасштабный вихрь выступает топологически подобен адвективному течению и выполняет аналогичную роль в процессе теплопереноса. При дальнейшем росте интенсивности электромагнитного воздействия на металл увеличивается интенсивность течения и, как следствие изменяются условия теплопереноса. Быстро вращающийся вихрь не позволяет нагретой жидкости долго удерживаться в области фазового перехода. Тем не менее, в среднем интенсивность подвода тепла несколько увеличивается по сравнению со случаем отсутствия вынужденной конвекции. Это приводит к S-образной форме профиля кристаллизации, весьма близкому по форме к профилю в отсутствии перемешивания. Однако скорость движения межфазной границы на 20% ниже. При самой большой интенсивности перемешивания (питающий ЛИМ ток 6 А) происходит интенсивный отток охлаждённой жидкости из придонной области в зону обогрева «горячим» теплообменником. Наилучшими, с точки зрения сглаживания фронта кристаллизации, являются режимы течения при токах питания 4.0 и 5.0 А (рис. 2.16а). Посему для дальнейшего исследования влияния модуляций течения

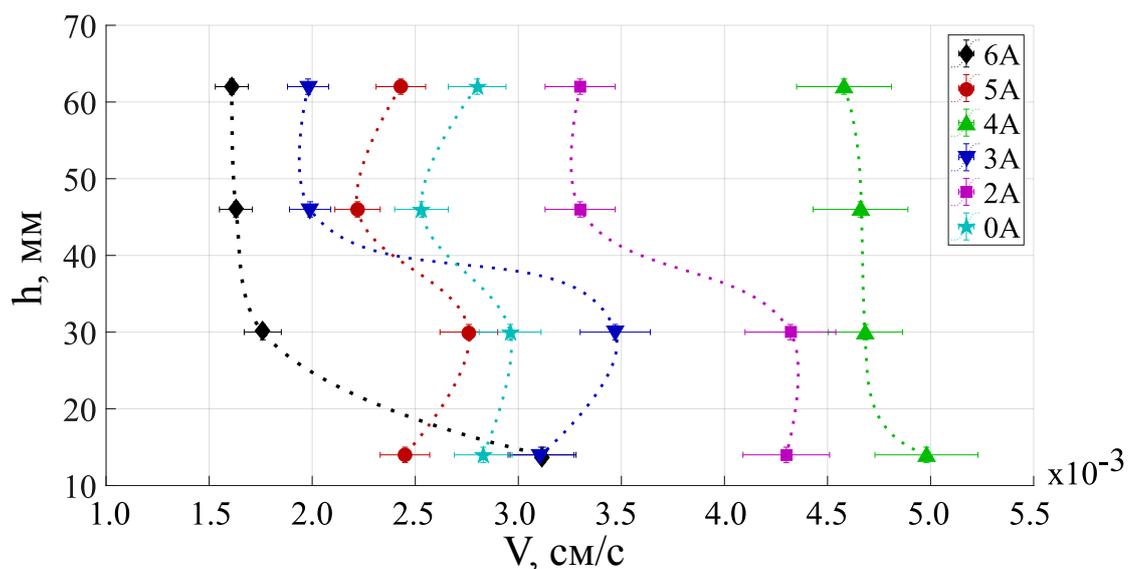


Рис. 2.14. Распределение скорости движения фронта кристаллизации по высоте слоя для разных значений силы тока.

был выбран режим питания при токе 4.0 А.

2.5.2. Влияние реверсивного перемешивания на процесс кристаллизации

Периодическое изменение направления крупномасштабного течения расплавленного металла приводит к увеличению вклада пульсаций и общую структуру течения, что приводит к дополнительному выравниванию температурных неоднородностей в объеме жидкой фазы. Кроме того, колебания крупномасштабного вихря обеспечивают «порционный» подвод подогретой жидкости. Качественно это можно изобразить так. Некоторый объем жидкости ΔV нагревается в области горячего теплообменника приобретая энергию ΔQ и затем переносится в зону фазового перехода. В этой области объем ΔV останавливается на время τ в силу замедления и постепенной смены направления течения. За это время нагретая жидкость успевает отдать избыточную тепловую энергию ΔQ в окружающий объем, изменив скорость кристаллизации в точке своего нахождения, после чего остывший ΔV увлекается в область обогрева на время τ . В это время происходит промораживание жидкости на границе раздела фаз. Таким образом периодический подвод подогретой жидкости с одной стороны обеспечивает значительное снижение скорости кристаллизации металла, а с другой сглаживает форму фронта кристаллизации в силу выравнивания тепловых условий на границе раздела фаз.

На рис. 2.15 представлены профили скорости кристаллизации металла по высоте слоя в зависимости от периода реверсной модуляции. Как и в предыдущем случае, в силу осреднения скорости форма профиля кристаллической фазы совпадает с формой профиля скорости с точностью до единиц измерения. Малые периоды модуляции течения оказывают скорее негативное влияние на процесс выравнивания профиля кристаллизации, поскольку при малых временах изменения направления вращения крупномасштабного вихря его скорость так же оказывается малой. Это снижает эффективность конвективного теплоподвода к границе раздела фаз. При увеличении периода модуляции увеличивается максимальная скорость

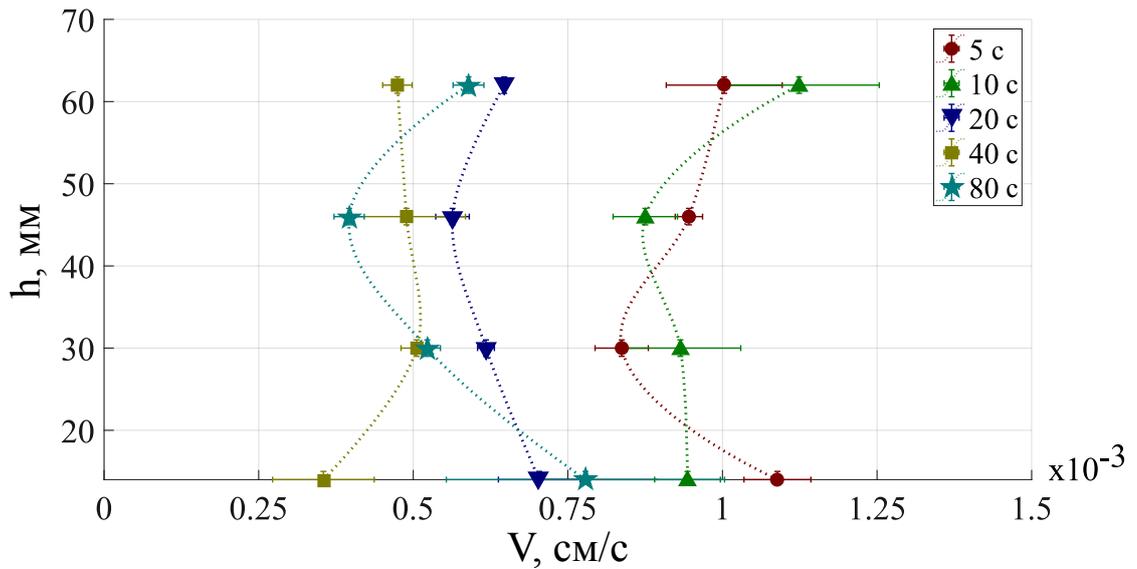


Рис. 2.15. Распределение скорости движения фронта кристаллизации по высоты слоя для разных периодов реверсной модуляции БМП.

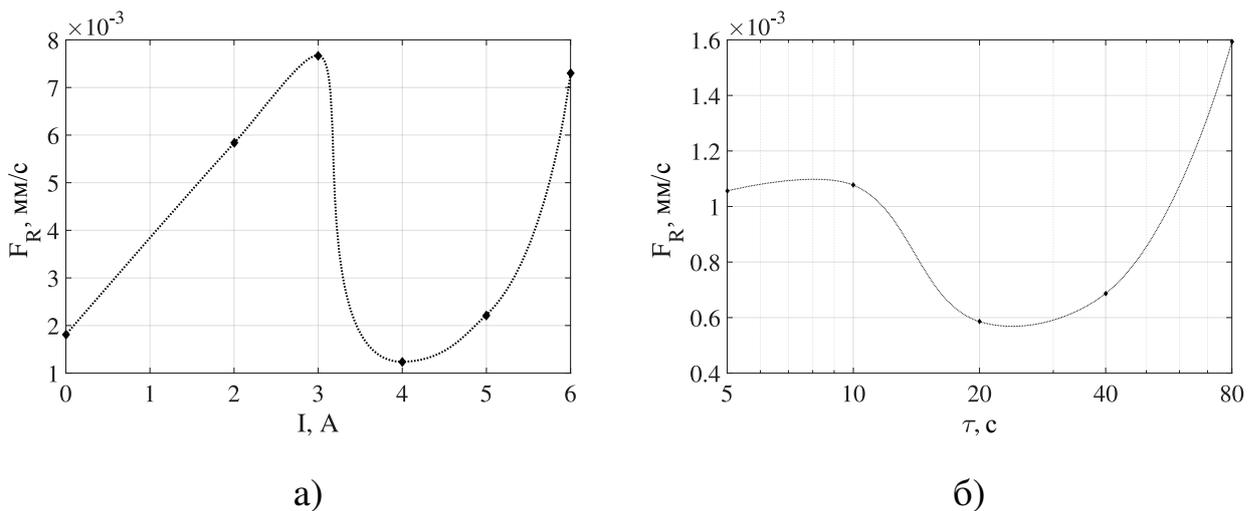


Рис. 2.16. Выравнивание профиля фронта кристаллизации: а) зависимость от питания ЛИМ, б) зависимость от периода модуляции БМП.

крупномасштабного течения, поскольку силовое воздействие в одном и том же направлении продолжается в течение большего интервала времени. В этом случае конвективное течение обеспечивает долговременный приток горячей жидкости в верхней части слоя, за счет чего искажается форма профиля кристаллизации (рис. 2.15, кривая 80 с). Промежуточные значения периода реверсной модуляции обеспечивают наилучшее сглаживание фронта кристаллизации, за счет ограничения скорости подвода нагретой жидкости.

На рис. 2.16 приведена зависимость параметра неровности фронта кристаллизации от периода реверсной модуляции. Наличие локального минимума на кривой объясняется описанным выше физическим механизмом конвективной теплопередачи. Кроме того, интересно сравнить рис. 2.16а и 2.16б. Модуляция течения (или точнее управление течением путём модуляции питания индуктора) позволяет почти на порядок понизить параметра неровности фронта кристаллизации по сравнению с режимом стационарного перемешивания.

