

## ОТЗЫВ

официального оппонента **Марфина Евгения Александровича** на диссертационную работу **Никифорова Сергея Александровича** «Трехмерная нестационарная многофазная модель течений в ванне расплава при лазерном нагреве в ультразвуковом поле», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа С.А. Никифорова посвящена решению важной научно-практической задачи – созданию и верификации комплексной вычислительной модели для анализа сложных гидродинамических явлений в расплавленной ванне металла, возникающих при совместном воздействии концентрированного лазерного излучения и ультразвуковых колебаний. Исследование направлено на углубление понимания физики многофазных течений в условиях интенсивного тепломассопереноса и имеет высокую значимость для совершенствования лазерных и аддитивных технологий.

### **Актуальность темы диссертации**

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, поскольку комбинированные лазерно-ультразвуковые методы обработки материалов являются перспективным направлением для повышения качества и эффективности таких процессов, как сварка, наплавка и послойный синтез. Работа выполнена в рамках актуальных государственных заданий и хоздоговоров, что подчеркивает ее практическую ориентированность и востребованность.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна заключается в следующем комплексе полученных результатов:

1. Разработана усовершенствованная нестационарная многофазная математическая модель, интегрирующая в себе объемные источники тепла супергауссова типа, силы знакопеременного ультразвукового воздействия и термокапиллярные эффекты.

2. Предложен оригинальный подход к описанию температурно-зависимых свойств материала (вязкости, теплоемкости) в области фазового перехода с использованием сигмоидальных функций, стабилизирующих численный расчет.

3. Создан и верифицирован специализированный программный модуль (UDF для Ansys Fluent), расширяющий функционал коммерческого пакета для моделирования сложных многофазных процессов с внешним акустическим воздействием.

4. Систематически исследовано и количественно оценено влияние частоты ультразвукового поля (20-60 кГц) на кинематику течения, дисперсию скоростей и окончательную геометрию зоны термического влияния.

### **Практическая значимость работы**

Научная и практическая значимость работы состоит в развитии методического аппарата для математического моделирования и оптимизации гибридных лазерно-ультразвуковых технологий. Разработанные модели и программные решения внедрены в учебный процесс КНИТУ-КАИ и используются в научно-исследовательской деятельности РФЯЦ-ВНИИЭФ, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

### **Анализ содержания диссертации**

Объем диссертационной работы составляет 118 страниц, содержит 46 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 101 наименование. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

*Во введении* диссертационной работы обоснована актуальность темы, обусловленная потребностью в фундаментальном изучении и практическом применении комбинированного лазерно-ультразвукового воздействия для управления процессами тепломассопереноса в металлах.

*В первой главе* проведен аналитический обзор современных достижений в области математического моделирования процессов лазерной обработки материалов и воздействия на них ультразвуковых колебаний. Проанализированы и систематизированы различные модели источников тепла (модель Голдака, гауссово и коническое распределения), физические явления, определяющие гидродинамику ванны расплава (плаваемость, конвекция, термокапиллярный эффект Марангони), и методы подвода ультразвука.

*Во второй главе* разработана двухфазная физико-математическая модель плавления нержавеющей стали 08X16H11M3. Представлена ключевая научная и методическая разработка автора – оригинальные функции для аппроксимации температурной зависимости удельной теплоемкости и динамической вязкости в интервале фазового перехода, учитывающие скрытую теплоту плавления через сигмоидальный переход. Это позволило существенно стабилизировать численный расчет.

*В третьей главе* исследовано влияние ультразвуковых колебаний, передаваемых через подложку (через твердую фазу), на уже сформированные в расплаве течения, вызванные эффектом Марангони. Для решения связанной задачи деформации твердого тела и гидродинамики жидкости применен комплексный подход с использованием двух расчетных доменов и модуля ANSYS System Coupling для их взаимодействия. Проведен детальный

сравнительный анализ максимальных скоростей течения на центральной оси с УЗ-воздействием и без него в различные моменты времени, выявивший значительное (до 120%) увеличение скорости в отдельные фазы колебаний.

