

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



**Костылева Лилия Юрьевна**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРЕДПРИЯТИЯМИ, ВЫПУСКАЮЩИМИ И ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ  
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЛИСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОСРЕДСТВОМ  
СИСТЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕТОДАМИ ТЕПЛОВОГО  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Специальность 2.3.4 – Управление в организационных системах

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
**Логиновский Олег Витальевич**

Челябинск – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ .....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СРЕДСТВ УЛУЧШЕНИЯ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВО ПРОДУКЦИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	15
1.1. Повышение эффективности управления промышленными предприятиями за счет совершенствования технологий контроля качества выпускаемой продукции и используемого оборудования.....	15
1.2. Расширение сферы использования биметаллических листовых материалов как одного из основных средств повышения эффективности работы предприятий в различных отраслях промышленности .....	21
1.3. Анализ существующих подходов к выявлению дефектов многослойных биметаллических листовых материалов .....	29
1.4. Анализ существующих систем на основе теплового неразрушающего контроля .....	35
1.5. Обзор математических моделей для исследования теплового состояния многослойных пластин .....	41
1.6. Анализ методов решения задач теплопередачи .....	48
1.7. Обзор современных программных продуктов для моделирования процессов теплопередачи.....	52
Выводы по главе 1 .....	58
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ, ВЫПУСКАЮЩИМИ И ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЛИСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	60
2.1. Концептуальные положения по формированию системы выявления и оценки дефектов многослойных биметаллических листовых материалов методами теплового неразрушающего контроля .....	60

2.2. Комплексный подход к обоснованию выбора системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового контроля .....	71
Выводы по главе 2.....	80
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	83
3.1 Математическая модель процесса активного теплового контроля многослойного биметаллического материала при наличии дефектов соединения слоев.....	83
3.2. Алгоритм решения краевой задачи теплопередачи в многослойном биметаллическом материале методом конечных разностей.....	90
3.3. Комплекс входных и выходных данных вычислительного пакета Agros2D при моделировании процесса нагрева и охлаждения трехслойной биметаллической пластины с дефектами методом конечных элементов .....	94
3.4. Программа «Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля» .....	100
Выводы по главе 3.....	103
ГЛАВА 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ, СВЯЗАННЫХ С ПРОИЗВОДСТВОМ И ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ...	104
4.1 Исследование влияния мощности теплового потока и времени нагрева на величину температурного сигнала на поверхности пластины с дефектом при различных вариантах взаимного расположения устройства регистрации температуры и источника теплового потока.....	104
4.2. Исследование влияния размера дефекта на величину дифференциального температурного сигнала на поверхности пластины .....	120
4.3. Определение размера дефекта по данным температурного поля различными методами.....	124
4.4. Исследование влияния сочетания дефектов на величину температурного сигнала на поверхности пластины.....	131

Выводы по главе 4.....	138
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	139
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	142
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Алгоритм расчета поля температур методом конечных разностей .....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Свидетельство о регистрации программы ЭВМ.....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Акт внедрения результатов диссертационной работы на предприятии АО «Рифар» .....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Заключение об использовании результатов диссертации АУ ЮНИИИТ .....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Заключение об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе ВШЭЖН ЮУрГУ.....	174

## ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты исследования механизмов, моделей и алгоритмов управления промышленными предприятиями, выпускающими продукцию и использующими технологическое оборудование из многослойных биметаллических листовых материалов, с применением системы выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля.

Работа выполнена в рамках научной школы управления производственными и организационными системами с использованием современных информационных технологий и методов цифровой трансформации заслуженного деятеля науки РФ О.В. Логиновского.

Теоретические основы управления производственными и организационными системами были заложены в целом ряде трудов российских и зарубежных ученых, таких как Р. Акофф, С. Бир, В.Н. Бурков, Н. Винер, А.К. Гастев, В.М. Глушков, О.В. Логиновский, Г. Минцберг, Д.А. Новиков, У. Райс-Джонстон, А. Файоль, А.-В. Шеер, Д. Шелдрейк и др.

Вопросами применения методов многокритериального выбора в разное время занимались Р.Л. Кини, О.И. Ларичев, А.В. Лотов, В.Д. Ногин, А.Б. Петровский, В.В. Подиновский, Д.А. Поспелов, Г.В. Ройзензон, Х. Райфа, Т. Саати, В.И. Ширяев и др.

Процессы теплового контроля многослойных материалов исследовали D. Balageas, J.C. Batsale, A. Bendada, P. Bison, D. Burleigh, P. Cielo, A. Degiovanni, E. Grinzato, R. J. Jenkins, J.-C. Krapez, D. Maillet, X. Maldague, S. Marinetti, U. Netzelmann, W. J. Parker, S. Shepard, G. Walle, W.P. Winfree, J.N. Zalameda, Н.А. Бекешко, Ж. Госсорг, А.Е. Карпельсон, А. А. Кеткович, Ю.А. Попов, В.А. Строков, Р. Хадсон, и др.

Современная российская научная школа теплового контроля представлена трудами В.П. Вавилова, Е.В. Абрамовой, О.Н. Будагина, Д.А. Нестерука, А.П. Пудовкина, Ю.В. Плужникова, Т.Е. Троицкого-Маркова, В.Н. Чернышова и др.

Теоретические основы математического описания процесса теплопередачи в многослойных пластинах заложены в трудах А.В. Лыкова, В.П. Исаченко, В.А. Осиповой, Г. Карслоу, Д. Егера, А.И. Пеховича, В.М. Жидких, Д. Ши и др.

Вопросами применения аналитических и численных методов для решения задач теплопередачи в многослойных материалах занимались D. R. Green, О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, Дж. Бек, Б. Блакуэлл, А.В. Ненарокомов, Э.М. Карташов, В.А. Кудинов, Г.В. Кузнецов, А.А. Самарский, А.Н. Тихонов, М.А. Шеремет, И.М. Ячиков и др.

Моделированием процессов теплопередачи в многослойных материалах с применением современных цифровых технологий занимались P. Karban, F. Mach, P. Kùs, M. Sause, М.Н. Аралов, В.Ф. Барабанов, С.Д. Дубицкий, Г.Н. Дульнев, В.О. Каледин, В.Г. Парфенов, Ю.Ю. Реутов, В. П. Югов и др.

**Актуальность темы исследования.** Вопросы повышения эффективности деятельности промышленных предприятий, в том числе производящих и использующих биметаллические листовые материалы, связаны с анализом внешних и внутренних факторов, воздействующих на предприятие, совершенствованием организационной структуры компании, созданием методов и алгоритмов подготовки и принятия решений руководителями предприятий по основному направлению их деятельности, разработкой современных корпоративных информационных систем управления и др.

Совершенствование управления промышленными предприятиями, выпускающими продукцию и использующими технологическое оборудование из многослойных биметаллических листовых материалов, должно осуществляться в числе прочего за счет развития новых, перспективных технологий оценки качества продукции, основанных на использовании методов неразрушающего контроля.

В целом ряде технологических процессов широко используются методы повышения качества выпускаемой продукции за счет современных средств мониторинга параметров изделий. На сегодняшний день подобный мониторинг осуществляется либо с помощью уже довольно устаревших методов разрушающего контроля (когда о качестве партии изделий судят по результатам проверки отдельных ее образцов), либо с применением более современных методов неразрушающего контроля (ультразвуковой, радиационный, вихретоковый, тепловой, магнитный и др.).

Проведенный анализ исследований в области методов контроля качества выпускаемой продукции и технологического оборудования из биметаллических листовых материалов показал, что одним из наиболее продуктивных и наименее затратных среди методов неразрушающего контроля является тепловой метод. Результаты многочисленных исследований российских и зарубежных авторов, позволяют понять, что методы теплового контроля дают возможность выявлять самые разные виды скрытых дефектов (расслоения, трещины, пустоты, посторонние включения, примеси и пр.), что способствует раннему обнаружению и устранению брака выпускаемой продукции, а также своевременному планированию ремонта или замены технологического оборудования.

Применение методов теплового неразрушающего контроля для биметаллических листовых материалов является эффективным и целесообразным при совершенствовании технологий контроля качества выпускаемой продукции металлургических производств и технологического оборудования крупных предприятий. При этом достигается обнаружение скрытых и труднодоступных дефектов, что предотвращает их распространение и развитие. За счет обеспечения высокой скорости проверки изделий непосредственно в технологическом потоке имеется возможность сократить сроки и затраты на проведение контроля. В конечном итоге это способствует улучшению качества и эксплуатационной надежности продукции, снижению рисков возникновения аварийных ситуаций, а также повышению экологической безопасности производства.