В основе физических процессов, влияющих на степень сглаживания фронта кристаллизации лежит механизм периодического подвода теплоты в зону фазового перехода вынужденным течением. В свою очередь управление структурой течения осуществляется за счет изменения характеристик питания индуктора ЛИМ. Это обеспечивает широкие технические возможности изменения режима заморозки металла. Изменение амплитуды питающего тока приводит к изменению величины электромагнитного воздействия и, как следствие, к изменению скорости течения жидкого металла. В данном случае напряжение на каждой фазе питания ЛИМ изменялось по гармоническому закону от нуля до максимального значения, со-

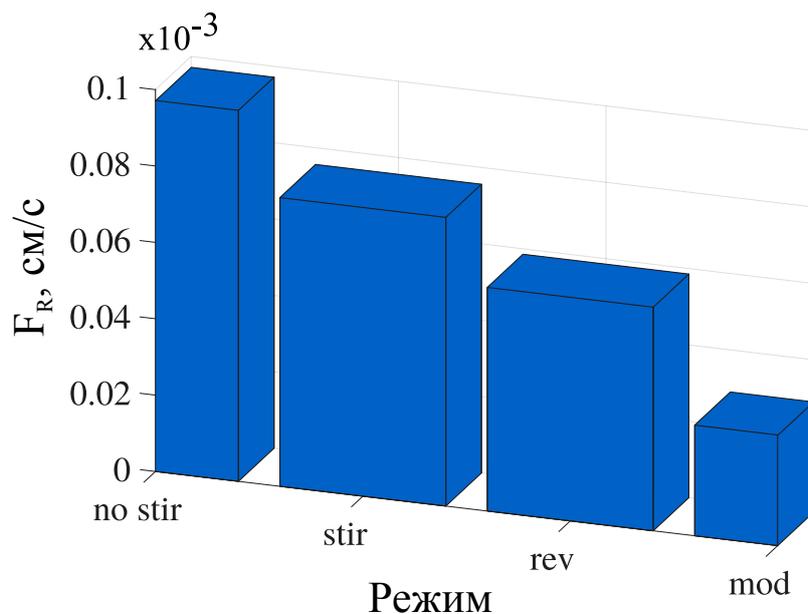


Рис. 2.17. Значения параметра выравнивания фронта кристаллизации в различных режимах перемешивания металла: без принудительного перемешивания, постоянное электромагнитное перемешивание, реверсные модуляции перемешивающего течения, амплитудные модуляции течения.

ответствующего току 4.0 А. Период модуляции составлял 20 с. Такие параметры были выбраны для сравнения с режимом, обеспечивающим наилучшее уплощение границы раздела фаз.

Механизм амплитудной модуляции течения схож по своей сути с механизмом модуляции реверсивной. Нагретый металл увлекается течением в область фазового перехода, после чего течение затухает по мере уменьшения интенсивности внешнего силового воздействия. При этом объём нагретой жидкости отдаёт избыточную теплоту в окружающую среду. Основное отличие от режима реверсных модуляций заключается в том, что данный жидкий элемент не возвращается в область подогрева, а остаётся в зоне фазового перехода и выталкивает переохлаждённую жидкость из придонной области в зону обогрева. Таким образом достигается дополнительное выравнивание границы раздела фаз по высоте.

На рис. 2.17 приведена сравнительная диаграмма параметра неровности фронта кристаллизации в зависимости от режима перемешивания жидкого металла. Слева на право приведены режимы без перемешивания («no stir»), стационарное перемешивание («stir»), реверсная модуляция течения («rev») и амплитудная модуляция («mod»). Хорошо видно, что именно механизм амплитудной модуляции обеспечивает наибольшее сглаживание фронта кристаллизации.

2.6. Выводы по главе

Выводы по методической задаче:

Разработанный метод локализации положения кристаллической фазы металла позволяет проводить измерения с высокой точностью без внесения искажений в процесс фазового перехода. Итоговая погрешность определения скорости движения фронта кристаллизации связана в первую очередь со сложным характером роста кристаллов и рассеянием ультразвука на неровностях кристаллической фазы.

Выводы по физической задаче:

Увеличение силы тока питающего индуктор бегущего магнитного поля (т.е.

рост магнитного потока) до 5.0 А и выше обеспечивает максимальную среднюю скорость течения и достижение участка насыщения зависимости средней скорости от тока. Было установлено, что низкочастотная модуляция БМП влияет на динамику течений и представляет особый интерес для исследований. Модуляции изменяют структуру потока, генерируемого в жидком металле. Низкочастотные модуляции приводят к возникновению дополнительной пульсации скорости. Это оказывает благотворное влияние на эффективность перемешивания металла.

Применение реверсивных модуляций приводит к разрушению крупномасштабного среднего вихря. По мере увеличения периода модуляции возрастает и энергия пульсационной составляющей течения и снижение энергии стационарной составляющей. Этот эффект не только значительно увеличивает перемешивание жидкости, но также оказывает существенное влияние на теплообмен в объеме металла.

Эффект электромагнитного воздействия на процесс кристаллизации металлического расплава является опосредованным. Изменение характеристик питания индуктора БМП приводит к изменению топологии магнитного поля. Последнее изменяет структуру течения расплавленного металла и, как следствие, эффективность конвективного теплопереноса вдоль всей межфазной границы расплав/кристаллическая фаза. Наконец, изменение условия теплоподвода оказывает прямое влияние на скорость фазового перехода в каждой отдельной точке границы раздела фаз.

В отсутствие принудительного перемешивания подвод тепла в 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.

Модуляции БМП оказывают 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 так же предложен физический механизм, объясняющий наблюдаемые изменения в поведении системы.

Глава 3

МГД-очистка проводящих сред

3.1. Введение и постановка задачи

Очистка руд и расплавленных металлов является актуальной и экономически важной задачей металлургии. Очищенный металл обладает повышенными качествами: механической прочностью и однородностью свойств. Это играет значительную роль в металлургическом производстве.

В промышленности очистка металла производится методами флотации, долговременного отстаивания расплава руды и электромагнитной сепарации [106–108]. Во втором случае разделение компонент руды происходит под действием сил тяжести и плавучести за счёт разницы плотностей металла и неметаллических включений (оксидов, сульфидов и силикатов). При очистке больших объёмов расплавленного металла, данный способ становится энергозатратным, поскольку требует непрерывного поддержания металла в расплавленном виде в течение нескольких дней подряд.

Промышленное применение традиционных методов разделения жидких фаз является малоэффективным в плане энергозатрат процессом. В то же время электромагнитное управление процессами хорошо зарекомендовало себя в металлургическом производстве. Идея повышения эффективности разделения компонент смеси за счёт повышения эффективной разности плотностей несущей жидкости и примесных включений была предложена ещё в середине прошлого века [158, 159]. В электропроводной среде внешние электрическое и магнитное поля способны создать объёмную силу, приводящую к изменению эффективного веса жидкости. При этом электромагнитная сила не оказывает влияния на непроводящие включения. Квазиутяжеление металла электромагнитной силой приводит к выталкиванию неметаллических примесей на поверхность силами плавучести [108, 159]. В даль-

нейшем, всплывший шлак может быть механически удален с открытой поверхности металла вместе с оксидной плёнкой. Несмотря на наличие теоретических моделей электромагнитной очистки, эффективного промышленного устройства так и не было создано. Основная проблема состоит в том, чтобы выбрать наилучшую конструкцию блока сепарации и конфигурацию электромагнитных сил.

Экспериментальное моделирование процесса очистки металла и сепарации примесей сопряжено с рядом сложностей. Помимо высоких температур и химической активности рабочих сред, нетривиальной является проблема внесения в расплав металла примеси строго заданного химического состава и пропорций. Не менее важной проблемой исследования является метод контроля уровня чистоты металлических образцов. Традиционным методом оценки чистоты сплавов в промышленности является анализ шлифов отливок. Естественным является также и химический анализ специально взятых проб. Недостатком перечисленных методик являются значительные временные и экономические затраты. Кроме того, химический анализ нацелен на поиск конкретных элементов в составе образца, что существенно снижает уровень получаемой информации при разработке методов получения сверхчистых материалов.

Использование водных растворов электролитов позволяет частично моделировать поведение расплавов металлов. Так в [160] экспериментально показана возможность управления всплытием непроводящих частиц в водном растворе электролита (поваренной соли). Прозрачность и текучесть электролитических растворов при комнатных температурах делает их привлекательной средой для исследования МГД течений при помощи как оптических [161, 162], так и электромагнитных методов [163] в лабораторных условиях. Кроме того, управление плотностью электролитических растворов находит применение в процессе обогащения руд. Измельченную руду взвешивают в растворе электролита. Затем, изменяя плотность жидкости, добиваются всплытия неметаллических включений. Обогащённая руда обладает большей чистотой и может быть отправлена на переплавку непосредственно после обработки.

Тем не менее, ионный механизм проводимости и явление электролиза в растворах электролитов оказывают влияние на характер протекания процессов. Потому, результаты полученные на электролитических растворах не могут быть в полной мере перенесены на процессы в проводящих (металлических) расплавах. Ещё одним ограничением, вытекающим из характера проводимости растворов, является ограничение электромагнитных методов силового воздействия на среду кондукционной (контактной) генерацией сил, поскольку для создания электрического тока необходима диссоциация молекул электролита и разрушение ионных связей между атомами. Этот факт не позволяет применять индукционные методы генерации сил.

Целью исследования является изучение общих тенденций и закономерностей разделения фаз в многокомпонентной проводящей жидкости от параметров (в том числе силовых) процесса.

3.2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 3.1) состоит из сепарационного плексиглазового канала 1, помещенного между полюсами электромагнита 2. На вход канала из расходного бака 3 циркуляционным насосом 4 через переливной бак 5 подается раствор электролита. После канала 2 жидкость по трубопроводу поступает в расходомерную ячейку 6, после которой, в зависимости от положения автоматических электромагнитных клапанов 7, она направляется либо в измерительную ячейку 8 (после нее жидкость поступала обратно в расходный бак 3), либо в обход ее сразу в расходный бак 3. Последний режим был необходим для фоторегистрации частиц в жидкости в измерительной ячейке при помощи зеркального фотоаппарата 9 с компьютерным управлением при значительных (более 5 см/с) скоростях проточного течения электролита через систему. Подсветка измерительной ячейки осуществлялась светодиодным источником света 10, рассеянного через матовые стекла 11. Расход жидкости в системе задавался положением регулирующих вентилей 12 и определялся доплеровским анемометром 13 (УДА) DOP 2000 Signal Processing. Скорость звука в щелочном растворе для корректного измерения скорости потока при помощи УДА определялась в отдельном эксперименте и составила 1778 м/с.

