

На правах рукописи



**НИКИФОРОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ТРЕХМЕРНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ МНОГОФАЗНАЯ МОДЕЛЬ  
ТЕЧЕНИЙ В ВАННЕ РАСПЛАВА ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ  
В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» на кафедре «Лазерные и аддитивные технологии»

**Научный руководитель:** **Гильмутдинов Альберт Харисович** доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерные и аддитивные технологии» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань

**Официальные оппоненты:** **Кривилев Михаил Дмитриевич** доктор физико-математических наук, доцент, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред» ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск

**Марфин Евгений Александрович** кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизики и волновых технологий» Института энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита диссертации состоится «03» октября 2025 года в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.11, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, Зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте: [https://www.kstu.ru/event.jsp?id=167393&id\\_cat=141](https://www.kstu.ru/event.jsp?id=167393&id_cat=141)

Отзывы на автореферат и диссертацию в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, ФГБОУ ВО «КНИТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.312.11. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень с указанием специальности, ученое звание, наименование организации и должность лица, представившего отзыв, с указанием структурного подразделения, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии) (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

Мустафин Тимур Наилевич

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Лазерные технологии – на сегодняшний день один из самых эффективных способов обработки металлов и сплавов. Лазерные резка, сварка, наплавка, гравировка и упрочнение – широко используются во многих отраслях экономики. Экспериментальные исследования последних лет показывают, что эффективность этих процессов может быть существенно повышена за счет дополнительного акустического воздействия на ванну расплава на определенных частотах и амплитудах в процессе обработки материалов. Процессы, сопровождающие перечисленные лазерные технологии, характеризуются чрезвычайной сложностью: высокие градиенты температуры, малые масштабы рассматриваемых областей воздействия лазера, нелинейность физических явлений, обязательный учет многофазности сред. Поэтому распространенным методом их оптимизации является численное моделирование. Современные пакеты прикладных программ для теплового, механического и гидродинамического анализов хорошо показывают себя в типовых проблемах, но не всегда имеют готовый функционал для решения задач, которые подразумевают внедрение новых технологических процессов. В случае исследования и внедрения лазерно-акустических технологий указывается отсутствие значительных результатов.

При этом для многих перечисленных процессов уже существуют устоявшиеся подходы и методы математического моделирования, например, выбор модели источника нагрева для конкретного технологического процесса или отсутствие учета давления насыщенных паров в ванне расплава при моделировании низкотемпературной сварки. Но прямые эксперименты показывают, что на структуру и форму участков обработки лазером в значительной степени влияет гидродинамика ванны расплава.

При модернизации существующих технологических операций необходимо вновь проводить оценки влияния различных физических процессов, которые влияют на итоговый результат, создавать новые или дополнять существующие математические модели и проводить верификацию и валидацию для дальнейшего внедрения в производство.

Знакопеременное воздействие на высоких частотах в теории позволяет интенсифицировать течения в застойных областях ванны расплава, уменьшить влияние термокапиллярных течений, которые влияют на свободную поверхность жидкого металла и увеличить количество центров кристаллизации. Однако существующие подходы не позволяют в полной мере описать данную задачу. Следовательно, тема диссертации, связанная с исследованием и моделированием течений в ванне расплава жидкого металла в ультразвуковом поле, является актуальной.

Также актуальность выбранной темы исследования подтверждается ее выполнением в рамках Государственных заданий №9.3236.2017/4.6, №075-03-2020-051 (fzsu-2020-0020), хоздоговора №96-2022/165 с РФЯЦ-ВНИИЭФ “Создание программных

подмодулей «Газодинамика: макроуровень», «Частицы: тепломассоперенос макроуровень», «Частицы: тепломассоперенос мезоуровень», «Валик и ванна расплава: тепломассоперенос мезоуровень», «Валик и ванна расплава: тепломассоперенос и прочность макроуровень» в составе программного модуля «Лазерная газопорошковая наплавка» и их интеграция в комплекс программного обеспечения «Виртуальный 3D-принтер», гранта Российского научного фонда (проект №23-29-00219).

**Степень разработанности темы.** Исследованиям в области воздействия лазерного излучения на материал и последующего численного моделирования течений в ванне расплава посвящены работы большой группы ученых из разных стран: Г.А. Туричин, В.П. Вейко, М.Д. Кривилев, А.И. Рудской, Д.Н. Трушников, А.А. Попович, И.В. Шишковский, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов, А.М. Гурин, А.А. Карабутов, Р.М. Шагалиев, М.А. Schmidt, T. Heeling, L. Yang, X. He, C. Lampa, S. Shanmugam, A. Yaghi и др. Однако вопросы степени воздействия ультразвуковых колебаний на ванну расплава и ее конечную форму остаются открытыми.

**Научная задача,** решаемая в диссертации, заключается в разработке численной модели гидродинамики ванны расплава, сформированной лазерным излучением, а также в результате совместного действия лазерного излучения и ультразвуковых колебаний, и валидации полученных результатов с экспериментальными данными. Решение данной задачи имеет научную и практическую ценность для качественного улучшения характеристик сварных соединений и наплавленных слоев, 3D напечатанных изделий методами металлопорошковых лазерных технологий.

**Объект исследования:** жидкий металл в ванне расплава, сформированный лазерным воздействием.

**Предмет исследования:** структура течений жидкого металла в ванне расплава в ультразвуковом поле.

**Цель диссертационной работы:** увеличение однородности поля скоростей в ванне расплава за счет исследования степени влияния ультразвуковых колебаний на течения в процессе лазерной обработки нержавеющей стали.

**Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:**

1) разработать многофазную нелинейную трехмерную нестационарную математическую модель лазерной сварки и лазерной наплавки с учетом конвективных и радиационных тепловых потерь, а также возникновения термокапиллярных течений;

2) программно реализовать численные модели двумерной и трехмерной многофазных задач лазерной сварки и наплавки с учетом внешних ультразвуковых колебаний в гидродинамических уравнениях;

3) установить влияние разных частот ультразвукового воздействия на структуру течений в ванне расплава в процессе лазерной обработки стали;

4) произвести валидацию решений разработанных вычислительных алгоритмов с экспериментальными данными.

### **Научная новизна.**

1. Разработана нелинейная многофазная математическая модель гидродинамики вязкой жидкости в мезообъеме, *отличающаяся* учетом объемного источника сил знакопеременного внешнего воздействия и уравнением теплового источника излучения с супергауссовым распределением с коэффициентами на основе экспериментальных данных.

2. Разработаны функции удельной теплоемкости и вязкости, зависящие от температуры, *отличающиеся* аппроксимацией в виде сигмоидального перехода с учетом скрытой теплоты плавления для стабилизации решения при моделировании многофазных течений и ультразвуковых колебаний.

3. Разработан программный код на языке C в виде пользовательской функции для внедрения в конечно-объемный решатель Ansys Fluent или его аналог, позволяющий учесть внешнее переменное воздействие, объемные источники лазерного излучения и теплоотдачи (конвекция и радиация) при моделировании многофазных сред.

4. Представлена зависимость параметров течения, свободной поверхности и формы ванны расплава в процессе лазерного плавления от частоты ультразвукового воздействия в интервале 20 кГц – 60 кГц.

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования заключается в исследовании зависимости дисперсии средней скорости в вязких средах от частоты колебаний в ультразвуковом диапазоне и влияния знакопеременного давления в ванне расплава на конечную форму зоны термического воздействия.

В работе указывается теоретическая возможность управления скоростью потоков в вязкой среде за счет изменения градиента плотности гауссова распределения источника излучения и частоты ультразвукового поля.

**Практическая значимость** диссертации заключается в создании методики прогнозирования геометрических размеров (глубина, ширина и степень деформации свободной поверхности) ванны расплава и степени гомогенизации структуры материала после технологических процессов на основе лазерного воздействия. Введение ультразвуковых колебаний оптимальной частоты и интенсивности в процессе лазерной термической обработки (лазерная резка, лазерная наплавка) позволяет получить новые, улучшенные характеристики готового изделия, вследствие гомогенизации структуры расплава.