При принятии решения о вводе в эксплуатацию подобной системы контроля необходимо оценить ее техническую и экономическую эффективность и целесообразность использования на основе различных показателей, которые позволяют сопоставить затраты и эффект от внедрения данной технологии с учетом специфических условий деятельности предприятия. При анализе литературы по термографическим методам оценки качества удалось установить, что в настоящее время какие-либо специализированные методики для обоснования целесообразности и оценки эффективности использования теплового контроля в открытом доступе отсутствуют. Поэтому проведенное автором исследование представляется важным и актуальным.

Современные системы оценки качества многослойных биметаллических листовых материалов методами теплового контроля, помимо источника теплового нагружения и устройства регистрации и визуализации температурного поля, должны включать также программные средства для моделирования теплового состояния и обработки экспериментальных данных. Неотъемлемой составляющей указанных систем являются математические модели объекта контроля, описывающие зависимость результатов контроля от свойств объекта и выбранных технологических режимов. Такие модели позволяют судить о наличии изменений в материале в целом или на отдельных участках на основе анализа аномальных температурных зон на поверхности исследуемого объекта.

**Целью диссертационной работы является** повышение эффективности деятельности предприятий, выпускающих и использующих биметаллические листовые материалы, за счет обоснованного применения системы выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля.

Для достижения данной цели в работе поставлены следующие **задачи**:

– выполнить анализ используемых на практике подходов, методов и моделей повышения эффективности управления промышленными предприятиями; существующих подходов к выявлению дефектов многослойных биметаллических материалов и систем теплового неразрушающего контроля; математических мо-

делей теплового состояния многослойных материалов при наличии дефектов соединения слоев; методов решения задач теплопроводности, применяемых для их реализации, и современных программных средств, используемых для автоматизации данных процессов;

– разработать концептуальные положения по формированию системы выявления и оценки дефектов биметаллических листовых материалов методами теплового неразрушающего контроля и ее интеграции с информационной системой предприятия;

– создать алгоритм обоснования выбора рационального варианта системы контроля дефектов с учетом особенностей деятельности и специфики организации производственного процесса конкретного промышленного предприятия;

– разработать математическую модель теплового состояния трехслойной биметаллической пластины с дефектами в виде воздушной прослойки между металлами, учитывающую условия проведения активного теплового контроля;

– разработать компьютерную программу, реализующую алгоритм решения задачи по предложенной математической модели методом конечных разностей;

– сформировать комплекс входных данных препроцессора вычислительного пакета для реализации моделирования процесса нагрева и охлаждения трехслойной биметаллической пластины с дефектами методом конечных элементов;

– разработать методические рекомендации по практическому применению предложенных в диссертации моделей, методов и алгоритмов на предприятиях, выпускающих продукцию и эксплуатирующих конструкции из многослойных биметаллических листовых материалов, для повышения эффективности их деятельности.

**Объектом исследования** являются промышленные предприятия, выпускающие продукцию и эксплуатирующие конструкции из многослойных биметаллических листовых материалов.

**Предметом исследования** являются процессы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов с помощью систем теплового неразрушающего контроля.

**Методы исследования.** Теоретической и методологической основой диссертационного исследования являются методы современной теории управления организационными системами, методы теории принятия решений, теории систем и системного анализа, математического моделирования, методы конечных разностей и конечных элементов и др.

**Тематика работы.** Содержание диссертации соответствует следующим пунктам направлений исследований Паспорта научной специальности ВАК РФ 2.3.4 «Управление в организационных системах»:

п.3. Разработка методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах.

п.4. Разработка информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах.

п.8. Разработка проблемно-ориентированных систем управления и оптимизации организационных систем.

п.9. Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. На основе анализа используемых на практике подходов и методов повышения эффективности работы промышленных предприятий сформировано современное понимание процесса совершенствования управления производством, связанным с выпуском продукции и эксплуатацией технологического оборудования из биметаллических листовых материалов.

2. Впервые разработана комплексная структура системы выявления и оценки дефектов биметаллических листовых материалов методами теплового неразрушающего контроля, интегрированной с информационной системой предприятия для повышения эффективности его функционирования.

3. Создан комплексный алгоритм обоснования выбора рационального варианта системы контроля дефектов с учетом особенностей деятельности и специфики организации производственного процесса конкретного промышленного предприятия, основанный на сочетании методов вербального анализа решений, принципа разделения количественных и качественных показателей, а также способов поэтапного сокращения количества признаков и альтернатив.

4. Предложена обновленная математическая модель теплового состояния трехслойной биметаллической пластины с дефектами в виде воздушных прослоек между металлами, учитывающая условия проведения активного теплового контроля.

5. Разработана компьютерная программа на языке Matlab, реализующая алгоритм решения задачи по предложенной математической модели методом конечных разностей.

**Теоретическая значимость диссертационного исследования** состоит в разработке обновленного подхода к повышению качества управления промышленными предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, состоящего в формировании комплексной структуры системы выявления и оценки дефектов и обосновании ее внедрения, а также математической модели, описывающей процесс проведения активного теплового контроля трехслойной биметаллической пластины с дефектами в виде воздушных прослоек между металлами.

**Практическая значимость** заключается в том, что его основные положения, выводы, рекомендации, модели, методы и алгоритмы представляют собой основу подготовки и принятия решений по вопросам внедрения и использования систем теплового контроля для выявления дефектов биметаллических листовых материалов на промышленных предприятиях соответствующего профиля.

Представленная математическая модель многослойной биметаллической пластины с дефектом соединения слоев, и разработанное программное обеспечение могут быть использованы для определения оптимальных условий проведения

измерений и интерпретации результатов теплового контроля биметаллических листовых материалов, и при интеграции в корпоративную информационную систему предприятия способствуют повышению эффективности деятельности промышленных предприятий, выпускающих и использующих биметаллические листовые материалы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены на предприятии АО «Рифар», выпускающем продукцию из биметаллических материалов, а также рассмотрены и одобрены АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий» для применения на предприятиях, осуществляющих производство и использование биметаллических материалов. Также результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах ЮУрГУ (НИУ).

**Апробация работы.** Научные положения и разработки автора, а также основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научно-технических и практических конференциях: XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (Южно-Уральский государственный университет, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Челябинск, 05–08 сентября 2022 года); Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022» (Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 года); Всероссийская научная конференция с международным участием «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития—2023 (ЦИСП'2023)» (Челябинск, 21–23 ноября 2023 года); IV Всероссийская научно-практическая конференция «Умные технологии в современном мире» (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, 24–25 ноября 2021 года); 14 научная конференция аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета «Научный поиск» (Челябинск, 19–20 апреля 2022 года); 74,

75, 76 научная конференция преподавателей и сотрудников Южно-Уральского государственного университета «Наука ЮУрГУ» (Челябинск, 2022, 2023, 2024), семинары кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах.

**Публикации.** Основные научные положения, выводы и результаты диссертации представлены в 17 научных публикациях, в том числе 7 публикаций в изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (К2). Получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, содержащего основные выводы и результаты исследования, списка литературы из 152 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 175 страниц, в том числе основного текста – 138 страниц. Работа содержит 50 рисунков, 8 таблиц.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректным применением адекватных теоретических методов, подтверждается сходимостью результатов проведенных вычислительных экспериментов с выполненными ранее исследованиями теплового состояния многослойных материалов.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты анализа используемых на практике подходов, методов и моделей повышения эффективности управления промышленными предприятиями; математических моделей теплового состояния многослойных материалов при наличии дефектов соединения слоев; методов решения задач теплопроводности, применяемых для их реализации, и современных программных средств, используемых для автоматизации данных процессов.

2. Концептуальные положения по формированию структуры системы выявления и оценки дефектов биметаллических листовых материалов методами теплового неразрушающего контроля и ее интеграции с информационной системой предприятия для совершенствования управления промышленным предприятием

при планировании, организации, контроле, анализе его деятельности и повышении уровня информирования руководителей предприятия в целом и его подразделений.