В работе исследуется процесс сепарации в канале (рис. 3.2), 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 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 магнитного поля в этих областях. Электрический ток, проходя через электролит, взаимодействует с внешним постоянным магнитным полем создавае-

мым электромагнитом, состоящим из ферромагнитного магнитопровода 9 и двух катушек 10. Катушки подключены последовательно для увеличения величины магнитного поля в зазоре. 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.

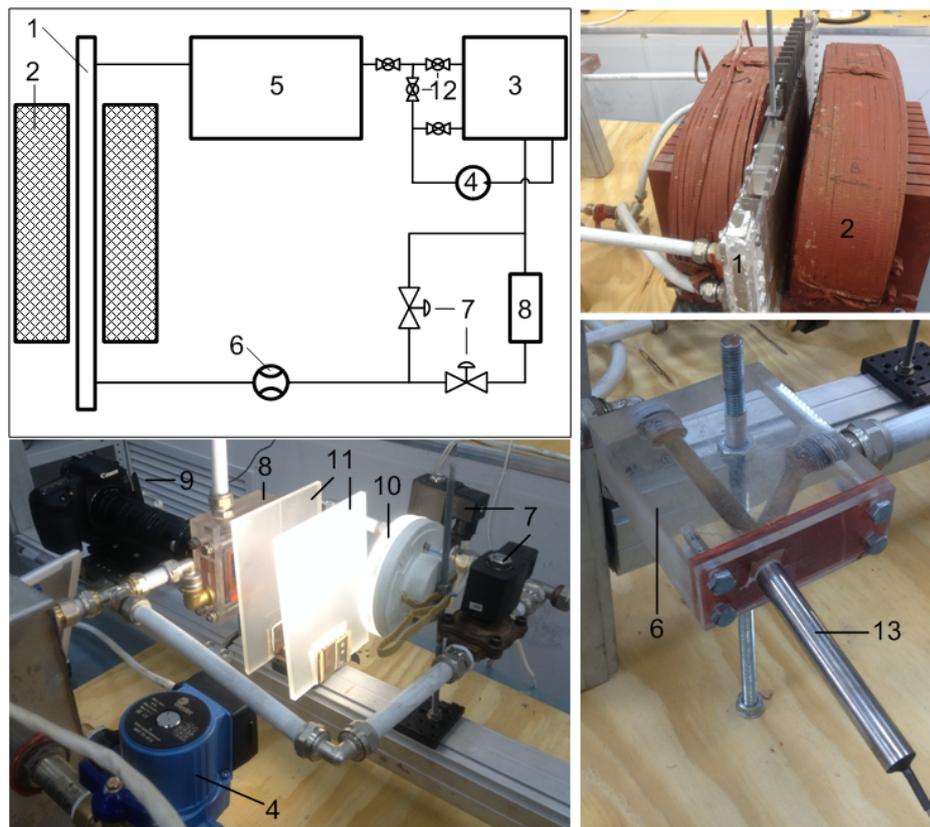


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки: 1. сепарационный канал, 2. электромагнит, 3. расходный бак, 4. циркуляционный насос, 5. переливной бак, 6. расходомерная ячейка, 7. электроклапаны, 8. измерительная ячейка, 9. фотокамера, 10. источник света, 11. матовые стекла, 12. регулирующие вентили, 13. датчик УДА.

Питание электромагнита осуществлялось источником постоянного тока HEIDEN power GmbH HP 15100. Ток через электролит создавался источником постоянного тока MASTECH DC Power Supply NY 3005-2. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор калийной щелочи. Примесью служили карбоновые частицы размером от 10 до 300 мкм.

Перед началом опытов была измерена зависимость магнитного поля в зазоре электромагнита от величины тока в питающих катушках. Измерения магнитной индукции производились с помощью тесламетра Lake Shore 421 Gaussmeter. Полученная зависимость имеет линейный характер.

Концентрация щелочного раствора была определена по его плотности при помощи ареометра. Плотность среды (с учетом примеси карбоновых частиц) составила $1.144 \pm 0.001 \text{ г/см}^3$. Концентрация щелочи составляет $C \sim 16 \%$. Измеренная концентрация почти в два раза меньше расчетной, что связано со способностью щелочи впитывать влагу из воздуха. По причине недостаточной концентрации (а следовательно и плотности) модельные частицы не взвешены в щелочи и оседают под действием силы тяжести. Плотность частиц составляет $1.20 - 1.25 \text{ г/см}^3$. С целью предотвращения полного оседания частиц примеси, раствор механически

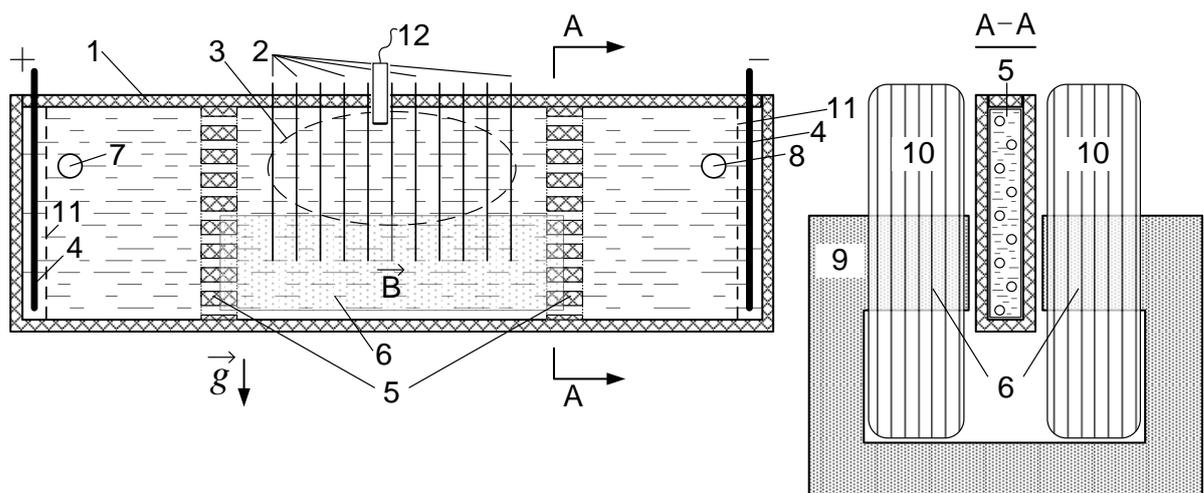


Рис. 3.2. Схема сепарационного канала установки: 1. сепарационный канал, 2. подвижные перегородки, 3. область действия электромагнитных сил, 4. медные электроды, 5. выравниватели потока, 6. полюса электромагнита, 7. входной штуцер, 8. выходной штуцер, 9. магнитопровод, 10. катушки электромагнита, 11. приэлектродные сетки, 12. датчик УДА.

перемешивается в основном и переливном баках при помощи лопастей, вращаемых электроприводами.

3.3. Методы измерения концентрации примесей

Относительная концентрация частиц примеси определялась в экспериментах двумя методами. Измерения проводились в измерительной ячейке при помощи фотокамеры Canon EOS 60D. Ячейка представляла собой U-образный каркас из плексигласа, с каналами в нижней части, обеспечивающими проточное течение щелочного раствора. 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. Слой щелочи в ячейке просвечивался излучением от светодиодной лампы. Свет пропускаться через три матовых стекла с целью добиться равномерной освещенности и избавиться от зон засветки вокруг светодиодов. Толщина слоя щелочи в ячейке составляла 10 мм. Глубина резко изображаемого пространства составляла при этом 2 мм. В ходе опытов, наводка фотокамеры по резкости устанавливалась на положение среднее, между двумя стеклами. То есть рассматривалась срединная область измерительной ячейки, отвечающая наиболее интенсивному проточному течению. Съёмка производилась с выдержкой 1/100 с, светочувствительностью 800 ISO. В силу малой скорости проточного течения (10 – 15 мм/с) смещение частиц примеси за время получения кадра оказывалось недостаточным для заметного ухудшения качества изображений. Частота съёмки фотокамерой составляла 2 кадра в минуту при общей продолжительности опыта 90 минут. Полученные кадры подвергались цифровой обработке для получения относительного значения концентрации примеси.

Обработка изображений производилась в среде MatLab. В первую очередь из фотографии вырезалась квадратная область, для которой в дальнейшем и

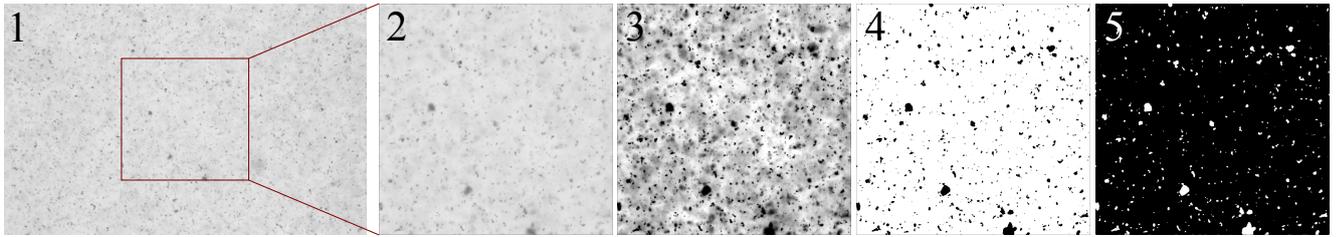


Рис. 3.3. Пример обработки фотографий течения щелочи: 1. исходное фото, 2. полутоновое изображение, 3. полутоновое изображение с гамма-коррекцией, 4. бинаризованное изображение, 5. инвертированное бинаризованное изображение.

происходила обработка. Это позволяло исключить влияние границ области на уровень освещенности и концентрацию в застойных зонах измерительной ячейки. Полученное изображение из полноцветного RGB конвертировалось в двумерный массив оттенков серого. Преобразование в полутоновое изображение производилось в два этапа. На первом этапе полноцветное изображение преобразовывалось в полутоновое с коэффициентом гамма-коррекции равным единице и заданным диапазоном уровня яркости исходного изображения определяемым минимальной и максимальной яркостью обрабатываемого фото. На втором этапе происходило повторное преобразование полученного изображения в полутоновое с применением гамма-коррекции. Исходный и конечный диапазоны яркости изображения лежали в пределах от нуля до единицы. Для повышения контрастности полутонового изображения происходило его затемнение за счёт гамма-коррекции с $\gamma = 1.5$. Затем эмпирически подбиралось значение уровня отсечки при преобразовании полутонового изображения в бинарное (черно-белое). Критерием выбора служило требование различить максимально мелкую фазу примеси и при этом сохранить изображение достаточно ярким для возможности локализации отдельных частиц. Для подавления цифрового шума в бинарном изображении применялась медианная фильтрация по девяти близлежащим пикселям в каждом направлении.