**Методы исследования.** Для решения задач использованы методы математического моделирования, статистического анализа, функционального программирования, экспериментальная валидация. Обработка результатов расчетов проводилась с помощью оригинальных программ, написанных на языке Python и MATLAB. Постановка задач выполнена с помощью нелинейной теории сплошных сред.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1) нестационарная нелинейная математическая модель лазерной сварки и наплавки сталей с учетом ультразвукового воздействия с варьируемой частотой колебаний;

2) программный код, реализующий предложенные методы и алгоритмы, определяющий межфазный интерфейс с наложением объемных источников тепла, знакопеременного ультразвукового воздействия и минимизирующий паразитные течения, которые формируются вследствие численных ошибок;

3) на основе исследования нестационарной математической модели многофазной гидродинамики в ультразвуковом поле описаны зависимости средних значений скоростей и геометрических размеров ванны расплава от частоты модуляции ультразвука.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается обоснованным выбором физических приближений, математически строгим выполнением расчетов, использованием апробированных методов и подходов для описания динамики сплошных сред, а также согласием с экспериментальными данными и данными предыдущих теоретических работ.

**Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:**

– Международная молодежная научная конференция «XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2023);

– Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2023);

– Всероссийской научно-практической конференции «Яковлевские чтения» (Санкт-Петербург, 2024);

– XI Международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров» (Санкт-Петербург, 2024);

– V Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (Казань, 2020; Казань, 2024).

Результаты работы регулярно представлялись и обсуждались на семинарах кафедры «Лазерные и аддитивные технологии» под научным руководством доктора физико-математических наук, академика АН РТ, профессора А.Х. Гильмутдинова и кафедры «Цифровые лазерные технологии» под председательством заведующего кафедрой, доктора технических наук Г.А. Туричина.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследования:

- внедрены в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Лазерные акустические технологии», «Математические методы и моделирование в лазерной технике и технологии»;

- внедрены в ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» и используются в научных исследованиях и разработках института теоретической и математической физики.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** В диссертации разработана нестационарная нелинейная математическая модель многофазного теплопереноса с учетом сил знакопеременного ультразвукового воздействия. Разработан программный код, реализующий предложенные методы и алгоритмы, определяющий межфазный интерфейс с наложением объемных источников тепла, знакопеременного ультразвукового воздействия и устраняющий паразитные течения, которые формируются вследствие численных ошибок.

Таким образом, результаты диссертационного исследования соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы:

П15. *Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах:* исследовалось влияние знакопеременного давления в ультразвуковом диапазоне на структуру течений в вязкой среде.

П16. *Теплоперенос в газах и жидкостях:* для формирований конвекционных течений вследствие сил Марангони в дополнение к уравнениям сохранения импульса и сохранения массы решалось уравнение сохранения энергии через энтальпию, что позволяло учесть влияние лазерного излучения на структуру течений в ванне расплава.

П25. *Влияние поверхностных сил на динамику жидкости и газа. Смачивание и растекание:* многофазная модель типа воздух-газ реализована в данной работе. Учитываются течения на свободной поверхности при градиенте температур вследствие лазерного воздействия на границу раздела фаз.

**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 К2, 1 статья в журнале, индексируемом в Web of Science и категории К1), 10 статей – в других журналах и материалах научных конференций. Получены 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из оглавления, списка сокращений и условных обозначений, введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 118 страниц, 46 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 101 наименование.

**Сведения о личном вкладе автора** Постановка задач и интерпретация результатов исследования осуществлялась под научным руководством доктора физико-математических наук, профессора, действительного члена АН РТ Гильмутдинова Альберта Харисовича. Личный вклад автора заключается в разработке представленных в диссертационной работе математических моделей гидродинамики и термоупругости, проведении аналитических и численных расчетов, в проведении экспериментальных работ для дальнейшего сравнительного анализа и разработки программ для обработки результатов.

Результаты исследований неоднократно докладывались лично автором на всероссийских и международных конференциях. Все представленные в диссертации результаты получены при непосредственном участии автора.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **главе 1** произведен анализ предметной области, поставлена задача моделирования течений в ванне расплава в вязких средах под воздействием ультразвуковых колебаний. Для ее решения проанализированы основные модели источников энергии при технологической обработке материалов: модель Голдака, модель гауссова распределения и трехмерное коническое распределение. Описаны основные физические процессы, с помощью которых возможно наиболее достоверно описать гидродинамику вязкой жидкости в мезообъеме. Указывается, что при описании течений в ванне расплава необходимо учитывать не только классические явления плавучести и конвекции, но и силы Марангони, которые оказывают решающее влияние за счет большого градиента температур на свободной поверхности жидкого металла. 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.

По итогам проведенного анализа работ российских и зарубежных авторов сделаны следующие выводы, допущения и предположения, на основе которых в следующих главах созданы математические модели, проведены численные расчеты, их верификация и экспериментальная валидация:

1. Численный анализ гидродинамики жидкого металла в ванне расплава при оценке характеристик итоговой формы зоны термического воздействия и наплавленного материала имеет решающую роль.

2. Для описания лазерного воздействия на материалы наиболее подходящим является модель распределения тепла по закону Гаусса, основанная на распределении плотности энергии по нормальному закону.

3. Показано, что для реального предсказательного анализа необходим подбор уточняющих коэффициентов для любых тепловых моделей, включая модель Гаусса.

4. Описаны основные процессы, происходящие в ванне расплава, которая формируется лазерным воздействием.

5. Выделяется роль конвекции Марангони при описании процессов тепломассопереноса и описаны способы воздействия на направление потока, за счет изменения градиента температуры либо процента содержания серы в веществе.

6. Описан механизм воздействия ультразвуковых колебаний на ванну расплава и способы их формирования.

7. Изучается наиболее распространенный способ подвода ультразвуковых колебаний, а именно воздействие на ванну расплава через непосредственное приложение сонотрода к подложке.

8. Рассмотрены основные существующие методы многофазного моделирования, из которых сделаны следующие выводы:

– модель Эйлера требует больше времени моделирования, чем модель VOF, использующая ту же сетку. Тем не менее, модель Эйлера тратит меньше времени, если используется сетка с небольшим количеством ячеек сетки, из-за независимости сетки. Более того, в пузырьковом потоке модель Эйлера точнее модели VOF на 5%;

– модель VOF представляет собой метод отслеживания поверхности и находит свое применение, когда интерфейса между фазами представляет интерес. Ее применение включает стратифицированный поток, свободный поверхностный поток, заполнение и т. д.

9. Число Рейнольдса (Re) потока жидкости в процессе лазерной наплавки намного меньше  $5 \cdot 10^4$ , поэтому предполагается, что жидкий металл в ванне расплава представляет собой несжимаемую ньютоновскую жидкость с ламинарным течением.

В главе 2 на основе известных представлений о моделировании термокапиллярной конвекции представлена двухфазная физико-математическая модель плавления нержавеющей стали 08X16H11M3, предложены приближенные функции для учета эффективной удельной теплоемкости и вязкости при переходе твердого тела в жидкость, подробно рассмотрено влияние лазерного излучения на материал, а также представлена тепловая модель и исследован вклад конвекции Марангони в формирование ванны расплава.

В качестве основного материала расчетной области была выбрана нержавеющая сталь 08X16H11M3. Для учета фазового перехода от твердого металла к жидкому в диапазонах температур солидус и ликвидус уравнения удельной теплоемкости и динамической вязкости модифицируются в соответствии со следующими уравнениями:

$$\mu(T) = \mu_{\text{л}} + (\mu_{\text{с}} - \mu_{\text{л}}) / \left( 1 + e^{\frac{T - T_{\text{пл}}}{a}} \right); \quad (1)$$

$$C_p(T) = C_{p_{\text{л}}} + (C_{p_{\text{с}}} - C_{p_{\text{л}}}) / \left( 1 + e^{\frac{T - T_{\text{пл}}}{a}} \right) + \frac{H_{\text{пл}}}{T_{\text{пл}} - T} \cdot e^{-\frac{(T - T_{\text{пл}})^2}{a^2}}, \quad (2)$$

где  $\mu_{\text{л}}$  – динамическая вязкость жидкого металла;  $\mu_{\text{с}}$  – динамическая вязкость твердого металла;  $C_{p_{\text{л}}}$  – удельная теплоемкость жидкого металла;  $C_{p_{\text{с}}}$  – удельная теплоемкость твердого металла;  $H_{\text{пл}}$  – скрытая теплота плавления;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления, равная среднему значению между температурой солидуса и ликвидуса;  $a$  – температурный коэффициент плавности сигмоидального перехода.