3. Алгоритм обоснования выбора рационального варианта системы контроля дефектов с учетом особенностей деятельности и специфики организации производственного процесса конкретного промышленного предприятия, основанный на сочетании методов вербального анализа решений, принципа разделения количественных и качественных показателей, а также способов поэтапного сокращения количества признаков и альтернатив;

4. Математическая модель теплового состояния трехслойной биметаллической пластины с дефектами в виде воздушной прослойки между металлами.

5. Методические рекомендации по практическому применению разработанных в диссертации моделей, методов и алгоритмов на предприятиях, выпускающих продукцию и эксплуатирующих конструкции из многослойных биметаллических листовых материалов.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СРЕДСТВ УЛУЧШЕНИЯ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВО ПРОДУКЦИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Повышение эффективности управления промышленными предприятиями за счет совершенствования технологий контроля качества выпускаемой продукции и используемого оборудования

Задачи повышения эффективности деятельности промышленных предприятий должны решаться с использованием современных методов, алгоритмов и механизмов. Поиск идей, средств и методов повышения эффективности функционирования промышленных предприятий и организаций осуществляется уже в течение многих десятилетий. Руководители предприятий и организаций, а также ученые и специалисты, разрабатывающие подобные исследования, на сегодняшний день имеют в своем активе множество научных работ и методических разработок на эту тему.

К наиболее значимым работам в этой области относятся труды знаменитого Анри Файоля [102] и его современников, Норберта Винера [18], Стаффорда Бира [10], а также более поздних, но тоже весьма известных авторов – Р. Акоффа [2], Г. Минцберга [70], Д. Аакера [1], Дж. Шелдрейка [106], Р. Коха [51], В.Н. Буркова [11, 12, 95], Д.А. Новикова [11, 12, 72, 95], О.В. Логиновского [57, 58, 59, 69, 101] и других [21, 23, 87, 105].

Рассматривая конгломерат научных трудов, посвященных вопросам совершенствования концептуальных подходов, методов, моделей и технологий управления промышленными предприятиями, можно констатировать, что на сегодняшний день наиболее используемыми и эффективными средствами из них остаются следующие [101]:

- установление стратегических приоритетов компании на определенные периоды времени;
- комплексный анализ динамики работы промышленного предприятия на основе сравнения определенных показателей с аналогичными результатами работы предприятий-конкурентов в соответствующей сфере производственной деятельности;
- оценка воздействия внешних факторов на производственную деятельность предприятия и ее сравнение с влиянием внутренних факторов;
- повышение адаптации предприятия при изменении внешних условий функционирования;
- построение современной, гибкой организационной структуры предприятия, внедрение актуальных методов управления персоналом и др.;
- согласование развития производственной логистики с динамикой рынков готовой продукции;
- обеспечение подготовки и принятия управленческих решений на основе создания и внедрения собственных информационных систем управления, в том числе систем стратегического и оперативного управления, а также механизмов контроля в составе специальных программных средств;
- учет интересов различных заинтересованных сторон при управлении проектами в сфере деятельности предприятия [22];
- сбалансированное технологическое развитие промышленных предприятий [111].

К перечисленным подходам необходимо добавить также методы и механизмы умного управления [11, 101], которые способны кардинально изменить отношение работников к своей деятельности. В первую очередь, благодаря внедрению принципов умного управления, сотрудники начинают бережно расходовать ресурсы, что означает не только экономию материалов, но и более осознанное использование времени и усилий, и в конечном итоге приводит к повышению общей продуктивности.

Кроме того, механизмы умного управления способствуют эффективному использованию оборудования. С помощью современных технологий можно проводить мониторинг состояния оборудования в реальном времени. Это позволяет не только избежать простоев, но и своевременно проводить профилактическое обслуживание, что значительно увеличивает срок службы машин и механизмов.

Также стоит отметить, что внедрение методов умного управления формирует у работников стремление применять более эффективные средства производства. В условиях постоянного технологического прогресса, компании, использующие такие подходы, получают доступ к передовым технологиям и инновациям, что в свою очередь, способствует повышению конкурентоспособности на рынке.

Помимо этого, важным аспектом является внедрение методов и технологий анализа и обработки информации с применением современной информационно-компьютерной техники. Такие технологии позволяют быстро и точно обрабатывать большие объемы данных, что способствует более обоснованному принятию управленческих решений. Это ведет к улучшению планирования и прогнозирования, а также к повышению общей эффективности бизнеса.

Механизмы умного управления можно условно разделить на несколько ключевых групп, каждая из которых имеет свои особенности и предназначение.

К первой группе отнесем неманипулируемые механизмы, или «механизмы честной игры», обеспечивающие отсутствие искажений информации, правдивое отражение работниками результатов своей деятельности. Работники должны иметь выгодные условия для того, чтобы сообщать честные данные о своих потребностях в ресурсах, а также о реальных задачах и достижениях. Ключевое требование к таким механизмам заключается в том, что решения, принимаемые на основе честной информации, не должны негативно сказываться на самих работниках, её сообщающих.

Во вторую группу объединим советующие механизмы, обеспечивающие выработку рекомендаций для лиц, принимающих решения (ЛПР). Для советующих механизмов существует несколько способов реализации, в том числе через

группы экспертов, либо автоматизированные экспертные системы. Советующие механизмы пассивного типа предоставляют релевантную информацию, необходимую ЛПР для принятия решения, но при этом не несут ответственности за эффективность своих рекомендаций. Активные советчики, в свою очередь, сравнивают эффективность своих советов с фактическими решениями ЛПР, что позволяет создать систему стимулирования, основанную на результатах.

Следующая группа включает согласованные механизмы. Эти механизмы способствуют воспитанию ответственности у исполнителей. При их использовании работникам становится выгодно выполнять принятые обязательства и честно отражать результаты своего труда. Невыполнение плана или искажение информации в данном случае приносит меньшую прибыль.

Наконец, развивающие механизмы играют важную роль в стимулировании роста и развития предприятий за счет снижения издержек и внедрения инноваций. Эти механизмы позволяют организациям адаптироваться к изменяющимся условиям рынка и повышать свою конкурентоспособность. Для успешной реализации развивающих механизмов необходимо учитывать как внутренние факторы, так и внешнюю среду, что требует комплексного подхода к управлению.

Таким образом, каждая из описанных групп механизмов умного управления имеет свои уникальные особенности и функции. В совокупности они обеспечивают эффективное управление ресурсами, способствуют честности и ответственности на всех уровнях, а также стимулируют развитие организаций, что важно для достижения высоких результатов в условиях современного бизнеса.

Глубокий и всесторонний анализ существующих проблем и «узких» мест, которые негативно сказываются на эффективности деятельности компании, является первоочередной задачей руководителей промышленного предприятия. Этот процесс включает в себя не только выявление недостатков, но и понимание их причин, что требует тщательной работы – необходимо проанализировать состав и особенности управления основными факторами производства, которые являются основой функционирования предприятия.

Кроме того, следует обратить внимание на структуру управления, методы и технологии, применяемые в организации; изучить и дать оценку организационной структуре, системы контроля, а также подходов к управлению, которые могут варьироваться от традиционных до современных. После выполнения такого комплексного анализа руководитель имеет возможность увидеть не только отдельные проблемы, но и их взаимосвязь, что является ключевым для понимания общей картины функционирования компании.

В результате проведенной работы руководство может сделать обоснованные выводы о целесообразности различных изменений – структурных, технологических, экономических, организационно-управленческих и др. На основе полученных данных формируется четкое видение будущего предприятия для разработки концепции стратегического развития, которая должна учитывать как внутренние, так и внешние факторы – изменения в экономике, технологическое развитие и тенденции в управлении. Таким образом, качественный анализ существующих проблем становится неотъемлемой частью процесса стратегического планирования и развития предприятия в целом [111].

Однако для предприятий, связанных с производством и использованием листовых биметаллических материалов, помимо перечисленных средств и методов повышения эффективности крайне важно рассмотреть вопросы совершенствования технологий оценки качества продукции и работоспособности технологического оборудования [34, 49].

Биметаллические материалы требуют строгого контроля на каждом этапе производственного процесса, поскольку качество соединения и обработки металлов существенно влияет на их механические и физико-химические свойства [13, 86, 97].

