

ОТЗЫВ

официального оппонента **Кривилева Михаила Дмитриевича** 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 Никифорова С.А. посвящена актуальной проблеме разработки и верификации комплексной математической модели для исследования гидродинамических процессов в ванне расплава, формируемой лазерным излучением, при дополнительном воздействии ультразвуковых колебаний. Исследование имеет важное фундаментальное и прикладное значение для развития современных лазерных и аддитивных технологий, позволяя целенаправленно влиять на структуру и свойства обрабатываемых материалов.

Актуальность темы подтверждается выполнением работы в рамках государственных заданий и грантов, а также ее востребованностью в организациях реального сектора экономики, включая предприятия атомной отрасли.

Научная новизна полученных результатов обусловлена следующим комплексом научных положений, впервые сформулированных и решенных в работе:

- разработана нелинейная многофазовая математическая модель гидродинамики вязкой жидкости в мезообъеме, отличающаяся учетом объемного источника знакопеременного внешнего ультразвукового воздействия и супергауссова распределения источника лазерного излучения;
- предложены оригинальные функции удельной теплоемкости и вязкости, зависящие от температуры и аппроксимирующие фазовый переход с учетом скрытой теплоты плавления для стабилизации численного решения;
- разработан и внедрен в коммерческий ПО (Ansys Fluent) программный код на языке C, реализующий предложенную модель и учитывающий комплексное воздействие лазерного излучения, ультразвука и теплообмена;
- экспериментально и численно установлена зависимость параметров течения и геометрии ванны расплава от частоты ультразвукового воздействия в диапазоне 20–60 кГц, показавшая возможность управления однородностью поля скоростей.

Новизна и актуальность проведенных исследований подтверждаются наличием 15 публикаций по теме диссертации, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, одна из которых индексируется в Web of Science, а также 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечена корректной постановкой задач на основе нелинейной теории сплошных сред, использованием апробированных методов математического моделирования (МКЭ, МКО), применением современных программных комплексов (ANSYS), а также проведением комплексной экспериментальной валидации численных моделей. Достоверность подтверждается удовлетворительным количественным согласованием результатов расчета с данными натурного эксперимента для режимов как с ультразвуковым воздействием, так и без него.

Научная и практическая значимость работы заключается в создании научно обоснованной методики прогнозирования геометрических размеров ванны расплава и степени гомогенизации ее структуры при комбинированном лазерно-ультразвуковом воздействии. Разработанные модели и программные реализации внедрены в учебный процесс КНИТУ-КАИ и используются при реализации комплексных НИОКР РФЯЦ-ВНИИЭФ, что подтверждено соответствующими актами.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, приведены основные научные положения и результаты.

В первой главе произведен анализ предметной области, поставлена задача моделирования течений в ванне расплава в вязких средах под воздействием ультразвуковых колебаний. Приведены основные способы воздействия ультразвуковых колебаний на ванну расплава в процессе лазерной обработки изделия и их влияние на конечную структуру и геометрию зоны термического воздействия. Показаны основные методы описания многофазных сред для отслеживания деформации свободной поверхности в процессе лазерного воздействия на жидкую среду.

Во второй главе представлена двухфазная физико-математическая модель плавления нержавеющей стали 08X16N11M3, предложены приближенные функции для учета эффективной удельной теплоемкости и вязкости при переходе твердого тела в жидкость.

Третья глава содержит исследование влияния колебаний на течения расплавленного металла в кювете, порожденные эффектом Марангони от лазерного излучения, заданного гауссовым распределением. Проведен анализ максимальной скорости течения на центральной оси жидкого домена, полученной с ультразвуковым воздействием и без него.

Четвертая глава посвящена математическому описанию процессов лазерной обработки в ультразвуковом поле, генерируемом соноотродом. Созданы двумерная и трехмерная гидродинамические модели с учетом стороннего воздействия. Исследована структура течения в расплавленном металле под воздействием и без воздействия ультразвука различных частот. Определены усредненные характеристики, влияющие на структуру течения при воздействии ультразвукового поля на расплавленную ванну. Проведена верификация моделей на основе экспериментальных данных.

После ознакомления с текстом диссертации важно отметить следующие **сильные стороны** выполненной соискателем работы:

1. На этапе постановки задачи диссертант и научный руководитель определили высокую цель решения сопряженной гидродинамической и термоупругой задачи с наличием гармонических колебаний среды. Рассмотрение такой задачи, безусловно, повышает научную значимость полученных научных результатов.
2. Работа написана лаконичным и емким научным языком, соискатель свободно владеет понятийным аппаратом вычислительной механики и численных методов.
3. При формулировке математической модели выбраны правильные физические допущения, что позволило редуцировать вычислительную сложность задачи.
4. Результаты вычислительного эксперимента сведены к простой и понятной схеме взаимного влияния термокапиллярного эффекта, режимов УЗ воздействия и режимов лазерной обработки.

По данной диссертационной работе имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. Формулировка (2.1) баланса внутренней энергии содержит неточности.
2. При определении краевых задач в различных разделах диссертации не указывается направление вектора нормали. Неправильно указана размерность постоянной Больцмана в таблице 2.2.
3. При использовании так называемого супергауссова распределения плотности мощности лазерного излучения в уравнении (2.4) требуется ввести дополнительное уравнение связи на коэффициенты a и b , иначе лазерный источник ненормирован.
4. На рисунке 2.4(а) принято снижение плотности стали 08X16H11M3 на 50% при переходе в жидкое состояние, что расходится с общепринятыми данными.
5. В разделе 4.1.1 верхний диапазон УЗ воздействия сильно завышен.
6. В рамках диссертационного исследования Р.П. Давлятшина (ПНИПУ, 2025) было показано, что при вибрационных воздействиях наблюдается увеличение высоты валика и уменьшение его ширины как в экспериментальных, так и в численных результатах. При отсутствии вибраций форма капли полностью округлая, при наличии вибраций капли имеют угловатую форму. В настоящей работе получен противоположный результат, когда капля уплощается и становится шире.

Несмотря на высказанные вопросы, следует отметить, что диссертационная работа Никифорова С.А. является завершенным самостоятельным научным исследованием, а ее результаты обладают значительной научной новизной и практической ценностью. Выявленные недочеты носят частный характер и не влияют на общую высокую оценку работы.

Таким образом, считаю, что диссертация Никифорова Сергея Александровича соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» (утв. постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Кривилев Михаил Дмитриевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«10» 09 2025 г.

Кривилев Михаил Дмитриевич

Кривилев Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент, заведующий лабораторией физики конденсированных сред, профессор кафедры «Общая физика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Удмуртский государственный университет»

Адрес: 426034, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Университетская, 1

Тел: +7(341) 291-62-30, e-mail: mk@udsu.ru

«10» 09 2025 г.

Кривилев Михаил Дмитриевич

Подпись
заверяю

учёный секретарь
учёного совета ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»



Вход. № 05-8536
«17» 09 2025 г.
подпись