После проведения физического эксперимента была проведена серия численных расчетов с варьированием коэффициентов  $a$  и  $b$  и фиксацией физических свойств материала и параметров лазерного излучения. На рис. 1 сопоставляются физические и численные эксперименты с оптимальными параметрами коэффициентов  $a$  и  $b$ , равными 2.8 и 1.6 соответственно.

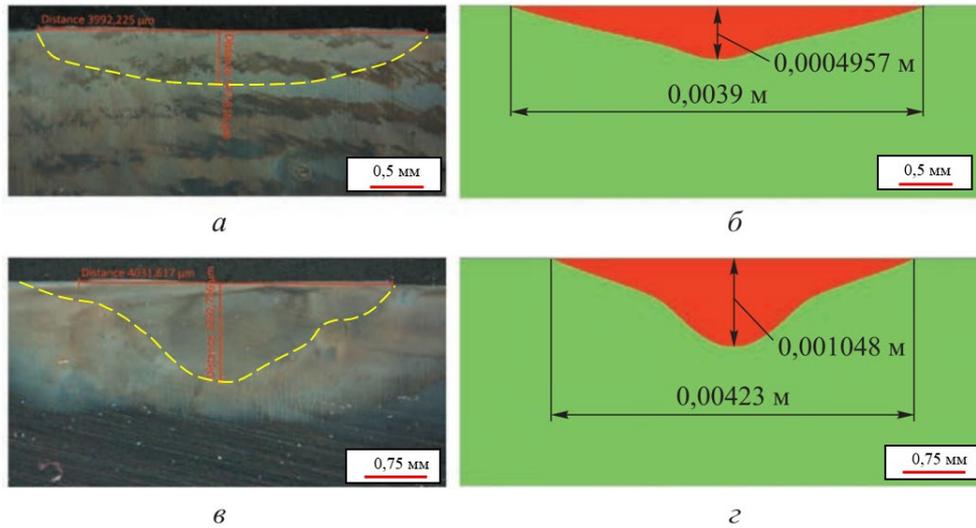


Рисунок 1 – Результаты физических и численных экспериментов с замерами глубины и ширины ванны расплава:  $a$  – физический эксперимент с мощностью лазера 1.5 кВт;  $b$  – численный эксперимент с мощностью лазера 1,5 кВт;  $v$  – физический эксперимент с мощностью лазера 2 кВт;  $z$  – численный эксперимент с мощностью лазера 2 кВт

Количественно сравнение характеристик ванны расплава в виде размеров и относительной погрешности показано в табл. 1. Очевидно, что при увеличении мощности лазера увеличивается относительная погрешность при измерении глубины и ширины ванны расплава. Это связано с тем, что при высокой мощности воздействия лазерного излучения должны учитываться граничные условия парообразования, давления насыщенных паров и оптический пробой как механическое воздействие на свободную поверхность ванны расплава. Тем не менее, даже без учета дополнительных граничных условий относительная погрешность при высоких мощностях не достигает 10%.

Таблица 1 – Результаты физических и численных экспериментов и их сопоставление

Наименование данных	Эксперимент, м		Относительная погрешность, %
	физический	численный	
Эксперимент 1. Мощность лазера 1500 Вт			
Ширина	0,003992	0,003981	0,276
Глубина	0,000548	0,000496	9,489
Эксперимент 2. Мощность лазера 2000 Вт			
Ширина	0,004032	0,004230	4,911
Глубина	0,001268	0,001148	9,464

Также проведен численный расчет с движущимся источником лазерного излучения. Результаты динамики изменения формы ванны расплава и структуры течений показаны на рис. 2.

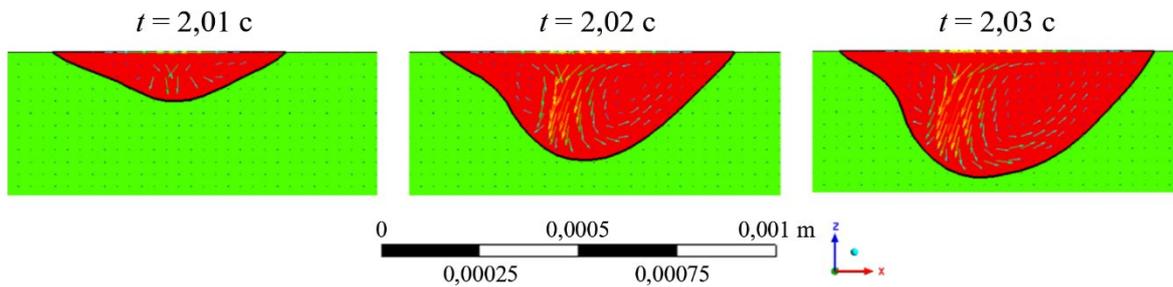


Рисунок 2 – Динамика формирования ванны расплава в разные моменты времени при движении источника энергии вдоль оси OX в положительном направлении

Видно, что при движении лазера течения стремятся к центру теплового пучка. При этом необходимо заметить, что направление движения (от или к центру пучка) и скорость потока зависит от содержания серы в веществе и от чистоты материала. В этом случае данный феномен ведет к увеличению глубины проплава материала и без учета конвекции Марангони, нельзя качественно и количественно оценить реальность данного процесса.

В главе 3 исследовалось влияние колебаний на течения расплавленного металла в кювете, порожденные эффектом Марангони от лазерного излучения, заданного гауссовым распределением. Численное решение подразумевает введение двух расчетных доменов, в одном из которых решается дифференциальное уравнение упругости, а в другом гидродинамическое дифференциальное уравнение с учетом полной энергии системы, как показано на рис. 3.

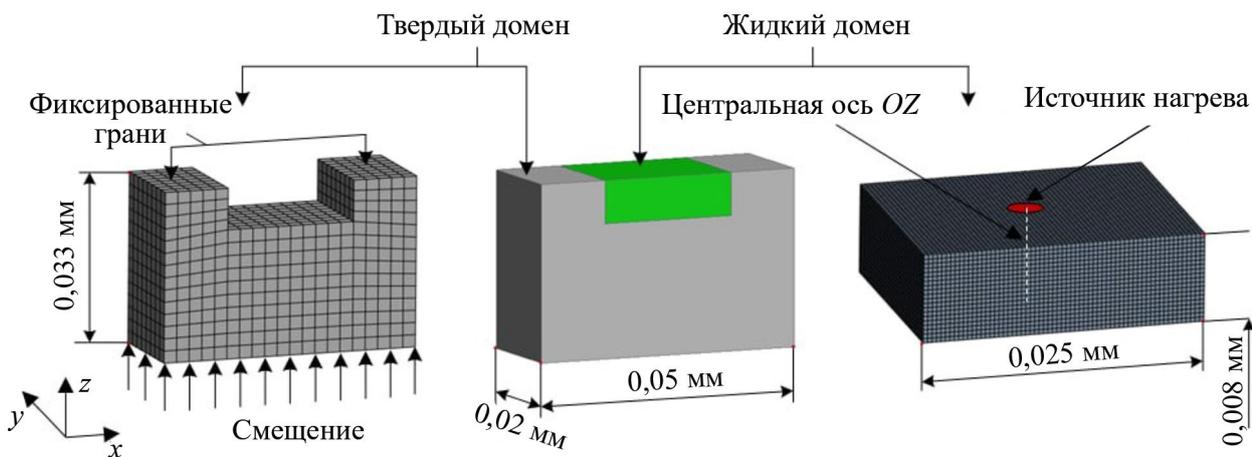


Рисунок 3 – Описание расчетных областей

Оба домена представляют собой нержавеющую сталь 08X16H11M3 в разных агрегатных состояниях – твердое и жидкое. При решении задачи не рассматривалась

деформация свободной поверхности. Моделирование производилось методом конечных элементов (Ansys Transient Structural) и методом конечных объемов (Ansys CFX), объединенных через общий связанный модуль ANSYS System Coupling.