Совершенствование технологий оценки качества включает в себя разработку и внедрение комплексных систем контроля, которые учитывают не только физико-механические свойства биметаллических листов, но и их эксплуатационные характеристики. Основой подобных систем является применение неразрушающих

методов контроля, позволяющих выявлять скрытые дефекты на ранних стадиях производства [4, 71], а также использование актуальных цифровых технологий при проведении вычислительных экспериментов для исследования поведения цифровых двойников объектов контроля с применением современных программных продуктов, в том числе с открытым исходным кодом [6, 36, 44].

Кроме того, необходимо уделить внимание систематическому анализу работоспособности технологического оборудования. Регулярные проверки и техническое обслуживание станков и машин обеспечивают стабильность производственного процесса, а также позволяют отслеживать состояние оборудования в реальном времени, что существенно снижает риск поломок и аварий [14, 16, 32].

Обоснование целесообразности внедрения системы контроля качества, базирующейся на современных технологиях, должно быть основано на применении комплексных методов многокритериального выбора среди альтернативных вариантов, которые описываются большим числом количественных и качественных характеристик различной степени значимости [49, 60].

Не менее важным аспектом является создание обратной связи между производственными процессами и отделом качества на основе интеграции системы выявления дефектов продукции с комплексной информационной системой предприятия. Это позволит оперативно реагировать на выявленные проблемы и вносить изменения в технологические процессы, что, в свою очередь, способствует улучшению качества конечной продукции. Оптимизация процессов и внедрение новых технологий помогут значительно снизить производственные затраты, а также увеличить конкурентоспособность компании на рынке [148, 150].

Дальнейшее совершенствование информационных систем для поддержки процессов оценки качества биметаллических листовых материалов с использованием тепловых методов неразрушающего контроля возможно за счет использования методов искусственного интеллекта для классификации дефектов по изображениям термограмм в реальном времени. Автоматизация процессов контроля качества путем внедрения систем машинного зрения и анализа данных на основе

искусственного интеллекта может значительно ускорить процесс обнаружения дефектов и снизить влияние человеческого фактора [117, 118]. Такие системы могут обучаться на больших объемах данных, что позволяет им с высокой точностью прогнозировать возможные проблемы и предлагать пути их решения.

Обоснованное внедрение инновационных методов контроля, основанных на использовании современных цифровых технологий, играет значительную роль в повышении эффективности и качества промышленных процессов. Для повышения эффективности функционирования предприятий, работающих с биметаллическими материалами, необходимо применять актуальные подходы, средства и механизмы, включая создание методов и алгоритмов подготовки и принятия решений руководителями предприятий по основному направлению их деятельности, разработку современных информационных систем управления, а также развитие новых, перспективных технологий оценки качества продукции. При этом важно не только внедрять современные методы контроля и диагностики, но и постоянно совершенствовать технологии выявления возможных дефектов, обеспечивая тем самым высокое качество продукции и надежность эксплуатируемого оборудования.

1.2. Расширение сферы использования биметаллических листовых материалов как одного из основных средств повышения эффективности работы предприятий в различных отраслях промышленности

Многослойные биметаллические материалы широко используются на многих современных предприятиях, а также в сфере эксплуатации разнообразных изделий. Их применение позволяет существенно снизить расходы на производство и обслуживание произведенных на их основе конструкций, изделий, бытовой продукции. Подобная экономия достигается за счет уменьшения использования дорогостоящих материалов со специальными свойствами, повышенной коррозионной стойкости конструкций, снижения веса, повышения прочностных характеристик и эксплуатационных свойств изделий [86, 90, 92, 93].

Биметаллом принято называть материал из двух или более слоев металлов или сплавов, прочно соединенных по всей поверхности в монолитную композицию, сохраняющуюся при технологической обработке или эксплуатации [24].

Сортамент выпускаемых промышленностью слоистых композиционных металлических материалов по аналогии с обычным прокатом можно разбить на следующие основные группы.

Биметаллические материалы выпускаются в следующих видах (рисунок 1):

- листовой прокат (листы толстые (толщиной более 4 мм) и тонкие (толщиной не более 4 мм), ленты, полосы);
- сортовой прокат (в виде простых и фасонных профилей общего и специального назначения);
- трубы (круглого поперечного сечения и профильные);
- специальные профили (электротехнические, инструментальные, периодические, для теплообменной аппаратуры и др.) [9, 13].

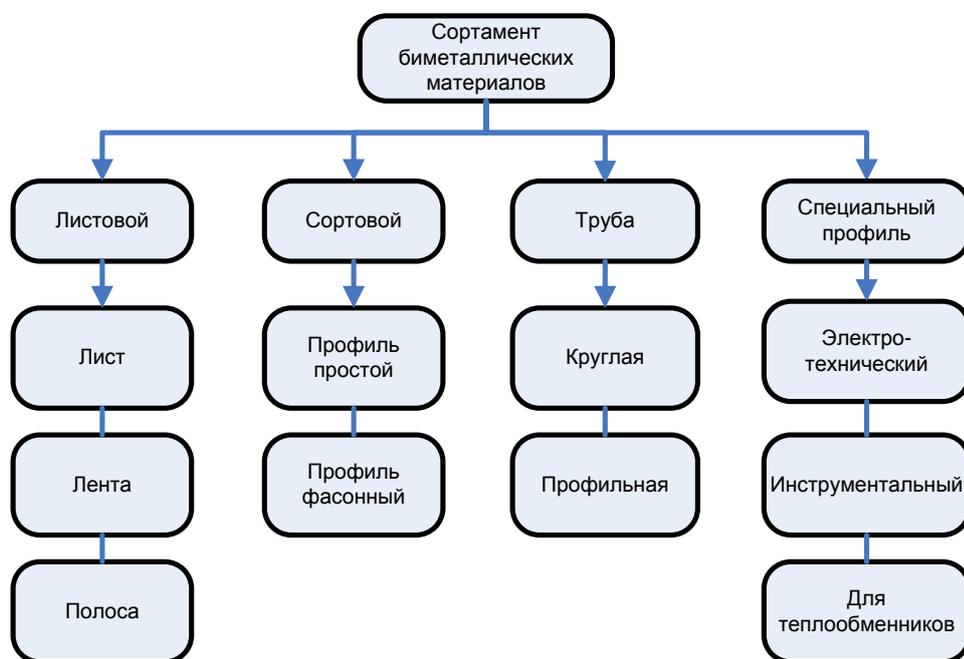


Рисунок 1 – Сортамент биметаллических материалов  
(составлено автором на основе анализа литературы)

В двухслойных биметаллических материалах различают основной и плакирующий слой. Основной слой несет нагрузку, обеспечивает конструктивную прочность, стойкость при ударных нагрузках, технологичность при гибке, штамповке, вытяжке, хорошую свариваемость и высокую теплопроводность и другие свойства. Выбор материала для основного слоя определяется конкретными условиями эксплуатации аппаратуры или изделий из биметаллических листов: температурой, рабочим давлением, ударными нагрузками и т.д. Плакирующий слой является рабочим (находится в контакте с агрессивной средой и обеспечивает требуемые специальные свойства – износостойкость, коррозионную стойкость, твёрдость и т.п.) [86].

По назначению слоистые композиты подразделяют на коррозионно-стойкие, износостойкие, антифрикционные, электротехнические (проводниковые и контактные), инструментальные, термобиметаллы, для глубокой вытяжки, для теплообменной аппаратуры, для строительных конструкций, для бытовых изделий (рисунок 2, таблица 1).