После обработки изображения использовались два метода анализа. В первом случае подсчитывалось общее количество примеси (единичных значений, отве-

чающих наличие частиц) на нулевом фоне. То есть концентрация находилась по относительному уровню затемнения изображения как отношение количества тёмных (со значением единица) пикселей к общему количеству пикселей (полному размеру обрабатываемой области изображения).

Во втором случае проводился фракционный анализ изменения концентрации. При этом в бинарном изображении стандартными программными средствами находились положения отдельных частиц примеси, подсчитывался их размер и положение. Положения частиц на координатных осях определялись как разницы между максимальной и минимальной координатами, занимаемой частицей на соответствующей оси. Эффективный размер частицы оценивался как радиус круга, имеющего ту же площадь, что и у рассматриваемой частицы. Полученные данные разделялись по наперёд заданным диапазонам размеров частиц. При этом из рассмотрения исключались частицы с эффективным радиусом меньше 1.33 мкм и больше 263 мкм. Кривые изменения концентраций отдельных фаз со временем складывались с соответствующими весами для получения итоговой зависимости.

Рис. 3.3 иллюстрирует стадии обработки фотографий. В результате процесса обработки серии фото получалась зависимость относительной концентрации частиц

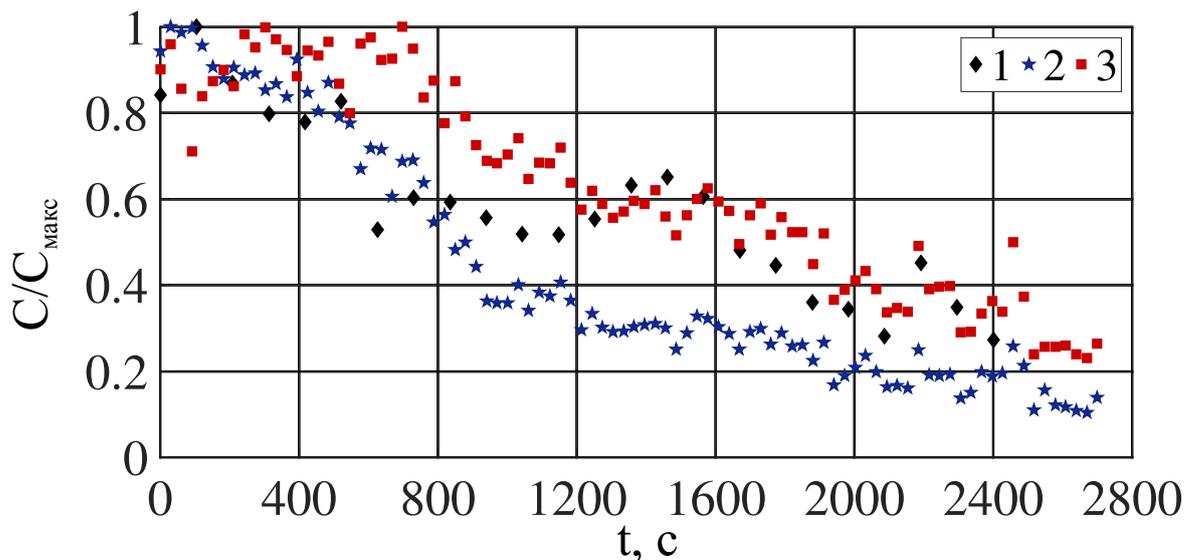


Рис. 3.4. Изменение концентрации примеси в щелочи, полученное тремя методами: 1. ультразвуковые измерения, 2. оптические измерения, 3. фракционный анализ.

примеси от времени в долях отношения площади, занимаемой частицами на фото к общей площади фото. Пример графика, полученного при гравитационном осаждении частиц, приведен на рис. 3.4.

Отличие итоговых концентрационных кривых на начальных этапах очистки (до 800 с) обусловлено преимущественно вкладом крупной фракции, быстро всплывающей под действием электромагнитных сил после включения электромагнитной силы. Порог отсечки бинаризации изображения в оптическом методе несколько выше, чем в фракционном анализе, что занижает значение концентрации кривой 2 по сравнению с кривой 3. Это сделано для исключения цифрового шума при анализе уровня затемнения фото так как наименьшая фракция и частицы не попавшие в область четко различимого изображения создают общее фоновое затемнение. Дальнейшее спадание концентрации, полученной из оптического метода, обусловлено сепарацией мелкой фракции и коагулированных частиц. Последние частично исключаются в фракционном анализе как возможные артефакты изображения. Наиболее крупные частицы вносят значительный вклад в затемнение изображения при оптическом анализе, поэтому кривая 2 спадает значительно быстрее кривых 1 и 3. Хорошее согласие кривых 1 и 3 на временах более 800 с объясняется рассеянием ультразвука преимущественно на мелкой фракции.

3.4. Результаты

В рамках данной задачи исследовалась эффективность процесса сепарации примеси в зависимости от величины приложенной электромагнитной силы, скорости транзитного течения через сепарационный канал, положения задерживающих перегородок, вида верхней поверхности электролита в канале и угла наклона канала к направлению силы тяжести.

Поскольку степень утяжеления электролита зависит от величины приложенной электромагнитной силы, можно ожидать, что с увеличением воздействия разность весов примесных частиц и несущей среды так же будет возрастать, и эффективность

сепарации повысится. Тем не менее, под действием электромагнитной силы возможно образование вихревых течений в электролите в силу наличия множественных неоднородностей в растекании электрического тока, обусловленных конструкцией канала. Интенсивность таких течений возрастает с ростом приложенной силы. Это приводит к перемешиванию среды и потенциальному снижению эффективности процесса очистки. Поэтому необходимо найти режим, отвечающий наилучшему балансу между механизмами квазиутяжеления жидкости и генерации перемешивающих течений. Уровень электромагнитного воздействия контролировался за счёт изменения индукции магнитного поля, поскольку изменение силы тока, протекающего через электролит сопряжено с некоторыми трудностями. Под действием больших токов, протекающий на токоподводах электролиз приводил к образованию большого количества газовых пузырей. Это несколько снижало электрический контакт с раствором электролита. Кроме того, часть примесных частиц увлекалась пузырьками в процессе флотации и создавало дополнительный нежелательный механизм снижения концентрации. С другой стороны, пропускание через электролит малых токов затруднено в силу протекания электрохимических процессов на поверхностях токоподводов, приводящих к появлению разницы потенциалов на границе жидкость/металл. Таким образом, все измерения проводились при проте-

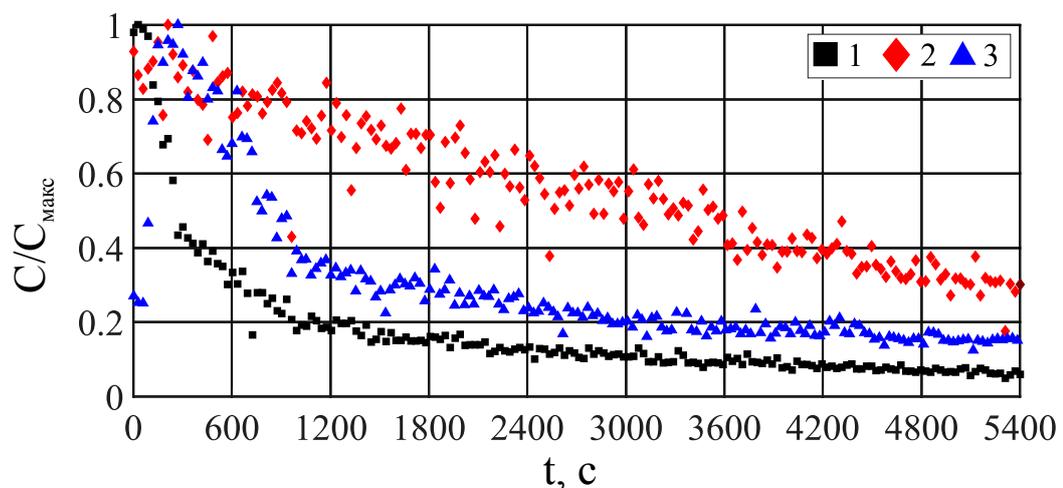


Рис. 3.5. Изменение концентрации карбоновых частиц в щелочи в процессе сепарации при различных значениях внешнего магнитного поля B : 1. $B = 0.235$ Тл, 2. $B = 0.465$ Тл, 3. $B = 0.695$ Тл.

кании через канал электрического тока величиной 1.7 А. При этом значении силы тока удавалось нивелировать влияние химических процессов на электрические свойства системы и одновременно избежать интенсивного газовыделения.

На рис. 3.5 приведены кривые изменения концентрации со временем при различных величинах приложенного внешнего магнитного поля. Наилучший результат показывает воздействие магнитным полем минимальной величины (0.235 Тл). В этом случае вертикальная скорость, измеренная датчиком УДА составляла приблизительно 7 мм/с. При приложении магнитного поля наибольшей величины $B = 0.695$ Тл вертикальная составляющая скорости претерпевала значительные колебания в диапазоне значений 5 – 10 мм/с. В промежуточном варианте, при наложении магнитного поля индукцией $B = 0.465$ Тл спадение концентрации примеси происходило по линейному закону (в предыдущих случаях спадение происходило экспоненциально). Вертикальная составляющая скорости находилась в пределах 10 – 12 мм/с.