В табл. 2 приведен анализ максимальной скорости течения на центральной оси жидкого домена, полученной с ультразвуковым воздействием и без него. Расчет относительной разности высчитывался по следующей формуле

$$R = \left( \frac{u_{с\text{УЗ}} - u_{\text{безУЗ}}}{u_{\text{безУЗ}}} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $u_{с\text{УЗ}}$  – максимальная скорость, полученная с ультразвуковыми колебаниями;  $u_{\text{безУЗ}}$  – максимальная скорость, полученная без ультразвуковых колебаний.

Таблица 2 – Сравнительный анализ максимальных скоростей течений с и без ультразвукового воздействия

Контрольно-временные точки, мкс	Максимальная скорость, мм/с		Относительная разность, %
	с УЗК	без УЗК	
<i>a</i> – 2,5	0,246948	0,111758	120,97
<i>c</i> – 7,5	0,340184	0,269938	26,02
<i>e</i> – 12,5	0,291001	0,331612	-12,25
<i>g</i> – 17,5	0,415278	0,356166	16,60
<i>i</i> – 22,5	0,292412	0,366164	-20,15
<i>k</i> – 27,5	0,431457	0,370363	16,50

На рис. 4 представлено сравнение по скалярным и векторным полям скоростей в ультразвуковом поле и без него в среднем сечении плоскости ZX.

На контурах в контрольно-временных точках (*a*, *c*, *d*, *g*, *I*, *k*) наблюдается сглаживание скалярного поля скоростей на нижней части домена вследствие передачи импульса движения от деформируемой поверхности.

Качественно картины течения совпадают с работами других авторов, которые исследовали схожую ситуацию, но с иной геометрией и без учета потерь энергии при передаче ультразвуковых колебаний через твердую часть домена. Однако для развития кавитационного течения в ванне расплава необходимо много больше времени симуляции.

В главе 4 математически описаны процессы лазерной обработки в УЗ поле, генерируемом сонотродом. 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.

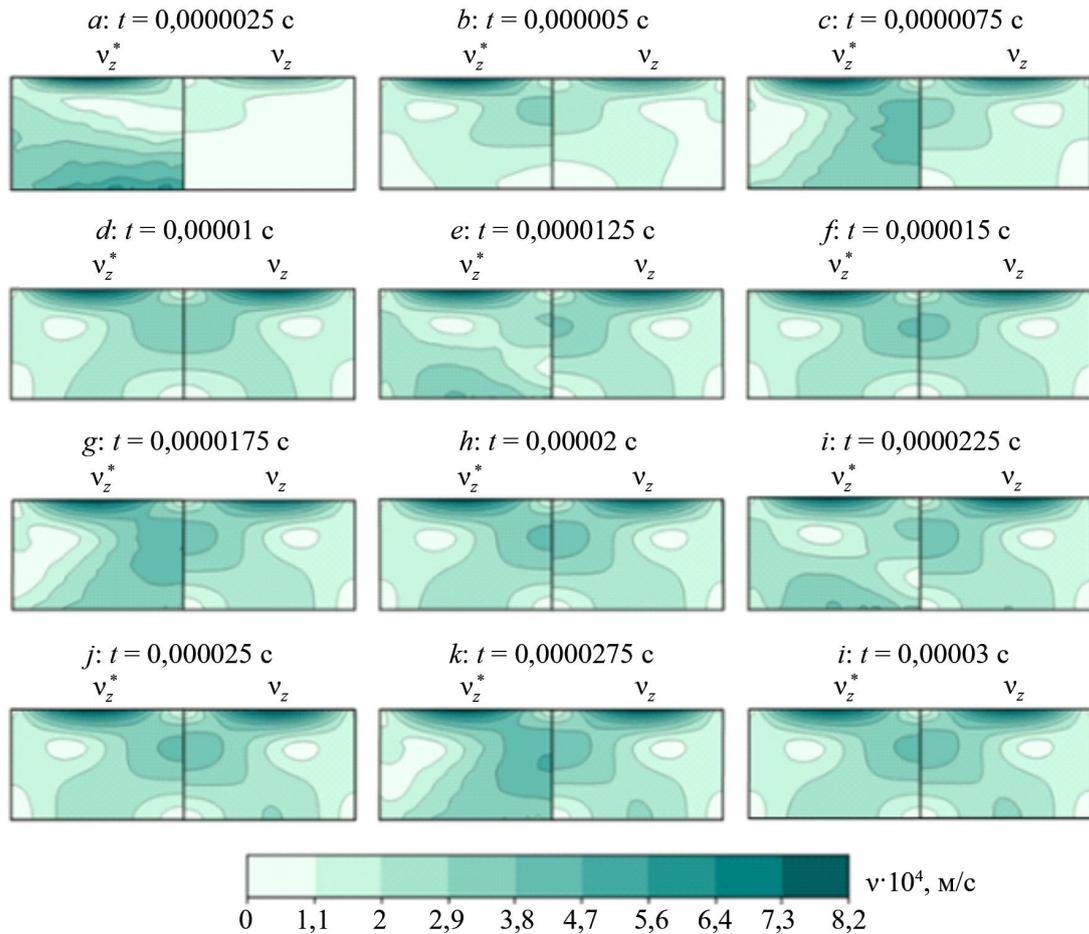


Рисунок 4 – Поля скоростей течения при использовании УЗ ( $v_z^*$ ) и без ( $v_z$ )

Для описания гидродинамики многофазной среды использовалось следующее уравнение сохранения момента:

$$\frac{\partial(\alpha \rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla(\alpha \rho \vec{u} \vec{u}) = -\alpha \nabla p + \alpha \rho \vec{g} + \vec{f}_b + \vec{f}_M + \vec{f}_P, \quad (4)$$

где  $p$  – скалярное поле давления;  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения;  $\vec{f}_b$  – тепловая плавучесть (плавучесть, возникающая вследствие разницы плотности, вызванной изменением температуры);  $\vec{f}_M$  – силы Марангони (вызванные градиентами поверхностного натяжения при изменениях температуры);  $\vec{f}_P$  – силы давления (вызванные переменным воздействием ультразвукового источника).

Закон сохранения энергии:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T + (\vec{\tau} \cdot \vec{u})) + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{рад}} + Q_{\text{лаз}}, \quad (5)$$

где  $E$  – полная энергия;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $Q_{\text{лаз}}$  – объемный источник лазерного воздействия;  $\vec{\tau}$  – вязкие напряжения;  $Q_{\text{конв}}$  – объемный источник конвекционной теплоотдачи;  $Q_{\text{рад}}$  – объемный источник радиационной теплоотдачи.

Для сравнительного анализа структур течений проведена серия численных экспериментов с разными частотами ультразвуковых колебаний, как показано на рис. 5.