Рисунок 2 – Классификация биметаллических материалов по назначению  
(составлено автором на основе анализа литературы)

Таблица 1 – Использование биметаллических листовых материалов (составлено на основе анализа литературы [9, 13, 54, 64, 86])

Вид материала	Сфера использования	Виды продукции и оборудования
1) коррозионно-стойкие – экономия дефицитных и дорогостоящих легирующих элементов, цветных и драгоценных металлов		
<p>листы шириной от 1500 до 1800–8000 мм и толщиной 2–100 мм; углеродистые или малолегированные стали, с плакирующим слоем из нержавеющей ферритных или аустенитных сталей;</p> <p>листы и ленты из алюминиевого сплава АМЦ, плакированного силумином, шириной до 1300 мм и общей толщиной 0,8–10,0 мм;</p> <p>листы из дюралюмина, плакированного коррозионностойким слоем алюминия толщиной 3–5 мм, шириной до 1000 мм и длиной до 2200 мм</p>	нефтяное машиностроение	реакторы отгонки бензина из сырой нефти, для рафинирования, смесители, теплообменники, испарители и др.
	сельскохозяйственное машиностроение	машины для подготовки и внесения в почву твердых и жидких минеральных удобрений и химических средств защиты растений; детали и узлы сельскохозяйственных машин (плуги, бороны и др.)
	судостроение	цистерны, опреснители, детали корпусных установок
	целлюлозно-бумажная промышленность	варочные котлы, смесители бумажной массы, резервуары
	металлургия	электролизные ванны для производства алюминия
	легкая, пищевая промышленность, предприятия сферы обслуживания	оборудование молочных заводов, резервуары для брожения, перегонные кубовые установки, барабанные сушилки
2) износостойкие, инструментальные – увеличение срока службы изделий, самозатачивание режущих инструментов		
ленты, листы из низкоуглеродистой стали с плакирующим слоем из износостойких инструментальных и карбидных сталей (например, 6ХС, 65Г, 85ХФ, 3Х5ВФ, Х12М и др.)	машиностроение, сельскохозяйственное машиностроение, сфера обслуживания	режущий инструмент, режущие узлы почвообрабатывающих машин
	машиностроение, транспорт	фрикционные и тормозные устройства различных машин

Окончание таблицы 1

Вид материала	Сфера использования	Виды продукции и оборудования
3) антифрикционные – экономия дорогостоящего антифрикционного материала, обеспечение прочности		
ленты с основным слоем из низкоуглеродистой или коррозионностойкой сталей и плакирующим слоем из меди, латуни, алюминия, бронзы и др.	машиностроение, авиа- и судостроение	детали подшипников скольжения – втулки, упорные кольца, сферические опоры и др.
4) электротехнические – экономия дорогостоящих проводниковых материалов, высокая электропроводность и прочность, снижение массы		
рулонные ленты из стали, с покрытием из меди, алюминия, титана, никеля	электротехника, электроника	корпуса химических источников тока; аноды электровакуумных приборов, теплоизмерители, экраны и т.п.
5) термобиметаллы – использование материалов с различными коэффициентами линейного расширения для изготовления элементов автоматического управления		
полосы и ленты толщиной 0,1–2,5 мм	электроника, машиностроение, бытовая техника и др.	чувствительные элементы тепловых приборов, автоматические регуляторы температуры, компенсаторы, сигнальные устройства и т.п.
6) биметаллы для глубокой вытяжки – обеспечение высокой прочности, пластичности, теплопроводности		
ленты из стали с плакирующим слоем из латуни, меди, никеля и др.	машиностроение, производство бытовых изделий и др.	различные узлы и механизмы машин, аппаратов и конструкций
7) биметаллы для бытовых изделий – производство бытовых предметов и изделий с высокой коррозионной стойкостью, гигиеничностью, эстетичностью		
листы, ленты с различным количеством слоев из стали, меди, алюминия и др.	сфера обслуживания, пищевая промышленность, производство бытовых изделий и др.	детали стиральных и посудомоечных машин, емкости для приготовления пищи с тепло-распределительным слоем, консервная тара, кухонная и столовая посуда, электроприборы, детали отделки автомобилей, дизайнерские и ювелирные изделия, монеты, бижутерия, значки, памятные медали, фурнитура и т.д.

Слоистые металлические композиты известны человеку уже много столетий: из них делали украшения; оружие и различные инструменты. В конце XIX – начале XX в. биметаллы стали производить промышленными методами: биметаллические провода, двухслойные листы и трубы, термобиметаллы применялись в ряде отраслей экономически развитых стран Европы и США.

Один из первых промышленных биметаллов – сталемедная проволока, применявшаяся вместо медной в слаботочных цепях (телефонных, телеграфных, сигнальных и т.п.). Такую проволоку в конце XIX в. изготавливали в США, Франции и Германии.

В Советском Союзе промышленное производство биметаллов впервые было освоено на заводах им. С. Орджоникидзе (г. Кольчугино), «Красный Выборжец» (г. Ленинград) и «Серп и молот» (г. Москва), где также было налажено производство сталемедной проволоки. Одновременно развивалось и производство биметаллических листов и лент (сталь + алюминий, сталь + томпак, дюралюмин, плакированный чистым алюминием и др.). По заказу радиотехнической промышленности было освоено производство биметаллической ленты и проволоки сталь + никель [86].

В настоящее время производителями различных видов биметаллической продукции в нашей стране являются ОАО «Фольгопрокатный завод» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Нытва» (Нытвенский металлургический завод), АО «Уральская фольга» (Михайловский завод по обработке цветных металлов), ОАО «Все-российский институт лёгких сплавов», ОАО «Северсталь-Метиз» [13].

Емкости из коррозионностойкой стали с теплораспределительным слоем производят ПАО «Ашинский метзавод», ООО «ВСМПО-Посуда» (завод в Верхней Салде Свердловской обл.), АО «Кукморский завод Металлопосуды», АО «НМП» (завод «Нева Металл Посуда» в Санкт-Петербурге) [28, 86].

Основная задача при получении слоистых композиционных материалов – образование неразъемного, прочного и плотного соединения составляющих.

Разработано много различных способов изготовления слоистых композитов для сферы услуг и производства, каждый из которых обладает определенными преимуществами и имеет свои недостатки, поэтому они не исключают, а взаимно дополняют друг друга. Знание особенностей и свойств каждого из них позволяет определить наиболее эффективный способ для производства конкретной металлопродукции, а в дальнейшем оптимальный эксплуатационный режим и регламент ремонтных работ, обеспечивающих требуемое качество и высокие эксплуатационные показатели.

Способы и технологии производства слоистых композитов во многом определяются сочетанием соединяемых металлов. По характеру их взаимодействия в зоне контакта слоев можно выделить следующие три большие группы (таблица 2).  
Таблица 2 – Соединение слоев биметаллических материалов (составлено на основе анализа литературы [9, 24, 64, 86])

Взаимодействие металлов в зоне контакта слоев	Виды соединений
сочетания металлов, образующие соединения с ограниченной или полной взаимной нерастворимостью	сочетания медь + железо, медь + серебро и др., обладающие незначительной взаимной растворимостью; серебро + железо, молибден + серебро и др., нерастворимые в твердом состоянии; медь + вольфрам, железо + свинец и др., нерастворимые в жидком состоянии
металлы с хорошей взаимной растворимостью и образующие твердые растворы	железо + никель, молибден + вольфрам, углеродистая сталь + коррозионно-стойкая сталь и др.
металлы, образующие химические и интерметаллидные соединения	железо + титан, железо + алюминий, титан + медь, железо + цирконий и др.

В зависимости от характера процессов, протекающих на границе раздела металлов при их соединении С.А. Голованенко [24] различает пять основных групп способов получения металлических композитов:

1) соединение компонентов при их совместной горячей пластической деформации (пакетный способ);

2) соединение компонентов при их совместной холодной пластической деформации (пакетный способ);

3) соединение компонентов в результате взаимодействия расплавленного металла с твердым, т.е. в процессе кристаллизации одного металла на подложке другого с последующей горячей прокаткой (литейный метод);

4) соединение металлов в результате метания одного металла на другой продуктами детонации взрывчатого вещества (взрывной способ);

5) соединение металлов путем последовательного нанесения плакирующего слоя электродуговой наплавкой.

Авторы [86] предлагают следующую классификацию способов получения биметаллов:

1) металлургические способы, основанные на получении соединения при взаимодействии расплава металла с твёрдым компонентом (в том числе создание накладных покрытий с помощью пайки, склеивания по периметру).

2) термомеханические способы (прокатка, прессование, волочение), основанные на получении соединения в процессе макропластической деформации металлов в твёрдом состоянии.

3) термодиффузионные способы, основанные на соединении материалов в твёрдом состоянии, при малых пластических деформациях.

4) физико-химические и термомеханические способы, заключающиеся в нанесении покрытий из окружающей среды на плакируемый металл (электрохимическое напыление, высаживание из металлических расплавов).

5) способы, использующие импульсные нагрузки, основанные на высокоскоростном соударении твёрдых металлов (сварка взрывом, магнитно-индукционная сварка).

К главным задачам в области производства и применения слоистых композитов относят расширение сортамента и повышение их качества (увеличение прочности соединения слоев, снижение разнотолщинности, улучшение качества поверхности, стабилизацию механических свойств и структуры и т.д.), а также дальнейшее расширение областей их применения в различных отраслях хозяйства.