Изменение скорости транзитного течения через сепарационный канал (и как следствие расхода) напрямую определяет экономическую эффективность процесса очистки. Поскольку в промышленных приложениях более удобным является

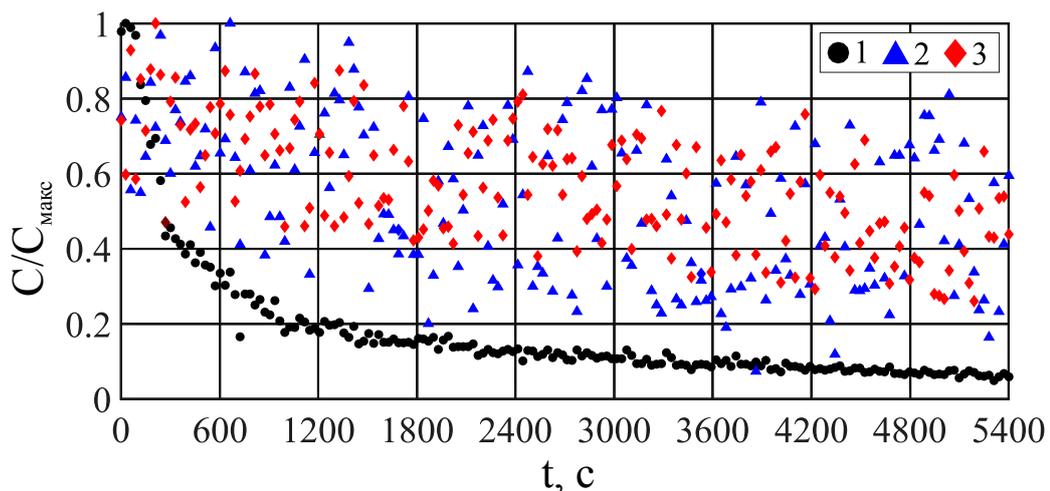


Рис. 3.6. Относительное изменение концентрации карбоновых частиц в щелочи в процессе сепарации при различных расходах Q в системе прокачки жидкости: 1.- $Q = 5.88 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, 2. $Q = 10.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, 3. $Q = 14.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

очистка расплавленного металла в процессе транспортировки, а не перекачивание в замкнутом контуре (исключение могут составлять контуры охлаждения ядерных реакторов на быстрых нейтронах, если требуется периодически непрерывно очищать теплоноситель от окислов). На рис. 3.6 приведены концентрационные кривые для нескольких значений расхода. С ростом скорости транзитного течения уменьшается время нахождения «загрязнённой» среды в области электромагнитной очистки. Как следствие, понижается эффективность сепарации. Кроме того, быстрое проточное течение приводит к колебаниям концентрации вследствие динамического процесса осаждения примесных частиц на удерживающих перегородках и вымывания осевших частиц набегающим потоком. Образующиеся между перегородками течение имеет двухвихревую структуру. Размер и интенсивность вихрей изменяется со временем. Средняя скорость течения приблизительно 8 мм/с для расходов $Q = 10.4 \cdot 10^{-6}$ и $Q = 14.9 \cdot 10^{-6}$ м³/с и составляет приблизительно 11 мм/с для расхода $Q = 5.88 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Малое различие скоростей вторичных течений говорит о том, что время нахождения жидкости в области сепарации влияет на эффективность очистки сильнее, чем интенсивность вторичных течений.

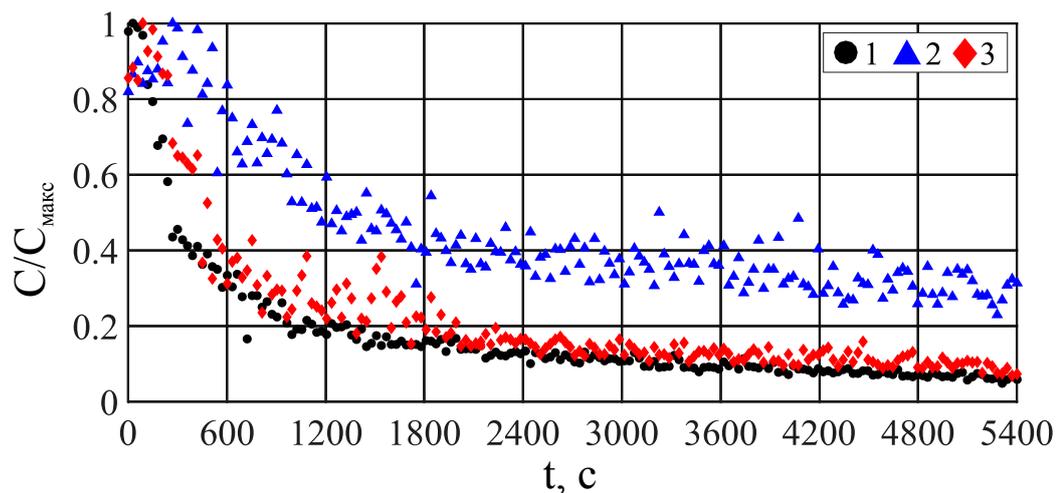


Рис. 3.7. Относительное изменение концентрации карбоновых частиц в щелочи в процессе сепарации при различных положениях перегородок в сепарационном канале относительно его верхнего уровня: 1. 132 мм, 2. 100 мм, 3. 68 мм.

Изменение положения удерживающих перегородок влияет на общую площадь поверхности, удерживающей примесь. Поднимая перегородки из канала можно также уменьшить гидравлическое сопротивление потоку электролита и изменить скорость жидкости в области электромагнитного воздействия. На рис. 3.7 приведены концентрационные кривые для трёх положений удерживающих перегородок. Глубина погружения 132 мм соответствует полностью погруженным в канал пластинам (перегородки создают наибольшее сопротивление потоку), глубина 68 мм — нижние края пластин совпадают со свободной поверхностью электролита (т.е. перегородки не препятствуют протеканию жидкости). В промежуточном положении пластины лишь частично препятствуют протеканию жидкости. Как видно из рисунка эффективности сепарации близки при полностью опущенных и полностью выдвинутых перегородках в канале. В то же время, частично выдвинутые перегородки приводят к ухудшению процесса очистки почти в два раза. Это объясняется образованием в канале более интенсивных вихревых структур, перемешивающих жидкую смесь и увлекающих осевшие на перегородках частицы. Скорость таких вторичных течений доходит до 20 мм/с и превышает скорость транзитного течения через канал.

Одной из важных проблем процесса очистки является вопрос о том, где и каким образом будет удерживаться извлеченная из основного потока примесь. Для того чтобы установить вклад сил поверхностного натяжения на верхней свободной поверхности жидкости были произведены дополнительные опыты с твёрдой верхней крышкой. Крышка изготавливалась из щелочестойкой резины и размещалась в канале горизонтально. При этом из канала полностью извлекались удерживающие перегородки и датчик УДА. Концентрационные кривые для двух типов верхней поверхности жидкости приведены на рис. 3.8. Отличие итоговой концентрации относительно невелико, что говорит об ограниченном влиянии сил поверхностного натяжения электролита на процесс очистки. Тем не менее, конечное значение концентрации в опыте со свободной поверхностью свидетельствует о частичном удержании примесных частиц силами поверхностного натяжения.

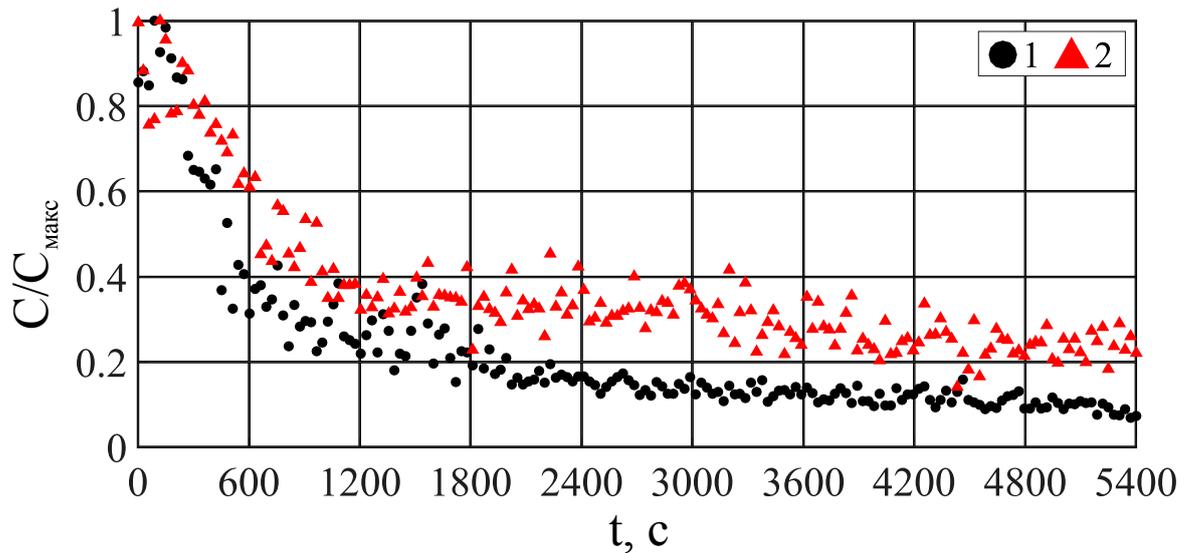


Рис. 3.8. Относительное изменение концентрации карбоновых частиц в щелочи в процессе сепарации при различных типах верхней поверхности сепарационного канала: 1. свободная поверхность, 2. твёрдая крышка.

Структура вторичных течений между задерживающими перегородками схожа с конвективным факелом. Вследствие этого наклон канала по отношению к направлению силы тяжести способен изменить вид вторичного течения (вытянутый вдоль вертикальной оси канала валик). Канал был наклонён за счёт гибкости со-

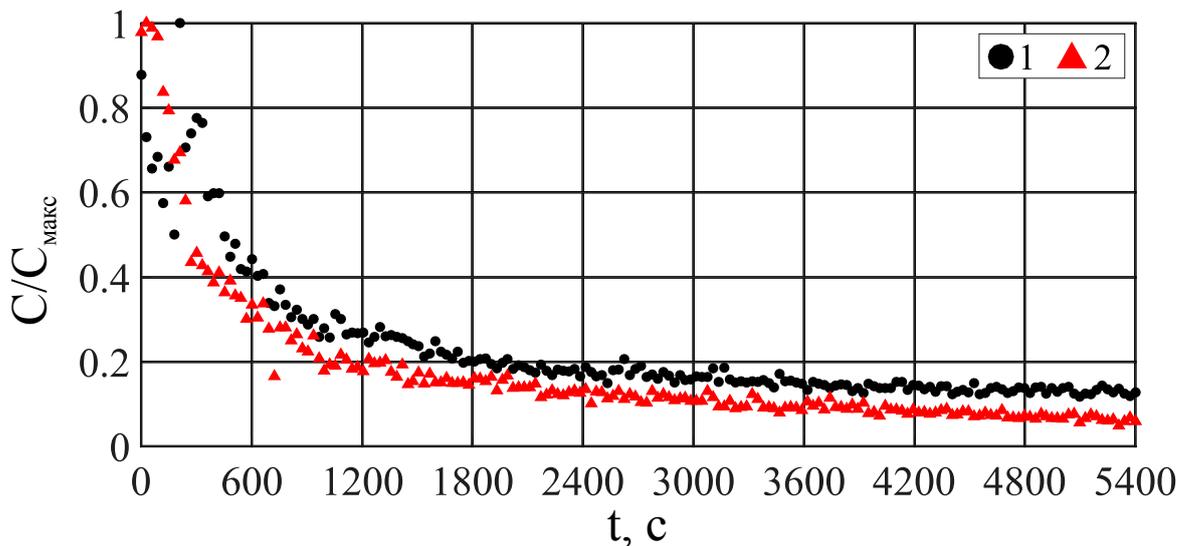


Рис. 3.9. Относительное изменение концентрации карбоновых частиц в щелочи в процессе сепарации при различных углах наклона сепарационного канала к направлению силы тяжести: 1. $\alpha = 0^\circ$, 2. $\alpha = 4.6^\circ$.