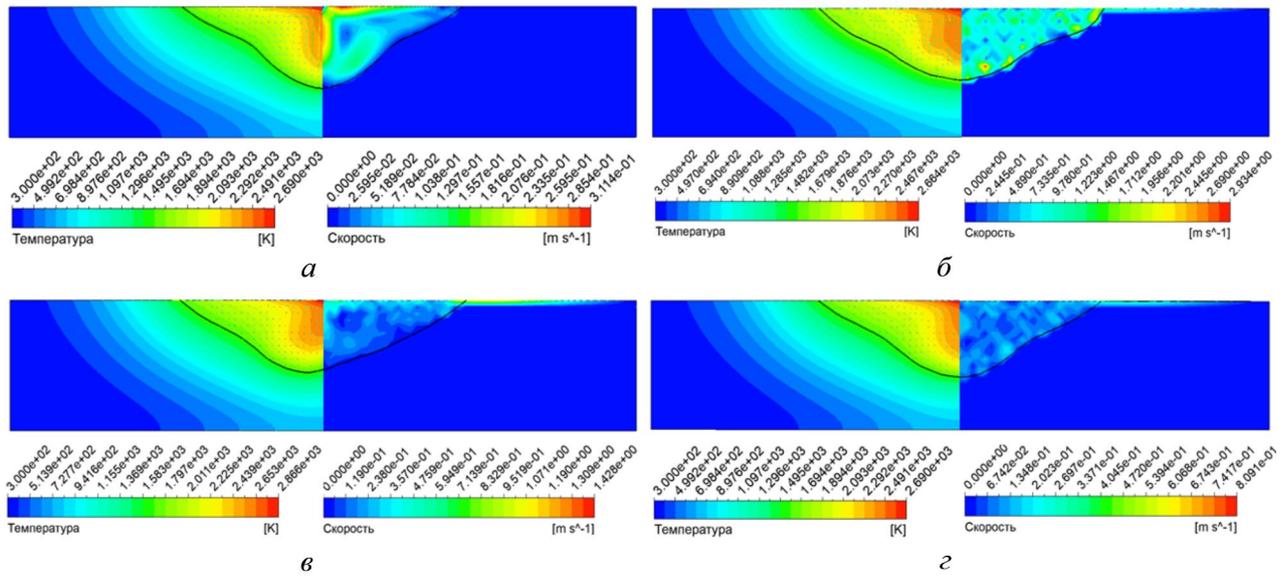


Рисунок 5 – Контуры скалярных полей температуры и магнитуды скорости в ванне расплава с частотой внешнего воздействия: *а* – 0 кГц; *б* – 20 кГц; *в* – 40 кГц; *г* – 60 кГц

Для анализа скоростных характеристик при периодическом влиянии необходимо брать средние значения. На рис. 6 представлены графики плотности распределения значений скоростей в ванне расплава за время 0,025 – 0,03 с. Для этого была написана программа на языке MATLAB, которая считывала поля скоростей в каждой вершине сетки и по заданным отрезкам скоростей подсчитывала их количество. Увеличение частоты УЗ поля ведет к образованию течений с меньшей дисперсией скоростей.

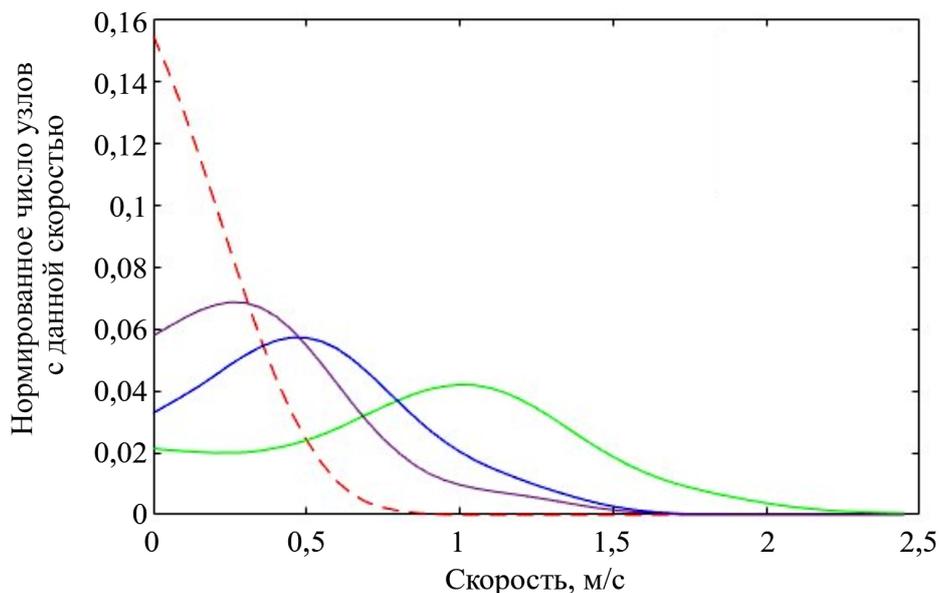


Рисунок 6 – График плотности распределения скоростей в ванне расплава при разных частотах УЗ поля: --- 0 кГц; — 20 кГц; — 40 кГц; — 60 кГц

Также подсчитаны значения математического ожидания функции плотности и среднеквадратичного отклонения для каждой из приведенных частот УЗ поля (табл. 3). Для случая с введенным УЗ частота в 60 кГц показывает меньший разброс скоростей, что влечет к равномерности потоков по во всей ванне расплава.

Таблица 3 – Значения характеристик кривых распределений

Частота, кГц	Математическое ожидание скорости, м/с	Среднеквадратичное отклонение
0	0,19	0,21
20	0,91	0,98
40	0,54	0,57
60	0,41	0,43

Математически описана и программно реализована трехмерная многофазная модель точечного лазерного нагрева в ультразвуковом поле частотой 40 кГц с учетом тепловых потерь и термокапиллярных течений. Проанализировано влияние ультразвуковых колебаний на объем и геометрию ванны расплава по сравнению с классическим подходом. Предложены методы стабилизации численного решателя при решении многофазных задач. Проведена верификация численной модели с реальным экспериментом.

Так как решается многофазная задача и интерфейс между газообразной средой и твердым материалом находится непосредственно в домене, возникает необходимость использования объемных источников нагрева, теплоотдачи и термокапиллярной конвекции, но с приведением их к соответствующей размерности.

Объемный источник лазерного излучения задавался по формуле:

$$Q_{\text{лаз}} = q \cdot e^{\frac{z-z_0}{z_b-z_0} \ln(\chi)} e^{-3 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r_z^2}}; \quad (6)$$

$$q = (1-A) \frac{3\eta Q_L \ln(\chi)}{\pi(1-e^{-3})(z_b-z_0) \left\{ r_0^2 - r_b^2 \chi - 2 \frac{r_b-r_0}{\ln(\chi)} \left[ r_0 - r_b \chi - \frac{r_b-r_0}{\ln(\chi)} (1-\chi) \right] \right\}}, \quad (7)$$

где  $x_0, y_0, z_0$  – координата центра лазерного пятна;  $\eta$  – энергоэффективность лазера;  $z_b$  – координата нижнего источника тепла;  $\chi$  – коэффициент пропорциональности пиковых плотностей мощности между верхней и нижней поверхностями источника тепла;  $r_0$  – радиус лазерного пятна;  $r_b$  – радиус нижнего источника тепла.

Рассеяние тепла, вызванное конвективным теплообменом и тепловым излучением, определяется формулами соответственно

$$Q_{\text{конв}} = -h_c (T - T_0) l^{-1}; \quad (8)$$

$$Q_{\text{рад}} = -\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) l^{-1}, \quad (9)$$

где  $h_c$  – коэффициент конвекции;  $T$  – скалярное поле температур;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $l$  – ширина межфазного интерфейса;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности;  $\sigma$  – постоянная Больцмана.

Сила Марангони представляет собой силу сдвига горячего капилляра, касательную к свободной границе раздела, обусловленную градиентом поверхностного натяжения  $\frac{\partial\gamma}{\partial T}$ , и ее выражение имеет вид

$$\vec{f}_M = \frac{\partial\gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}} l^{-1}, \quad (10)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\vec{s}$  – тангенциальный к поверхности единичный вектор.

Распределение давления вследствие высокочастотного воздействия на подложку можно описать уравнением

$$P(x, y, z, t) = P_{\text{атм}} + A \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \cos\left(2\pi \frac{z}{\lambda}\right) \sin(2\pi vt), \quad (11)$$

где  $P_{\text{атм}}$  – атмосферное давление;  $A$  – амплитуда колебания;  $\lambda$  – длина волны ультразвуковых волн;  $v$  – частота колебания.

Для учета ультразвукового воздействия в уравнение (4) необходимо добавить силу воздействия переменного давления, которое определяется с учетом (11) по уравнению

$$\vec{f}_p = -\frac{1}{\rho} \nabla P(x, y, z, t). \quad (12)$$

Так как сталь была представлена как флюид со свойствами твердого вещества, даже большие значения динамической вязкости не могут полностью остановить течения в домене. Чтобы исключить скорости в домене, для твердой фазы был введен момент силы, противодействующий движению элементарных жидких частиц в виде уравнения

$$\vec{f}_{bf} = \alpha \cdot \text{velocity\_multiplier} \cdot \vec{u}, \quad (13)$$

где *velocity\_multiplier* – множитель для регулировки работы противодействующей силы в промежутке от 0 до 1.