**В четвертой главе** представлена комплексная трехмерная многофазовая модель, полностью реализованная автором в Ansys Fluent с помощью пользовательских функций (UDF) на языке C. Модель включает объемные источники тепла супергауссова типа, конвективные и радиационные потери, силы Марангони, а также главное нововведение – объемную силу, обусловленную знакопеременным ультразвуковым давлением, описываемым аналитической функцией.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты работы, составляющие положения, выносимые на защиту, а также намечены перспективные направления дальнейших исследований, в первую очередь связанные с применением разработанного подхода для моделирования процессов прямой лазерной наплавки в аддитивных технологиях.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- Корректной формулировкой математической постановки задачи на основе фундаментальных законов механики сплошной среды и тепломассопереноса.
- Применением современных и апробированных методов вычислительной гидродинамики (МКО, МКЭ) в программных комплексах Ansys Fluent/CFX/Mechanical.
- Всесторонней верификацией и валидацией численных моделей путем сравнения с результатами натурных экспериментов, показавшими хорошее количественное согласование.

### **Публикации результатов работы**

По теме диссертационного исследования опубликованы 15 работ, в том числе 5 статей в российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК (из них 4 статьи в журналах категории K2, 1 статья в журнале, индексируемом в Web of Science и категории K1), 10 статей – в других журналах и материалах научных конференций. Получены 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

**Автореферат** адекватно и полно отражает основное содержание диссертационной работы. Структура и объем автореферата соответствуют предъявляемым требованиям.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» (пункты П15, П16, П25).

**Вместе с тем, у оппонента возникли следующие вопросы к соискателю:**

1) В главах 4.1 и 4.3 представлены постановки задач, близкие по физическому содержанию, однако используются различные значения мощности лазера и шагов по времени. Представляется целесообразным пояснить причины выбора разных параметров, чтобы у читателя не возникало вопросов при сопоставлении результатов.

2) В работе отсутствуют подробные данные о методике проведения натурных экспериментов (параметры оборудования, условия измерений, статистика), что затрудняет оценку воспроизводимости результатов.

3) Анализ влияния ультразвука проведён только в диапазоне 20–60 кГц без обоснования выбора этих границ и изучения экстремальных режимов.

4) В таблице 2.4 показано, что величина расхождения между расчетными и экспериментальными данными по глубине ванны расплава при изменении мощности остаётся на одном уровне (около 9,5%). В тексте же указывается тенденция роста погрешности. Возможно, следовало бы уточнить, что речь идёт о других показателях или о тенденции в более широком диапазоне условий.

5) Отсутствует экономическое обоснование. Не приведены расчёты целесообразности внедрения ультразвукового воздействия с точки зрения энергозатрат, себестоимости и производительности технологического процесса.

6) Верификация модели выполнена только для точечного нагрева, тогда как для лазерной наплавки (глава 4) представлены лишь качественные сравнения без количественных оценок погрешности.

7) Выводы не содержат конкретных технологических инструкций (например, оптимальные сочетания мощности лазера, частоты УЗ и скорости обработки) для внедрения результатов в производство.

8) В работе имеют место стилистические неточности и опечатки.

Указанные замечания носят уточняющий характер и не снижают общей высокой оценки представленной работы.

### **Заключение:**

Диссертационная работа Никифорова Сергея Александровича «Трёхмерная нестационарная многофазная модель течений в ванне расплава при лазерном нагреве в ультразвуковом поле» - законченная научно-исследовательская работа, которая несмотря на имеющиеся в ней недостатки, выполнена на высоком научном уровне. В диссертационной работе достигнута

поставленная цель, а все сформулированные задачи решены. Полученные при этом результаты достоверны и представляют научную и практическую ценность.

Диссертационная работа соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор Никифоров Сергей Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Марфин Евгений Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

« 04 » сентябрь 2025 г.  Марфин Евгений Александрович

Марфин Евгений Александрович, кандидат технических наук (05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика), доцент (1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы), ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизики и волновых технологий» Института энергетики и перспективных технологий федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН, <http://www.knc.ru/>)

Адрес: 420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Тел.: +7 (905) 318-50-42, e-mail: marfin\_ea@mail.ru

« 04 » сентябрь 2025 г.  Марфин Евгений Александрович

Вход. № 05 - 8534  
« 17 » 09 2025 г.  
подпись 