единительных трубок из металлопластика. Угол наклона определялся при помощи цифрового уровнемера. Наклон канала приблизительно на 4.6° слабо сказывается на эффективности сепарации хотя и слегка увеличивает её (рис. 3.9). Измерения при помощи УДА показывают, образующееся при наклоне канала течение действительно является собой крупномасштабную циркуляцию с дополнительными вихрем большей интенсивности в области транзитного потока.

3.5. Заключение

Выводы по методической задаче:

Разработанные оптические методы определения концентрации примесей позволили проанализировать как общие тенденции изменения концентрации при электромагнитной очистке жидкого проводника, так и определить закономерности изменения фракционного состава примесей. Электромагнитное воздействие обеспечивает быстрое вытеснение из объёма жидкости фракций с наибольшими размерами. Фракционный анализ показал, что значительная (вплоть до одного часа) продолжительность процесса очистки необходима для извлечения именно мельчайших фракций. В рамках данной задачи это фракции с характерными размерами от 1 до 60 мкм. Именно извлечение примесей микронных размеров вызывает наибольшие сложности при использовании традиционных методов – отстаивания и механической фильтрации. Потому, электромагнитное вытеснение примесей является перспективным методом получения высокочистых металлов.

В ходе работы ультразвуковой доплеровский анемометр впервые был использован для измерения концентрации примесных частиц в жидкой среде. Поскольку принцип измерений концентрации основывается на анализе ультразвукового эхо (а именно интегральном уровне пульсаций эхо-сигнала), ультразвуковой метод позволяет определять концентрацию преимущественно мелкой фракции (или более корректно, фракции с размерами частиц обеспечивающих наибольшую эффективность рассеяния ультразвука заданной частоты). Таким образом, разработанный

метод позволяет не только измерять концентрацию твёрдых включений в жидкой среде, но и качественно судить о размерах примесных частиц по частоте рассеиваемого ультразвука.

Выводы по физической задаче:

Электромагнитное воздействие на двухфазную электропроводящую текучую среду, содержащую примеси отличной проводимости, приводит к разделению фаз. Тем не менее, повышение интенсивности силового воздействия снижает эффективность процесса за счёт генерации вторичных вихревых течений в области действия сил.

Эффективность процесса 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 к 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 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%.

Заключение

Итоги выполненного исследования

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 теплофизических 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 литературы

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 Measurement 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 вих-

- ревого 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 докладов XXI Зимней Школы по механике сплошных сред, Пермь, 12-22 февраля. — 2019. — С. 180.
26. *Matykin A., 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.
29. *Гельфгат Ю. М., Лиелаусис О. А., Щербинин Э. В.* Жидкий металл под действием электромагнитных сил. — Рига, «Зинатне», 1975. — P. 248.
30. *Кирко И. М., Кирко Г. Е.* Магнитная гидродинамика проводящих сред: учебное

- пособие. — Пермь : Перм. ун-т., 2007.
31. *Циркунов Валерий Эдуардович, Жейгур Бруно Доминикович, Сермонс Гунар Янович, Калнинь Роберт Карлович.* Бесконтактный контроль потока жидких металлов. — Рига, «Зинатне», 1973.
 32. *Хрипченко С. Ю.* Электровихревые течения в каналах МГД-устройств. — Екатеринбург: УрО РАН, 2009. — ISBN: 978-5-7691-2025-1.
 33. *Cramer A., Eckert S., Gerbeth G.* Flow measurements in liquid metals by means of the ultrasonic Doppler method and local potential probes // *The European Physical Journal Special Topics.* — 2013. — March. — no. 220. — P. 25–41.
 34. *Arasekia Hideo, Kirillov Igor R., Preslitsky Gennady V.* Sodium flow rate measurement method of annular linear induction pumps // *Nuclear Engineering and Design.* — 2012. — Vol. 243. — P. 111– 119.
 35. *Eckert Sven, Buchenau Dominique, Gerbeth Gunter, Stefani Frank, Weiss Frank-Peter.* Some recent developments in the field of measuring techniques and instrumentation for liquid metal flows // *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY.* — 2011. — Vol. 48, no. 4. — P. 490–498.
 36. *Klaus Timmel, Natalia Shevchenko, Michael Roder, Marc Anderhuber, Pascal Gardin, Eckert, Gunter Gerbeth.* Visualization of liquid metal two-phase flows in a physical model of the continuous casting process of steel // *Metallurgical and materials transactions B.* — 2014.
 37. *Stefani F., Eckert S., Ratajczak M., Timmel K., Wondrak T.* Contactless inductive flow tomography: basic principles and first applications in the experimental modelling of continuous casting // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* — 2016. — Vol. 143.
 38. *Eckert Sven, Cramer Andreas, Gerbeth Gunter.* Magnetohydrodynamics. — P. 275–294.
 39. *Elkins C.J., Alley M.T.* Magnetic resonance velocimetry: applications of magnetic resonance imaging in the measurement of fluid motion // *Exp Fluids.* — 2007. — Vol. 43, no. 6. — P. 823—858.

40. *Ooij P., Guédon A., Poelma C., Schneiders J., Rutten M.C.M., Marquering H.A., Majoie C.B. et al.* Complex flow patterns in a real-size intracranial aneurysm phantom: phase contrast mri compared with particle image velocimetry and computational fluid dynamics // *NMR Biomed.* — 2011. — Vol. 25, no. 1. — P. 14—26.
41. *Lakshmanan S., Maru W. A., Holland D. J., Mantle M. D., Sederman A. J.* Measurement of an oil–water flow using magnetic resonance imaging // *Flow Meas Instrum.* — 2016.
42. *Fouras A., Dusting J., Lewis R., Hourigan K.* Three-dimensional synchrotron x-ray particle image velocimetry // *T. J Appl Phys.* — 2007.
43. *Heindel T.J.* A review of x-ray flow visualization with applications to multiphase flows // *J Fluids Eng.* — 2011. — Vol. 133, no. 7.
44. *Yang W. Q., Peng L.* Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography // *Meas Sci Technol.* — 2002. — Vol. 14, no. 1.
45. *Dyakowski T., Jeanmeure L.F.C., Jaworski A.J.* Applications of electrical tomography for gas–solids and liquid–solids flows: a review // *Powder Technol.* — 2000. — Vol. 112, no. 3. — P. 174–192.
46. *George D.L., Torczynski J.R., Shollenberger K.A., O’Hern T.J., Ceccio S.L.* Validation of electrical-impedance tomography for measurements of material distribution in two-phase flows // *Int J Multiph Flow.* — 2000. — Vol. 26, no. 4. — P. 549–581.
47. *Ricou Rene, Vives Charles.* Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated magnet probe // *Int. J. of Heat Mass Transfer.* — 1982. — Vol. 25, no. 10. — P. 1579–1588.
48. *Rabiger D., Eckert S., Gerbeth G.* Measurements of an unsteady liquid metal flow during spin-up driven by a rotating magnetic field // *Exp Fluids.* — 2010. — Vol. 48. — P. 233–244.
49. *Andreev Oleg, Kolesnikov Yuri, Thess Andre.* Application of the ultrasonic velocity profile method to the mapping of liquid metal flows under the influence of a

- non-uniform magnetic field // *Exp Fluids*. — 2009. — Vol. 46. — P. 77–83.
50. Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pavlinov A. A combined liquid sodium flow measurement system // *Magnetohydrodynamics*. — 2016. — Vol. 52, no. 1. — P. 3–10.
51. Motevalli V., Marks C. H., McCaffrey B. J. Cross-correlation velocimetry for measurement of velocity and temperature profiles in low-speed, turbulent, nonisothermal flows // *Journal of Heat Transfer*. — 1992. — Vol. 114, no. 2. — P. 331.
52. Mamykin A., Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Pakholkov V., Rogozhkin S., Vasiliev A. Turbulent convective heat transfer in an inclined tube with liquid sodium // *Magnetohydrodynamics*. — 2015. — Vol. 51, no. 2. — P. 329–336.
53. Мамыкин А. Д. Измерение скорости неизотермических потоков жидких металлов методом кросскорреляции // Материалы конференции «Актуальные проблемы математики, механики, информатики». — 2014.
54. Faraday M. Experimental researches in electricity // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. — 1832. — jan. — Vol. 122, no. 0. — P. 125–162.
55. Young F. B., Gerrard H., Jevons W. On electrical disturbances due to tides and waves // *Philosophical Magazine Series 6*. — 1920. — jul. — Vol. 40, no. 235. — P. 149–159.
56. Williams E. J. The induction e.m.f. in a moving liquid by a magnetic field and its application to an investigation of the flow of liquids // *Proc. Phys. Soc.* — 1930. — may. — Vol. 125, no. 3159. — P. 765–767.
57. Шерклиф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода. — Мир, 1965.
58. Побережский Л. П. Измерение скорости и электропроводности потоков ионизированного газа // *Журнал технической физики*. — 1963. — P. 1464–1469.
59. von Weissenfluh T. Probes for local velocity and temperature measurements in liquid metal flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 1985. — Vol. 28, no. 8. — P. 1563–1574.
60. Poornapushpakala S., Gomathy C., Sylvia J. I., Babu B. Design, development and

- performance testing of fast response electronics for eddy current flowmeter in monitoring sodium flow // *Flow Measurement and Instrumentation*. — 2014. — aug. — Vol. 38. — P. 98–107.
61. *Cramer A., Varshney K., Gundrum Th., Gerbeth G.* Experimental study on the sensitivity and accuracy of electric potential local flow measurements // *Flow Measurement and Instrumentation*. — 2006. — Vol. 17, no. 1. — P. 1–11.
 62. *Partinen J., Szekely J., Vives C., Holap L.* Fluid flow and free surface phenomena in rotary electromagnetic stirring of a metallic melt // *ISIJ International*. — 1995. — Vol. 35. — P. 292–301.
 63. *Eckert S., Gerbeth G., Witke W., Langenbrunner H.* Mhd turbulence measurements in a sodium channel flow exposed to a transverse magnetic field // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2001. — Vol. 22. — P. 358–364.
 64. *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. — P. 45–52.
 65. *Kolesnichenko Ilya, Pavlinov Alexander, Golbraikh Ephim, Frick Peter, Kapusta Arkadii, Mikhailovich Boris.* The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields // *Experiments in Fluids*. — 2015. — apr. — Vol. 56, no. 5.
 66. *Hayashi H., Becker A., Evans J.W.* Toward a probe for velocity measurement in molten metals at high temperatures // *Metallurgical and materials transactions B*. — 1999. — Vol. 30, no. 4. — P. 623–630.
 67. *Kenjeres S., ten Cate S., Voesenek C.J.* Vortical structures and turbulent bursts behind magnetic obstacles in transitional flow regimes // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2011. — Vol. 32, no. 3. — P. 510 – 528. — 8th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Marseille, France, June 9 to 11, 2010.
 68. *Votyakov E. V., Zienicke E.* Numerical study of liquid metal flow in a rectangular duct under the influence of a heterogeneous magnetic field. — 2007. — 0705.0633.