Значение *velocity\_multiplier* зависит от температуры и характеризует, включение/отключение тормозящей силы согласно формуле

$$\text{velocity\_multiplier} = \frac{-\rho \cdot 10^{12}}{1 + e^{\frac{T - T_{\text{пл}}}{3}}}, \quad (14)$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления, равная среднему значению от температур солидуса и ликвидуса.

Применение противодействующей силы в зависимости от температуры представлено на рис. 7.

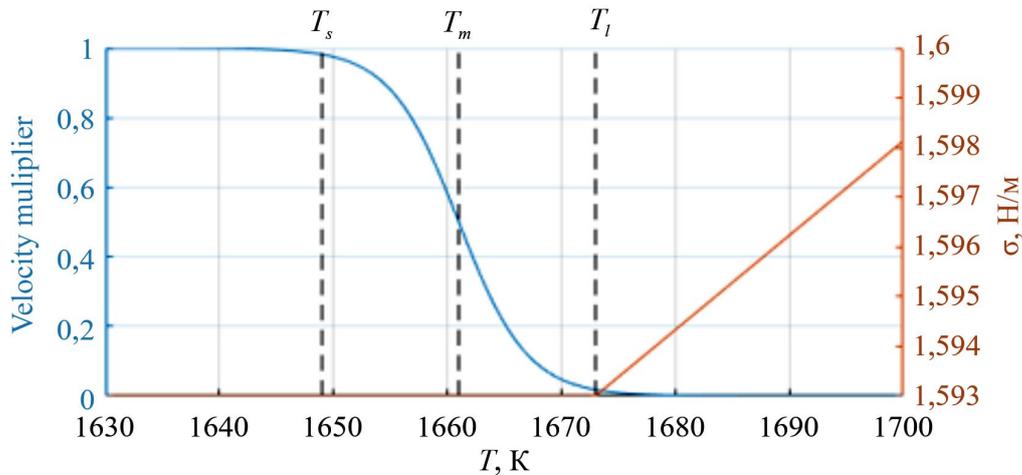


Рисунок 7 – График зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры и соответствующая ему сигмоида *velocity multiplier*

Использовалась PISO схема, так как она стабильнее для колебаний давления в процессе решения. На межфазной границе вследствие высоких скоростей плавления образуются термокапиллярные течения. Для стабилизации скорости и энергии для обоих переменных использовалась first-order upwind схема дискретизации. Шаг по времени был равен  $2,25 \cdot 10^{-6}$  с и подобран таким образом, чтобы обеспечить подробное описание синусоидального поведения колебания давления.

На рис. 8 приведена динамика численных решений гидродинамики ванны расплава без ввода ультразвуковых колебаний (а) и в ультразвуковом поле частотой 40 кГц (б).

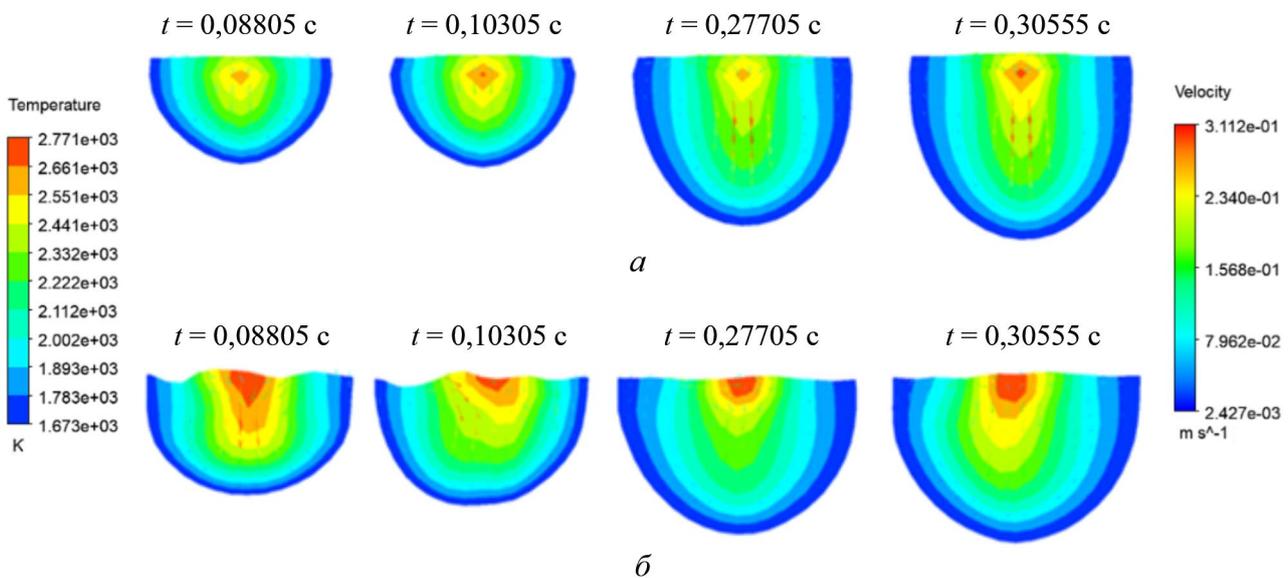


Рисунок 8 – График плотности распределения скоростей в сечении ванны расплава при разных частотах УЗ поля

С помощью инструментов постпроцессора Ansys Fluent измерялись контрольные показатели для сравнения двух экспериментов: объем ванны расплава, ширина и глубина зоны термического воздействия, средняя магнитуда скорости в ванне расплава.

Таблица 4 – Параметры ванн расплава для момента времени  $t = 0,30555$  с

Показатель	Без УЗК	С УЗК	Разница относительно без УЗК, %
Объем ванны расплава, мм <sup>3</sup>	0,64	0,85	32,8
Ширина ванны расплава, мм	1,1	1,2	9,09
Глубина ванны расплава, мм	0,9	0,9	0,0
Средняя скорость потока, м/с	0,107	0,073	-31,69

Анализ проведенных расчетов позволяет сделать вывод о том, что введение ультразвуковых колебаний позволяет увеличить объем зоны термического воздействия и увеличивает ширину ванны расплава. Данные показатели могут быть связаны с тем, что изменяется картина течений по всей области жидкого металла, а именно уменьшается скорость вдоль оси OZ и интенсифицируются течения вдоль жидкого контура.

Для подтверждения корректности численного решения был проведен натурный эксперимент точечного лазерного воздействия на нержавеющую сталь 08X16H11M3. Процесс лазерного точечного нагрева проводился с помощью иттербиевого волоконного лазера ЛС-6-К производства фирмы IPG Photonics. Мощность лазерного излучения 3 кВт и диаметр лазерного пучка 3 мм. Ультразвуковое воздействие осуществлялось с помощью излучателя Ланжевена мощностью 100 Вт и частотой 40 кГц. Оптические снимки зон термического воздействия для двух проведенных экспериментов приведены на рис. 9.

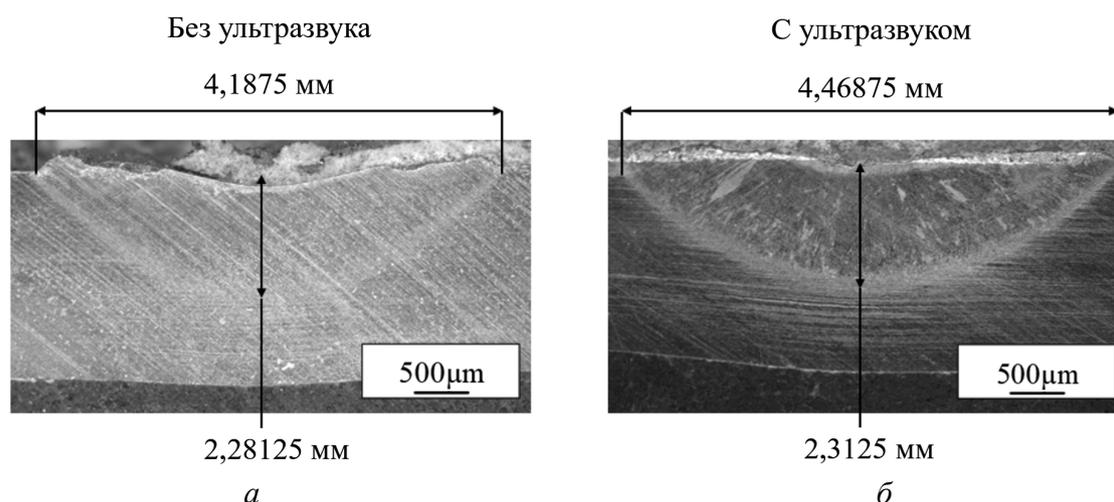


Рисунок 9 – Снимки зон термического воздействия после лазерного воздействия:  
*a* – без использования ультразвука; *б* – с использованием

Количественные характеристики натурального экспериментов представлено в табл. 5.