### 1.3. Анализ существующих подходов к выявлению дефектов многослойных биметаллических листовых материалов

К характеристикам качества многослойных биметаллических материалов относятся сплошность соединения слоев с достаточной прочностью, коррозионная стойкость, прочность при работе в условиях статического и динамического нагружения, работоспособность при повышенных и циклически изменяющихся температурах и давлениях, сохранение заданных геометрических параметров, физико-химических свойств и структуры [35].

Дефекты биметаллических соединений можно условно разделить на следующие группы (рисунок 3):

1) дефекты эксплуатации – деформацию и разрушение материала под воздействием статических и динамических нагрузок, коррозионное растрескивание;

2) дефекты материала – несоответствие химического состава материалов слоев, несовершенства кристаллической структуры, межкристаллитную коррозию, структурные включения в материале;

3) дефекты отделки поверхности – отклонения от заданных значений шероховатости, отклонения от плоскостности, загрязнения, поры, трещины и проколы поверхностного слоя;

4) дефекты изготовления – отклонение толщины слоев, дефекты соединения слоев (непровары, расслоения, изменение свойств зоны соединения).

Причины возникновения дефектов в изделиях из биметаллов можно условно разделить на две взаимосвязанные группы: особенности строения композиционных материалов и условия их функционирования.

При соединении разнородных металлов неизбежно различие физико-механических свойств материалов разных слоев – прочностных и пластических свойств, теплоемкости и теплопроводности, коэффициентов термического линейного расширения, что может вызвать появление неравномерных внутренних напряжений на границах слоев и привести к нарушению их сплошности (расслоению).



Рисунок 3 – Дефекты соединений биметаллических материалов  
(составлено автором на основе анализа литературы)

Миграция углерода из основного в плакирующий слой снижает его коррозионную стойкость и в целом ослабляет прочность соединения слоёв. Зона соединения слоёв обладает более низкой пластичностью, что также может служить причиной появления трещин и расслоений.

Вторая группа причин напрямую связана с целями создания подобных материалов – обеспечением возможности работы в тяжелых условиях. Под влиянием статических или динамических механических нагрузок, перепадов температур, воздействия агрессивных сред в деталях и оборудовании из многослойных биметаллических материалов возникают внутренние напряжения, которые могут привести к нарушению связи слоёв или локальному разрушению материала отдельного слоя. При изготовлении биметаллических конструкций методами обработки давлением (гибка, вальцовка, штамповка и др.) возникает коробление, образование складок и гофр, а также разрывов и расслоений на готовых изделиях.

Появление воздушных пузырей между слоями металлов (расслоение) является одним из распространенных видов дефектов слоистых металлов и часто считается решающим фактором в вопросе использования многослойного материала в конструкциях. Расслоения могут возникать в местах концентрации напряжений, в зонах скачкообразного изменения толщины материала из-за несовершенств технологии производства композита, при воздействии эксплуатационных нагрузок или при дальнейшей обработке [94, 104].

При нарушении сплошности сцепления слоев происходит разрушение композита, так как нарушается механизм послойного распределения нагрузки, каждый слой материала работает самостоятельно, и конструкционные свойства биметалла изменяются [24]. Многослойный композиционный материал не является монолитным в отличие от металлов, входящих в его состав. Поэтому расслоения внутри биметаллического материала, а также нарушения целостности отдельных слоёв могут достаточно быстро привести к частичному или полному хрупкому разрушению детали в процессе эксплуатации [86].

Важно понимать, что дефекты внутри биметаллического материала представляют собой довольно большую опасность, так как могут привести к увеличению затрат на производство и расходов на эксплуатацию разнообразных конструкций и изделий. Поэтому для повышения надежности и долговечности работы машин и других изделий, изготавливаемых из биметаллов, необходимо проводить непрерывный контроль их качества.

Оценка качества многослойных биметаллических материалов производится с использованием различных подходов, методов и технологий. Объем и методы испытаний биметаллических материалов и изделий из них обычно нормируются соответствующими стандартами [26, 28, 64]. Виды, методы и цель испытаний, контролируемые свойства и выявляемые при помощи различных методов дефекты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Способы выявления дефектов биметаллических листовых материалов  
(составлено на основе анализа литературы [26, 28, 64, 71, 86]).

Типы	Методы	Контролируемые свойства, выявляемые дефекты
Разрушающие (на образцах материала или отдельных изделиях из партии)		
Механические испытания	статическое и динамическое нагружение на различных режимах; испытания на изгиб, срез, скручивание, растяжение, отрыв и пр.	прочность и пластичность слоев и композиции, влияние плакирующих слоев на сопротивление деформации и разрушение материала; сопротивление переменным нагрузкам (усталость); ползучесть; качество и прочность соединения слоев; непосредственное измерение толщины слоев образца
Физико-химические исследования	локальный микрорентгеноспектральный анализ	определение количества и характера распределения элементов в переходной зоне биметалла
Термические	нагревание и охлаждение	сопротивление переменным термическим нагрузкам (на термическую усталость)
Физическое металловедение	оптическая металлография, измерение твердости, электронная микрофотография, рентгеноструктурный анализ, индукционная структуроскопия, адсорбционная микрорентгенография и др.	число, форма, размеры зерен металла, взаимное расположение и свойства фаз и т.п.; кристаллическая структура; тип, концентрация и распределение дефектов решетки; толщина плакирующего слоя
Химические исследования	весовой и объемный методы оценки коррозии; спектральный анализ	общая коррозионная стойкость, межкристаллитная коррозия, склонность к коррозионному растрескиванию; (скорость растворения металла слоя); анализ состава переходного слоя
Неразрушающие (выборочный и сплошной контроль)		
Ультразвуковой	эхо-импульсный, эхо-зеркальный, эхо-сквозной, теневой, когерентный и др.	выявление дефектов в виде неоднородностей металла – трещины, расслоения, различные включения, непровары, и др.

## Окончание таблицы 3

Типы	Методы	Контролируемые свойства, выявляемые дефекты
Электромагнитный	индукционный, магнитографический, феррозондовый, метод вихревых токов и др.	толщина лакирующего слоя, структура, механические свойства материала слоев, зоны их соединения и композита в целом,
Капиллярный	яркостный, цветной, люминесцентный и др.	поверхностные дефекты – трещины, поры и др.
Радиационный	радиографический, радиометрический, томографический и др.	поверхностные и скрытые дефекты – непровары, трещины, поры, нарушения структуры и др.
Акустический	импедансный, велосимметрический, свободных колебаний, акустико-топографический и др.	подповерхностные дефекты – расслоения, трещины, непровары и др. (площадью от 7 мм <sup>2</sup> , глубиной от 100 мкм)
Оптический	метод прошедшего излучения, рассеянного излучения, поляриза-ционный, спекл-интерферометрия и др.	поверхностные дефекты (трещины, задиры и пр.), геометрические отклонения (размеры, плоскостность и др.)
Тепловой	активный, пассивный	подповерхностные дефекты – трещины, непровары, расслоения, поры, раковины, неоднородности и пр.; теплофизические характеристики материалов; толщина слоев материала, глубина за-легания дефектов и др.

Результаты проведенного анализа позволяют понять, что в целом ряде технологических процессов многих промышленных предприятий широко используются методы повышения качества выпускаемой продукции за счет современных средств мониторинга параметров изделий. На сегодняшний день подобный мониторинг осуществляется либо с помощью уже довольно устаревших методов разрушающего контроля (когда о качестве партии изделий судят по результатам проверки отдельных ее образцов), либо с применением более современных методов

неразрушающего контроля (ультразвуковой, радиационный, вихретоковый, тепловой, магнитный и др.). Методы неразрушающего контроля, основанные на использовании физических свойств материалов и процессов, хорошо известны и признаны эффективными [71].

Анализ практического использования перечисленных методов показал, что вихретоковый и ультразвуковой методы требуют применения дорогостоящего оборудования, которое может эксплуатироваться лишь аттестованными, высококвалифицированными специалистами; радиационный метод, хотя и обеспечивает бесконтактный контроль, тем не менее не слишком хорош с использованием, так как связан с опасным излучением, которое наносит вред операторам; одним из наименее затратных и наиболее перспективных является тепловой метод, который осуществляется бесконтактным способом и позволяет получить изображение большого участка поверхности или изделия в целом [85]. Кроме того, данным методом можно проводить проверку всей партии изделий, в том числе непосредственно в ходе технологического процесса. Устройства для проведения теплового контроля более компактны, существенно ниже по стоимости, чем оборудование для других методов, а также позволяют передавать изображение контролируемых изделий непосредственно на компьютер, в том числе по беспроводной связи [14, 39].