69. Kljugin A., Thess A. Direct measurement of the stream-function in a quasi-two-dimensional liquid metal flow // *Experiments in Fluids*. — 1998. — Vol. 25. — P. 298–304.
70. Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели / Ed. by НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». — М.-Ижевск, 2010. — P. 332.
71. Pavlinov A., Khalilov R., Mamikyn A., Kolesnichenko I. Eddy current flowmeter for sodium flow // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2017. — jun. — Vol. 208. — P. 012031.
72. Schulenberg Thomas, Stieglitz Robert. Flow measurement techniques in heavy liquid metals // *Nuclear Engineering and Design*. — 2010. — sep. — Vol. 240, no. 9. — P. 2077–2087.
73. Cowley M. D. Flowmetering by a motion-induced magnetic field // *Journal of Scientific Instruments*. — 1965. — Vol. 42, no. 6. — P. 406.
74. Miralles Sophie, Verhille Gautier, Plihon Nicolas, Pinton Jean-Francois. The magnetic-distortion probe: Velocimetry in conducting fluids // *Review of Scientific Instruments*. — 2011. — sep. — Vol. 82, no. 9. — P. 095112.
75. Thess A., Votyakov E. V., Kolesnikov Y. Lorentz force velocimetry // *Physical Review Letters*. — 2006. — apr. — Vol. 96, no. 16.
76. Priede J., Buchenau D., Gerbeth G. Force-free and contactless sensor for electromagnetic flowrate measurements // *Magnetohydrodynamics*. — 2009. — Vol. 45, no. 3. — P. 451–458.
77. Eckert S., Gerbeth G. Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound doppler velocimetry // *Experiments in Fluids*. — 2002. — Vol. 32. — P. 542–546.
78. Poelma C. Ultrasound imaging velocimetry: a review // *Exp Fluids*. — 2017. — Vol. 58, no. 3.
79. Hvasta M. G., Kolemen E., Fisher A. Application of ir imaging for free-surface velocity measurement in liquid-metal systems // *Rev. Sci. Instrum.* — 2017. — Vol. 88. — P. 013501.

80. *Takeda Y.* Development of an ultrasound velocity profile monitor // *Nuclear Engineering and Design*. — 1991. — April. — Vol. 126, no. 2. — P. 277–284.
81. *Newhouse V. L., Furgason E. S., Johnson G. F., Wolf D. A.* The dependence of ultrasound doppler bandwidth on beam geometry // *IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS*. — 1980. — March. — Vol. SU-27, no. 2. — P. 50 – 59.
82. *Nauber R., Burger M., Butner L., Franke S., Raiger D., Eckert S., Czarske S.* Novel ultrasound array measurement system for flow mapping of complex liquid metal flows // *Eur. Phys. J. Special Topics*. — 2013. — Vol. 220. — P. 43–52.
83. *Timmel Klaus, Eckert Sven, Gerbeth Gunter.* Experimental investigation of the flow in a continuous-casting mold under the influence of a transverse, direct current magnetic field // *Metallurgical and materials transactions B*. — 2011. — February. — Vol. 42B. — P. 68 – 80.
84. *Franke S., Lieske H., Fischer A., Büttner L., Czarske J., Rübiger D., Eckert S.* Two-dimensional ultrasound doppler velocimeter for flow mapping of unsteady liquid metal flows // *Ultrasonics*. — 2013. — Vol. 53. — P. 691–700.
85. *Krautkramer Josef, Krautkramer Herbert.* **Ultrasonic Testing of Materials**. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1990.
86. *Eckert S., Gerbeth G., Melnikov V.I.* Velocity measurements at high temperatures by ultrasound doppler velocimetry using an acoustic wave guide // *Experiments in Fluids*. — 2003. — Vol. 35. — P. 381– 388.
87. *Takeda Y., Kikura H.* Flow mapping of the mercury flow // *Experiments in Fluids*. — 2002. — Vol. 32. — P. 161– 169.
88. *Mordant N., Pinton J.-F.* Velocity measurement of a settling sphere // *Eur. Phys. J. B*. — 2000. — Vol. 18. — P. 343 – 352.
89. *Zhang C., Eckert S., Gerbeth G.* Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a dc magnetic field // *International Journal of Multiphase Flow*. — 2005. — Vol. 31. — P. 824–842.
90. *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, no. 1–2. — P. 231–236.
91. Egry I., Lohöfer G., Sauerland S. Measurements of thermophysical properties of liquid metals by noncontact techniques // *International Journal of Thermophysics*. — 1993. — May. — Vol. 14, no. 3. — P. 573–584.
 92. Юм-Розери В., Христиан Дж., Пирсон В. Диаграммы равновесия металлических систем. — Москва: Металлургиздат, 1956. — P. 399.
 93. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Электродинамика сплошных сред. — М.: Физматлит, 2001.
 94. Frick Peter, Noskov Vitaliy, Denisov Sergey, Stepanov Rodion. Direct measurement of effective magnetic diffusivity in turbulent flow of liquid sodium // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Oct. — Vol. 105. — P. 184502.
 95. Noskov Vitaliy, Denisov Sergey, Stepanov Rodion, Frick Peter. Turbulent viscosity and turbulent magnetic diffusivity in a decaying spin-down flow of liquid sodium // *Phys. Rev. E*. — 2012. — Jan. — Vol. 85. — P. 016303.
 96. Gibson C. H., Schwarz W. H. Detection of conductivity fluctuations in a turbulent flow field // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1963. — Vol. 16, no. 3. — P. 357–364.
 97. Reighard A. B., Brown M. R. Turbulent conductivity measurements in a spherical liquid sodium flow // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — Mar. — Vol. 86. — P. 2794–2797.
 98. Курко И. М., Самойлович Ю. А., Долгих В. М., Хрупченко С. Ю., Ясницкий Л. Н. Электровихревой способ перемешивания расплава затвердевающих слитков // *Магнитная гидродинамика*. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 100 – 107.
 99. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P. A., Rübiger D., Dong J., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part ii. application to solidification of al-si alloys // *Metall. Mater. Trans. B*. — 2008. — Vol. 39, no. 2. — P. 304–316.
 100. Ščepanskis M., Jakovičs A., Nacke B. Homogenization of non-conductive particles in em induced metal flow in a cylindrical vessel // *Magnetohydrodynamics*. — 2010. — Vol. 46, no. 4. — P. 413–423.

101. Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin L. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible // *Magnetohydrodynamics*. — 2014. — Vol. 4, no. 4. — P. 249–265.
102. Lielpeter Y. Liquid metal induction MHD machines. — Zinatne, Riga (in Russian), 1969. — P. 246.
103. Воронков А. В., Галанин М. П., Родин А. С. Математическое моделирование работы МГД-насоса // *Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша*. — 2010. — № 51. — С. 36.
104. Stiller J., Koal K., Nagel W. E., Pal J., Cramer A. Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields // *Eur. Phys. J. Special Topics*. — 2013. — Vol. 220. — P. 111–122.
105. Mapelli C., Gruttadauria A., Peroni M. Application of electromagnetic stirring for the homogenization of aluminium billet cast in a semi-continuous machine // *J. Mater. Process. Technol.* — 2010. — Vol. 210, no. 2. — P. 306–314.
106. Makarov S., Ludwig R., Apelian D. Inclusion removal in molten aluminum: Mechanical, electromagnetic, and acoustic techniques // *Trans. Am. Foundrymen's Soc.* — 1999. — Vol. 107. — P. 727 – 735.
107. Makarov S., Ludwig R., Apelian D. Electromagnetic separation techniques in metal casting. i. conventional methods // *IEEE Transactions on Magnetics*. — 2000. — jul. — Vol. 36, no. 4. — P. 2015–2021.
108. Xu Zhenming, Li Tianxiao, Zhou Yaohe. Continuous removal of nonmetallic inclusions from aluminum melts by means of stationary electromagnetic field and dc current // *Metallurgical and Materials Transactions A*. — 2007. — May. — Vol. 38, no. 5. — P. 1104–1110.
109. Kazak O V, Starodumov I O. Influence of joule heat and heat of electric arc on the vortex flow in DC arc furnace // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2020. — jan. — Vol. 709. — P. 044032.
110. Hu J., Guo H., Tsai H.L. Weld pool dynamics and the formation of ripples in 3d gas