Таблица 5 – Значения характеристик натурального эксперимента

Показатель, мм	Без УЗК	С УЗК	Разница относительно без ультразвука, %
Ширина ванны расплава	4,19	4,47	6,68
Глубина ванны расплава	2,28	2,31	1,32

Эксперимент показал, что введение ультразвуковых колебаний также способствует увеличению диаметра ванны расплава, что соотносится с численным расчетом.

На основе разработанных моделей проведен расчет по лазерной наплавке.

Для учета добавления материала в процессе лазерной обработки подложки использовалось уравнение (15) как источник массы:

$$S_{\text{масс}} = \frac{3\eta_{\text{п}} \cdot PER}{\pi \cdot r_{\text{п}}^2 \cdot H_{\text{мин}}} e^{-\frac{3r^2}{r_{\text{п}}^2}}, \quad (15)$$

где  $\eta_{\text{п}}$  и  $r_{\text{п}}$  – эффективное использование порошка и радиус пятна порошка;  $PER$  – массовый расход подачи порошка;  $H_{\text{мин}}$  – минимальная высота блока на свободном интерфейсе модели;  $r$  – расстояние от центра пятна.

Результаты численного решения наплавки на примере нержавеющей стали 08X16Н11М3 представлены на рис. 10.

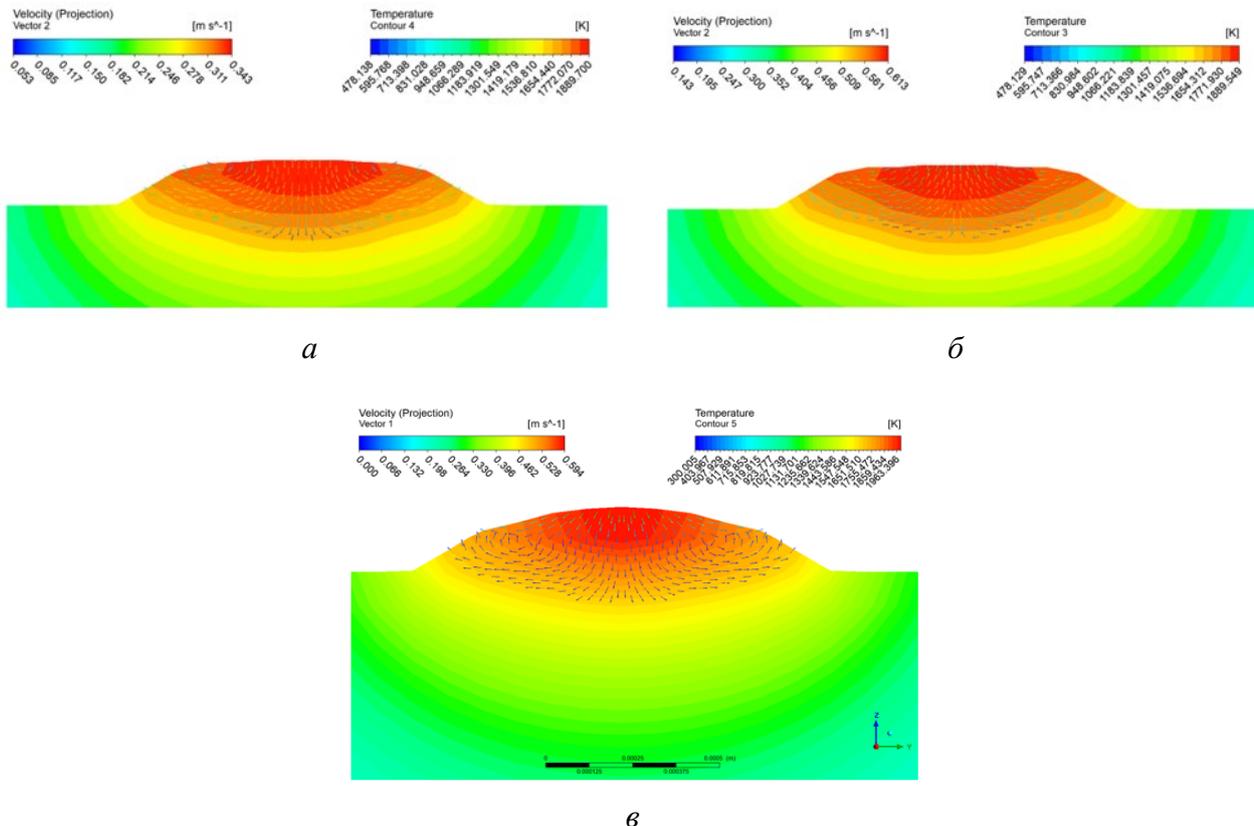


Рисунок 10 – Поперечные изображения валиков в разные моменты времени: *а* – в процессе лазерной наплавки; *б* – с ультразвуком; *в* – без ультразвука

На рис. 10, *а* представлена классическая наплавка без ультразвукового воздействия. При устоявшемся процессе наблюдается стационарное поле скоростей. При ультразвуковом воздействии (рис. 10, *б* и *в*) поле нестационарно всегда и направление течения в узлах чередуется. При этом валик, наплавленный с использованием внешнего ультразвукового воздействия, шире и имеет меньший угол смешиваемости, что коррелирует с исследованиями влияния ультразвука на жидкие среды.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты работы, намечены направления перспективных исследований.

В **приложении 1** представлен программный код заголовочного файла пользовательской функции для Ansys Fluent на языке C, в **приложении 2** – программный код пользовательской функции, содержащий макросы для стабилизации течений, ввода массовых сил ультразвукового воздействия на жидкую среду, в **приложении 3** – акт об использовании в учебном процессе результатов диссертационного исследования, в **приложении 4** – акт апробации результатов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты и выводы работы заключаются в следующем:

1. Разработана многофазная нелинейная трехмерная нестационарная математическая модель лазерной сварки и лазерной наплавки с учетом конвективных и радиационных тепловых потерь, а также возникновения термокапиллярных течений, которая показала, что невозможно в полной мере моделировать процессы лазерной сварки и наплавки без учета граничного условия конвекции Марангони на свободной поверхности ванны расплава. В качестве источника лазерного излучения при моделировании процессов лазерной обработки предложено использовать супергауссовы распределения с подобранными безразмерными коэффициентами  $a$  и  $b$ . Данные коэффициенты следует подбирать в соответствии с параметрами лазерной установки. Для установки ЛС-6-К оптимальными значениями коэффициентов являются  $a = 2,8$ ,  $b = 1,6$ . Для классической технологии лазерной обработки без использования ультразвуковых колебаний, предложен способ контроля скорости течений в ванне расплава посредством варьирования профиля интенсивности лазера и модулирования мощности излучения.

2. Программно реализована численная модель двумерной и трехмерной многофазных задач лазерной сварки и наплавки с учетом внешних ультразвуковых колебаний в гидродинамических уравнениях. Показана возможность использования инструментария вида ANSYS System Coupling, позволяющего решить связанную задачу гидродинамики и прочности. Представлен и программно реализован математический аппарат для стабилизации решения при моделировании многофазных течений и ультразвуковых колебаний.