Следует отметить, что применение методов ультразвукового контроля для тонколистовых биметаллических материалов менее эффективно, поскольку подобные материалы имеют неоднородную структуру, их слои отличаются по химическому составу, механическим и физическим свойствам, что влияет на стабильность акустических свойств и приводит к погрешностям измерения координат дефектов [4].

При этом важно понимать, что ни один из существующих методов неразрушающего контроля не дает абсолютной точности оценки. Кроме того, каждый из них имеет различные критерии. Лишь использование адекватной комбинации ме-

тодов позволяет приблизиться к результату, с высокой степенью достоверности оценивающему реальное состояние объекта контроля.

При производстве бытовых изделий применение методов неразрушающего контроля серьезно увеличивает себестоимость изделий. Это связано с высокой стоимостью оборудования и необходимостью привлечения аттестованных специалистов при низкой опасности обследуемых объектов. В связи с этим можно констатировать, что методы теплового контроля по сравнению со всеми иными упомянутыми методами являются наиболее выигрышными, как в плане производительности, мобильности, безопасности, возможности автоматизации и т.п., так и в плане минимизации капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а соответственно, и сроков окупаемости.

Стоит учитывать, что методы теплового контроля можно применять не только на металлургических предприятиях, выпускающих продукцию из многослойных биметаллических материалов, но и на производствах различного профиля, где используется оборудование и изделия из этих материалов (химических, машиностроительных, судостроительных, нефтеперерабатывающих и пр.).

#### 1.4. Анализ существующих систем на основе теплового неразрушающего контроля

Тепловой (тепловизионный) контроль – это метод дистанционной регистрации, визуализации и анализа тепловых (температурных) полей объектов [29]. Температура как количественный показатель внутренней энергии является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, преобразование, передача, накопление и использование энергии в ее различных формах [14, 71]. Температура поверхности объекта изменяется под влиянием теплофизических, геометрических характеристик и параметров нагрузки. Внутренняя структура объекта также влияет на характер теплового излучения. Особенности и дефекты структуры вызывают появление аномальных температурных зон на поверхности объекта, анализ которых

позволяет судить о наличии изменений в материале в целом или на отдельных участках (рисунок 4).

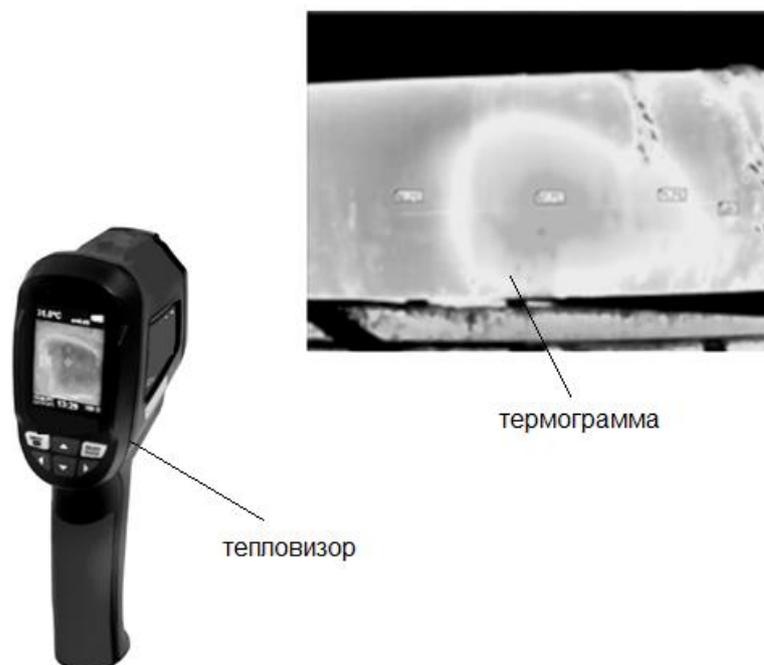


Рисунок 4 – Принцип выявления аномальных температурных зон при проведении неразрушающего теплового контроля (составлено автором)

Тепловой контроль позволяет выявить различные виды дефектов: трещины, расслоения в местах сварки или склейки, поры, пустоты и раковины, нарушения изоляции, наличие посторонних включений и примесей [20, 65, 79, 83, 99].

Интерес к активному тепловому контролю растет с середины 90-х гг. XX века, благодаря появлению на рынке тепловизионных устройств нового поколения (неохлаждаемые портативные тепловизоры), мощных импульсных нагревателей, термографических систем, а также росту возможностей компьютерных систем, позволяющих в реальном времени обрабатывать изображения и применять для анализа теплового состояния методы решения обратных задач математической физики [7, 16, 25, 103].

В отличие от ультразвукового, тепловой контроль можно применять как для стационарных, так и для движущихся объектов, находящихся в различном тепловом состоянии, в различных условиях среды (температура, давление, влажность).

Современное тепловизионное оборудование позволяет проводить измерения бесконтактно и дистанционно, без строгих требований к точности взаимного расположения по отношению к объекту контроля. При этом новые модели тепловизоров имеют малые габариты и вес, экологически безопасны в использовании и обслуживании, не требуют охлаждения и стоят дешевле ультразвуковых дефектоскопов при сравнимых функциональных возможностях. Несмотря на то, что погрешность измерения температуры тепловизором достигает 2% (в лучшем случае 1%), гораздо более важной характеристикой является их высокая чувствительность, позволяющая регистрировать тепловые аномалии, свидетельствующие о наличии дефектов [15, 17, 126, 127, 140].

Опыт исследований и практического применения теплового контроля показывает его пригодность для контроля изделий из металлов, пластмасс и полимеров, биметаллов и композитных материалов с различными формами и качеством поверхности [82, 115, 125, 131, 134, 135, 137]. Можно проводить контроль объектов без вывода их из эксплуатации или производственного процесса, используя при этом собственное тепловое излучение объекта или внешний источник тепловой стимуляции. По признаку источника теплового нагружения различают активный и пассивный тепловой контроль [30]. Если дефекты поглощают или выделяют тепловую энергию, их можно выявить в пассивном режиме. Чтобы обнаружить дефекты в материалах, имеющих температуру, близкую к температуре окружающей среды, перед проведением измерений их необходимо нагреть (или охладить). Такой режим называют активным контролем. При этом нужно правильно подобрать время и мощность теплового воздействия, поскольку температура поверхности образца довольно быстро выравнивается.

Пассивный контроль применяют при измерении параметров теплового режима объекта, а также для обнаружения отклонений от заданной формы и геомет-

рических размеров объектов контроля. В активном режиме выявляют дефекты нарушения сплошности в объектах контроля (расслоения, трещины, инородные включения, поры и др.), а также изменения их в структуре и физико-химических свойствах (теплопроводность, теплоемкость, коэффициент излучения).

Тепловой метод неразрушающего контроля применяется в настоящее время при обследовании металлических изделий, строительных материалов, теплоизоляционных и огнеупорных слоев, авиационной техники, энергетического и электрооборудования, в том числе на опасных объектах, и во многих других областях (таблица 4).