- metal arc welding // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2008. — may. — Vol. 51, no. 9-10. — P. 2537–2552.
111. Курко И. М., Альмухаметов В. Ф., Хрипченко С. Ю. Физическое моделирование неустойчивого состояния границы раздела электролит-металл в мощных алюминиевых электролизерах // *Докл. АН СССР*. — 1988. — Vol. 302, no. 4. — P. 845 – 847.
112. Weber N., Galindo V., Priede J., Stefani F., Weier T. The influence of current collectors on Taylor instability and electro-vortex flows in liquid metal batteries // *Physics of Fluids*. — 2015. — Vol. 27, no. 1. — P. 014103.
113. Tado Shigeru, Ichi Kamiyama Shin. Analysis of transverse edge effect of linear induction pump with electrically conducting side walls // *Journal of Nuclear Science and Technology*. — 1983. — Т. 20, № 5. — С. 379–388. — <https://doi.org/10.1080/18811248.1983.9733407>.
114. Araseki Hideo, Kirillov Igor R., Preslitsky Gennady V., Ogorodnikov Anatoly P. Double-supply-frequency pressure pulsation in annular linear induction pump: Part i: Measurement and numerical analysis // *Nuclear Engineering and Design*. — 2000. — Vol. 195, no. 1. — P. 85–100. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549399001752>.
115. Araseki Hideo, Kirillov Igor R., Preslitsky Gennady V., Ogorodnikov Anatoly P. Magnetohydrodynamic instability in annular linear induction pump: Part i. experiment and numerical analysis // *Nuclear Engineering and Design*. — 2004. — Vol. 227, no. 1. — P. 29–50. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549303002231>.
116. Sharma Prashant, Sivakumar L.S., Prasad R. Rajendra, Saxena D.K., Kumar V.A. Suresh, Nashine B.K., Noushad I.B. et al. Design, development and testing of a large capacity annular linear induction pump // *Energy Procedia*. — 2011. — Vol. 7. — P. 622–629. — Asian Nuclear Prospects 2010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021101592X>.
117. Nashine B.K., Rao B.P.C. Design, in-sodium testing and performance evaluation

- of annular linear induction pump for a sodium cooled fast reactor // *Annals of Nuclear Energy*. — 2014. — Vol. 73. — P. 527–536. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454914003570>.
118. *Dolgikh V., Denisov S., Pavlinov A.* Experimental investigation of an MHD-pump model with inclined partitions // *Magnetohydrodynamics*. — 2017. — sep. — Vol. 53, no. 3. — P. 511–514.
119. *Dolgikh V.* Experimental study of the MHD pump assembled with liquid metal electrodes and magnetic system // *Magnetohydrodynamics*. — 2017. — sep. — Vol. 53, no. 3. — P. 515–520.
120. *Khripchenko S., Kolesnichenko I., Dolgikh V.* Pumping effect in a flat MHD channel with an electrovortex flow // *Magnetohydrodynamics*. — 2008. — Vol. 44, no. 3. — P. 303–314.
121. *Salas H., Cuevas S., Ramos E.* Electrically driven vortices in a dipolar magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. — 2001. — Vol. 37, no. 1-2. — P. 38 – 44.
122. *Kolesnichenko I., Khripchenko S., Buchenau D., Gerbeth G.* Electro-vortex flows in a square layer of liquid metal // *Magnetohydrodynamic*. — 2005. — Vol. 41, no. 1. — P. 39–51.
123. *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, no. 1. — P. 85–97.
124. *Kolesnichenko I., Khripchenko S.* Mathematical simulation of hydrodynamical processes in the centrifugal MHD pump // *Magnetohydrodynamics*. — 2002. — Vol. 38, no. 4. — P. 391–398.
125. *Dolgikh V., Denisov S., Khalilov R., Khripchenko S.* Study of a model of the spiral winding-free MHD pump // *Magnetohydrodynamics*. — 2013. — Vol. 49, no. 1. — P. 211–215.
126. *Dolgikh V., Denisov S., Pavlinov A.* Experimental investigation of an MHD-pump model with inclined partitions // *Magnetohydrodynamics*. — 2017. — Vol. 53, no. 3. — P. 511–514.

127. *Kolesnichenko I, Dolgikh V, Pavlinov A, Khalilov R.* Influence of length of partitions on the generation of transit flow in MHD-channel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — jul. — Vol. 581. — P. 012010.
128. *Dolgikh V., Pavlinov A.* Design optimization of the MHD pump with inclined partitions // *Magnetohydrodynamics*. — 2019. — apr. — Vol. 55, no. 1-2. — P. 39–46.
129. *Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Э.В., Щербинин Э.В.* Электровихревые течения. — Рига: Зинатне, 1985. — С. 315.
130. *Щербинин Э. В., Яковлева Е. Е.* Электровихревое течение в сфероидальном контейнере // *Магнитная гидродинамика*. — 1986. — Т. 22, № 4. — С. 64–69.
131. *Kazak O. V., Semko A. N.* Numerical modeling of electro-vortical flows in a confined volume // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2012. — sep. — Vol. 85, no. 5. — P. 1167–1178.
132. *Weber Norbert, Nimtz Michael, Personnetaz Paolo, Weier Tom, Sadoway Donald.* Numerical simulation of mass transfer enhancement in liquid metal batteries by means of electro-vortex flow // *Journal of Power Sources Advances*. — 2020. — Vol. 1. — P. 100004.
133. *Хрипченко С. Ю.* Генерация крупномасштабных вихревых структур в плоском слое мелкомасштабной спиральной турбулентностью // *Магнитная гидродинамика*. — 1991. — Т. 27, № 4. — С. 77–83.
134. *Pedchenko A., Molokov S., Priede J., Lukyanov A., Thomas P. J.* Experimental model of the interfacial instability in aluminium reduction cells // *EPL (Europhysics Letters)*. — 2009. — Vol. 88, no. 2. — P. 24001.
135. *Gómez R. C. Cruz, Sansón L. Zavala, Pinilla M. A.* Generation of isolated vortices in a rotating fluid by means of an electromagnetic method // *Experiments in Fluids*. — 2013. — Vol. 54, no. 8.
136. *Kelley Douglas H., Weier Tom.* Fluid mechanics of liquid metal batteries // *Applied Mechanics Reviews*. — 2018. — Vol. 70, no. 2. — P. 020801.
137. *Maik Horstmann Gerrit, Wylega Markus, Weier Tom.* Measurement of interfacial

- wave dynamics in orbitally shaken cylindrical containers using ultrasound pulse-echo techniques // *ArXiv e-prints*. — 2018. — P. 1807.11768.
138. Хрипченко С. Ю. Электровихревые течения в тонких слоях проводящей жидкости // *Магнитная гидродинамика*. — 1991. — Т. 27, № 1. — С. 126–129.
139. Альмухаметов В., Колесниченко В., Хрипченко С. Математическая модель плоских электровихревых течений в двуслойной проводящей жидкости // *Магнитная гидродинамика*. — 1988. — Т. 24, № 2. — С. 137–141.
140. Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Хрипченко С.Ю. Магнито-вихревое течение в плоском прямоугольном слое проводящей жидкости // *Гидродинамика: Межвуз. сб. науч. трудов. / Ed. by Пермский университет. Пермь*. — 14. — 2004. — P. 120–129.
141. Хрипченко С. Ю. Генерация крупномасштабных вихревых структур в плоском слое мелкомасштабной спиральной турбулентностью // *Магнитная гидродинамика*. — 1991. — Vol. 27, no. 4. — P. 77 – 83.
142. Sommeria J. Experimental study of the two-dimensional inverse energy cascade in a square box // *J. Fluid Mechanics*. — 1986. — Vol. 170. — P. 139 – 168.
143. Kolesnichenko I., Khripchenko S. Surface instability of the plane layer of conducting liquid // *Magnetohydrodynamics*. — 2003. — Vol. 39, no. 4. — P. 427–434.
144. Kolesnichenko I., Khripchenko S., Buchenau D., Gerbeth G. Flow in a square layer of conducting liquid // *Magnetohydrodynamics*. — 2005. — Vol. 41, no. 1. — P. 39 – 51.
145. Brito D., Nataf H-C., Cardin P., Aubert J., Masson J-P. Ultrasonic doppler velocimetry in liquid gallium // *Experiments in Fluids*. — 2001. — Vol. 31. — P. 653 – 663.
146. Achard Jean-Louis, Jarry Philippe, Taina Fabio. **Ultrasonic doppler velocimetry in liquid aluminum** // *The Minerals, Metals & Materials Series*. — Springer International Publishing, 2018. — P. 879–884.
147. *Signal Processing (Switzerland)*. Transducers selection guide. — URL: https://www.signal-processing.com/trans_select.php.

148. *Eckert Sven, Nikrityuk Petr A., Willers Bernd, Rübiger Dirk, Shevchenko Natalia, Neumann-Heyme Hieram, Travnikov Vadim et al.* Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys // *The European Physical Journal Special Topics*. — 2013. — Vol. 220, no. 1. — P. 123–137.
149. *Garrido M., Davoust L., Daudin R., Salvo L., Fautrelle Y.* Improvement of the properties of light metal matrix micro/nanocomposite materials: myth or reality? // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2018. — oct. — Vol. 424. — P. 012001.
150. *Cramer A., Pal J., Koal K., Tschisgale S., Stiller J., Gerbeth G.* The sensitivity of a travelling magnetic field driven flow to axial alignment // *Journal of Crystal Growth*. — 2011. — apr. — Vol. 321, no. 1. — P. 142–150.
151. *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.
152. *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.
153. *Hachani Lakhdar, Zaidat Kader, Fautrelle Yves.* Experimental study of the solidification of Sn–10wt.in benchmark experiment // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2015. — Vol. 85. — P. 438 – 454.
154. *Fdhila R.B., SandJ U., Eriksson E., Yang H.* A stirring history // *ABB Review*. — 2016. — Vol. 3, no. 45–48.
155. *Moffatt H. K.* Electromagnetic stirring // *Phys. Fluids A*. — 1991. — Vol. 3, no. 5. — P. 1336–1343.
156. *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.

157. 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.
158. Leenov Daniel, Kolin Alexander. Theory of electromagnetophoresis. i. magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles // *The Journal of Chemical Physics.* — 1954. — apr. — Vol. 22, no. 4. — P. 683–688.
159. Povh I. L., Kapusta A. B., Chekin B. V. Magnetohydrodynamics in metallurgy (In Russian). — 1974. — P. 210.
160. Park J.P., Tanaka Y., Sassa K., Asai Sh. Elimination of tramp elements in molten metal using electromagnetic force // *Magnetohydrodynamics.* — 1996. — Vol. 32, no. 2. — P. 227 – 234.
161. Takeuchi Junichi, ichi Satake Shin, Morley Neil B., Kunugi Tomoaki, Yokomine Takehiko, Abdou Mohamed A. Experimental study of MHD effects on turbulent flow of flibe simulant fluid in circular pipe // *Fusion Engineering and Design.* — 2008. — dec. — Vol. 83, no. 7-9. — P. 1082–1086.
162. Afshar M. Reza, Aboutalebi M. Reza, Guthrie R.I.L., Isac M. Modeling of electromagnetic separation of inclusions from molten metals // *International Journal of Mechanical Sciences.* — 2010. — Vol. 52, no. 9. — P. 1107–1114.
163. Andreev O., Haberstroh C., Thess A. Mhd flow in electrolytes at high hartmann numbers // *Magnetohydrodynamics.* — 2001. — Vol. 37. — P. 151–160.