3. Установлены влияния разных частот ультразвукового воздействия на структуру течений и конечную форму ванны расплава в процессе лазерной обработки стали. Ввод колебаний в ультразвуковом диапазоне частот в ванну расплава уменьшает скорости естественной конвекции течений на поверхности и в жидкой фазе металла. Показано, что воздействие ультразвукового поля в процессе лазерной обработки сталей позволяет устранить застойные зоны, которые появляются за счет образования вихрей в ванне расплава. Показано, что частота ультразвуковых колебаний влияет на среднюю скорость потока в ванне расплава и дисперсию распределения скоростей. При увеличении частоты средняя скорость и дисперсия снижаются. Показано, что в моменты времени, в которые амплитуда колебаний ультразвуковой волны имеет максимум или минимум, скалярное и векторное поля скорости с ультразвуковым воздействием и без него пропорциональны друг другу. Изменение скорости течения минимально вследствие нулевой деформации поверхности жидкого металла, не получающей дополнительного импульса воздействия на поток. Показано, что в моменты времени, которым соответствует среднее значение амплитуды колебаний, скалярное и векторное поля скорости при ультразвуковом воздействии и без него непропорциональны. Передаваемый импульс движения деформируемой твердой поверхности интенсифицирует скорость течения при движении (деформации) объема жидкого металла вниз и тормозит течение при движении (деформации) его вверх. В обоих случаях отмечено, что деформация приводит к сглаживанию скалярного поля скорости на нижней части жидкого объема. При использовании ультразвуковых колебаний частотой 40 кГц увеличивается объем ванны расплава на 32% и ширина на 9% по сравнению с расчетами без введения ультразвука. Ультразвуковые колебания уменьшают среднюю скорость течения в ванне расплава за счет торможения естественных конвекционных течений, что напрямую влияет на распределение тепла и геометрию зоны термического воздействия лазерного излучения. Наилучшим образом итоговую структуру течений, формирующую однородную структуру без зон кристаллического роста в численных и реальных экспериментах обеспечило поле частотой 60 кГц.

4. На основе данных, полученных в результате физического эксперимента, проведена валидация численных расчетов для режимов без ультразвукового воздействия и с использованием ультразвукового воздействия. Показано, что с увеличением мощности лазера увеличивается ошибка при измерении глубины и ширины ванны расплава. Это связано с тем, что при увеличении мощности необходимо внедрять в модель новые граничные условия.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы.**

Основное направление дальнейшей разработки темы диссертации теоретическое описание и практическое применение ультразвуковых колебаний в процессе прямой лазерной наплавки в аддитивных технологиях. Необходимость учета дополнительных объемных источников массы в виде непрерывно поступающего металлического порошка и сильно изменяющаяся по сравнению с обычной лазерной обработкой

межфазная поверхность значительно усложняют процесс численного моделирования. Введение ультразвуковых колебаний в процесс аддитивного выращивания может позволить увеличить геометрию наплавленного валика за счет изменения процессов теплопереноса в ванне расплава.

Согласно стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, перечисленные работы относятся к направлению Н1 «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, **новым материалам и способам конструирования**, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### **В рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ**

1. *Никифоров, С.А.* Численное моделирование и верификация точечного лазерного нагрева нержавеющей стали AISI 316L / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 8(140). – DOI 10.18698/2308-6033-2023-8-2295.

2. *Никифоров, С.А.* Исследование формы ванны расплава при лазерном воздействии на сталь AISI 316L с учетом конвекции Марангони / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А. И. Горунов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 2(134). – DOI 10.18698/2308-6033-2023-2-2248

3. *Никифоров, С.А.* Многофазная трехмерная модель лазерного точечного нагрева и плавления стали AISI 316L в ультразвуковом поле / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, Р.С. Рубля [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – № 7(151). – DOI 10.18698/2308-6033-2024-7-2369

4. *Никифоров, С.А.* Исследование влияния ультразвуковых колебаний на структуру течений в жидком металле и форму ванны расплава нержавеющей стали AISI 316L / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.И. Горунов, А.Х. Гильмутдинов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – № 10(155). – DOI 10.18698/2308-6033-2024-11-2398

### **В научных журналах, индексируемых платформах Scopus и Web of Science**

5. *Nikiforov, S.A.* Flow analysis during laser-acoustic processing of stainless steel AISI 316L / S.A. Nikiforov, I.V. Shvarts, A.Kh. Gilmutdinov, A.I. Gorunov // Computational continuum mechanics. – 2024. – Vol. 17. – No 2. – Pp. 133-142. – DOI 10.7242/1999-6691/2024.17.2.12

### **В других журналах и материалах научных конференций**

6. *Никифоров, С.А.* Алгоритм клеточного автомата для переноса массы поверхности за счет градиента кривизны / Д.Р. Сафиуллина, С.А. Никифоров // XXV

Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 года. Т. III. – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. – С. 188-192.

7. *Никифоров, С.А.* Алгоритм вокселизации полигональной трехмерной модели методом трассировки лучей / А.В. Катаев, С.А. Никифоров // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 года. Т. III. – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. – С. 122-124.

8. *Никифоров, С.А.* Моделирование распространения акустических волн, индуцированных импульсным лазером, с учетом релаксации теплового потока / Р.М. Габбазов, С.А. Никифоров // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 года. Т. III. – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. – С. 107-113.

9. *Никифоров, С.А.* Моделирование формирования и распространения тепла и упругих колебаний в металле под действием модулированного лазерного излучения / Р.М. Габбазов, С.А. Никифоров, И.В. Цивильский, А.Х. Гильмутдинов // Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года: Материалы VII всероссийской научно-технической конференции, Москва, 28 июня 2021 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2021. – С. 297-305.

10. *Никифоров, С.А.* Двумерное конечно-разностное моделирование теплопереноса и напряженно-деформированного состояния в плоском сечении изделия в процессе селективного лазерного плавления / Р.С. Рубля, И.В. Цивильский, С.А. Никифоров // Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года: Материалы VII всероссийской научно-технической конференции, Москва, 28 июня 2021 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2021. – С. 266-280.

11. *Никифоров С.А.* Теоретическое обоснование эффективности оптоакустического воздействия при лазерной наплавке / С.А. Никифоров, Р.М. Габбазов, И.В. Цивильский, А.Х. Гильмутдинов // Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на

период до 2030 года: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 28 июня 2021 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2021. – С. 257-265.

12. *Никифоров, С.А.* Метод конечных разностей для численного решения уравнения теплопроводности на иррегулярной сетке / К.А. Гашигуллин, С.А. Никифоров // Роль науки и образования в процессах развития современного общества: Сборник научных трудов. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "САНТРЕМ", 2022. – С. 120-124.

13. *Никифоров, С.А.* Оценка потерь энергии при гауссовом и супергауссовом распределении интенсивности / А.В. Катаев, И.В. Шварц // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Ч. 13. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 191-193.

14. *Никифоров, С.А.* Моделирование течения расплава металла под воздействием лазерного излучения с учетом конвекции Марангони / Е.П. Березин, С.А. Никифоров, И.В. Шварц // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы международной молодежной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 1265-1271.

15. *Никифоров, С.А.* Численное моделирование газопорошковых потоков установки для плазменной сфероидизации металлических порошков / Е.П. Березин, С.А. Никифоров, А.Х. Гильмутдинов // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 3. – С. 55-60.

### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

16. *Никифоров, С.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663604. Автоматизированная система плоской обработки ударно-волновым методом / С.А. Никифоров. – Москва: Роспатент, 2021.

17. *Никифоров, С.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683529. Моделирование процесса 3D-печати с предварительной вокселизацией STL поверхности / С.А. Никифоров. – Москва: Роспатент, 2022.

18. *Никифоров, С.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682173. Программа считывания и обработки спектра излучения с возможностью спектрального анализа / С.А. Никифоров. – Москва: Роспатент, 2022.

19. *Никифоров, С.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615971. Программа для симуляции диффузии порошка методом клеточных автоматов / С.А. Никифоров. – Москва: Роспатент, 2022.

20. *Никифоров, С.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611650. Программа для моделирования оптоакустического воздействия наносекундного лазера на гомогенную структуру / С.А. Никифоров. – Москва: Роспатент, 2022.

21. *Никифоров, С.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611580. Программа для вокселизации STL геометрии / С.А. Никифоров. – Москва: Роспатент, 2022.

22. *Никифоров, С.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661849. Многофазная модель лазерной сварки в ультразвуковом поле / С.А. Никифоров. – Москва: Роспатент, 2024.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100. Заказ Д13.

---

Издательство КНИТУ-КАИ  
420111, Казань, К. Маркса, 10