Таблица 4 – Применение активного и пассивного теплового контроля (составлено автором на основе анализа литературы [16, 17, 37, 39, 71, 150, 151])

Область	Контролируемые свойства и дефекты	
	Активный контроль	Пассивный контроль
Авиакосмическая индустрия	Оценка наличия влаги, дефекты структуры сотовых панелей, клеевых соединений, защитных покрытий	Аэродинамический эксперимент, контроль теплового режима бортовой радиоэлектронной аппаратуры
Микроэлектроника	Лазерный контроль качества пайки, сварки, дефекты теплоотводов	Тепловая диагностика радиоэлектронной аппаратуры, больших интегральных схем, контроль технологических процессов
Лазерная техника	Контроль термических напряжений в лазерных кристаллах, световой прочности элементов силовой оптики	Анализ тепловых режимов активных элементов мощных лазеров
Нефтехимическая промышленность	Термографический контроль уровня жидкостей в резервуарах	Контроль реакторных колонн и энергоагрегатов, обнаружение утечек из продуктопроводов

Продолжение таблицы 4

Область	Выявляемые дефекты	
	Активный контроль	Пассивный контроль
Транспорт	Тепловая дефектоскопия шин, упрочняющих покрытий, качества закалки и термоупрочнения	Обнаружение перегрева букс, дефектов контактных сетей, изоляторов, тепловая диагностика электрооборудования подвижного состава
Металлургия	Контроль теплофизических характеристик конструкционных материалов	Измерение температуры расплавов, тепловизионная диагностика футеровки, контроль горячего проката, нагрева печей
Машиностроение	Дефектоскопия антикоррозионных покрытий, обнаружение мест подповерхностного расслоения	Контроль тепловых режимов узлов машин и механизмов, обнаружение аварийно- и пожароопасных мест на промышленных объектах
Строительство	Контроль теплопроводности строительных материалов, защитных ограждений, обнаружение пустот, промоин	Обнаружение утечек тепла в зданиях, тепловизионный контроль качества кровли, ограждающих конструкций
Энергетика	Тепловизионный контроль статоров, защитных покрытий, термоизоляции; дефектоскопия тепловыделяющих элементов атомных реакторов	Тепловая диагностика турбин, дымовых труб, энергоагрегатов, контактных сетей, теплоизоляции
Агропромышленный комплекс	Контроль теплофизических характеристик продуктов, дефектоскопия деталей сельхозтехники	Контроль тепловых режимов теплиц и ферм, состояния животных, температуры зерна в элеваторах

Окончание таблицы 4

Область	Выявляемые дефекты	
	Активный контроль	Пассивный контроль
Медицина	–	Бесконтактная термометрия, оценка состояния кровеносных сосудов, выявление онкологических, дерматологических заболеваний

Помимо выбора режима, также важно, как расположены устройства для нагрева и измерения температуры относительно контролируемого образца. При активном контроле нагрев и измерение производится, как правило, с одной и той же стороны. Такую процедуру называют *односторонней*, или «контролем на отражение». Для тонких образцов можно выполнять нагрев с одной стороны, а снятие значений температуры – с другой. В этом случае процедуру называют *двухсторонней*, или «контролем на прохождение». Возможно также использование внутреннего источника нагрева.

В настоящее время техническая диагностика с использованием методов теплового неразрушающего контроля относится к высокотехнологичным прикладным исследованиям. Указанные методы характеризуются высокой производительностью, относительной простотой фиксации и накопления результатов, их информативностью, безопасностью обслуживания применяемой измерительной аппаратуры и т.п. [17].

Применение методов теплового контроля закреплено национальными стандартами для обследования теплопотерь в зданиях и сооружениях [27, 67, 98], а также для контроля и диагностики узлов машин и механизмов [31, 32]. Разработаны отраслевые методические рекомендации по термографическому обследованию металлических пролетных строений автодорожных мостов [74].

Использование тепловизоров при проведении теплового контроля для получения информации в графическом виде, а также возможность формирования тер-

мограмм по набору значений температуры в определенных точках поверхности объекта открывает возможности для применения методов компьютерного зрения и машинного обучения для автоматического анализа результатов контроля [117, 118]. Однако для обучения нейронных сетей необходимо накопление большого объема данных и проведение предварительной разметки изображений термограмм, свидетельствующих о наличии того или иного дефекта, с привлечением квалифицированных специалистов. Изучение тепловых процессов в объекте контроля, прогнозирование их развития, формирование термограмм целесообразно выполнять на основе математического моделирования процессов теплопередачи.

#### 1.5. Обзор математических моделей для исследования теплового состояния многослойных пластин

Полученные в ходе теплового контроля термограммы позволяют определить величину и характер дислокации температурных отклонений над аномальным участком. Однако для интерпретации этих данных необходимо понимать, каким будет температурное поле при наличии того или иного дефекта. В этой связи большое значение приобретает моделирование тепловых процессов, протекающих во время проведения контрольно-измерительных процедур в исследуемом объекте контроля.

Для одного и того же объекта или процесса может быть составлено некоторое множество математических моделей, отличающихся числом учитываемых факторов, принятых допущений, полнотой и точностью описания состояния объекта или условий протекания процесса. Одно из главных требований к модели состоит в необходимости учета всех основных факторов и взаимосвязей, существенно влияющих на рассматриваемый процесс, и исключения второстепенных факторов и связей. Набор факторов определяется достижением цели проводимого исследования, при этом всегда стремятся к упрощению модели для удобства работы с ней и снижения затрат вычислительного времени при ее практическом

применении. При этом простые модели должны быть адекватными поставленной цели и должны быть теоретически обоснованы.

Для исследования теплового состояния многослойной пластины разрабатывается математическая модель в виде системы линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают распределение теплового поля в материале с переменными теплофизическими характеристиками (ТФХ) под влиянием условий контакта между слоями пластины, воздействия источников теплового нагружения и условий окружающей среды [45, 62, 112, 116].

В общем случае нестационарный перенос тепла теплопроводностью описывается уравнением Фурье-Кирхгофа [40, 61]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T) \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $x, y, z$  – координаты, м;  $Q_w(x, y, z, t, T)$  – мощность внутренних источников тепловыделения, Вт/м<sup>3</sup>.

На практике используются стационарные и нестационарные (динамические), линейные и нелинейные, одномерные и многомерные модели. Математические модели теплообмена в сложных технических системах строятся с использованием комбинации моделей теплообмена в отдельных элементах системы. Разбиение системы на элементы (с точки зрения математического моделирования) определяется как способом внешнего воздействия, так и конструктивным исполнением системы [5].

Для однозначного определения модели теплового состояния необходимо описать ряд характеристик объекта и процесса теплообмена. К характеристикам объекта относятся его форма и геометрические размеры, а также теплофизические характеристики материала (ТФХ).

При решении краевой задачи теплопроводности важным является правильное задание начальных и граничных условий, а также характеристик внешних ис-

точников тепла. Для моделируемого объекта иногда приходится учитывать влияние внутренних источников тепла. По характеру действия источники бывают точечные, линейные, плоские и объемные, мгновенного или непрерывного действия, постоянные или переменные во времени, а также подвижные и неподвижные. Чаще всего из условий однозначности требуется определить характеристики теплового состояния, что относится к прямым задачам теплопроводности. Для выявления дефектов внутренней структуры мы анализируем появление аномальной температурной зоны на поверхности тела и по ним оцениваем параметры размеров дефекта, в этом случае решается обратная задача теплопроводности [78].

Большинство моделей теплопроводности твердых тел базируется на дифференциальном уравнении теплопроводности параболического типа различной размерности, в декартовых, цилиндрических или сферических координатах [14, 78, 112].

Большое количество аналитических решений одномерных задач нагрева (охлаждения) неограниченной пластины для расчета температур в бездефектных областях можно найти в классической литературе по теории теплопроводности [40, 42, 61, 78].

Одномерные модели используют при разработке систем теплозащиты, основываясь на недопустимости большой глубины прогрева теплозащитной конструкции при взаимодействии с внешней средой [5]. Хорошо систематизированы классические решения для однослойной пластины в различных условиях нагрева (равномерно-распределенным тепловым потоком в виде непрерывного стационарного потока, прямоугольного теплового импульса, мгновенного импульса Дирака, а также тепловых волн) [14, 78]. При переходе к многослойным объектам применяют принцип суперпозиции [5, 78].

Запись граничных условий (ГУ) зависит от применяемой методики теплового контроля. В общем случае при неадиабатическом теплообмене на нагреваемой поверхности объекта контроля имеет место смешанное граничное условие II и III рода, которое выражает условие баланса трех потоков на поверхности изделия:

потока нагрева, потока, уходящего в глубину объекта за счет теплопроводности, и потока теплообмена с окружающей средой за счет конвекции и излучения. При отсутствии теплообмена на поверхности (мощность потока конвекции и излучения много меньше падающего на поверхность теплового потока) условия приближаются к адиабатическим. Такие условия возникают при активном тепловом контроле с импульсным нагревом и малыми временами наблюдения [14].

В многослойных объектах при переходе через границу слоев выполняются граничные условия IV рода – условия неразрывности теплового потока и температуры на границе слоев [14]:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}; \quad T_i = T_{i+1} \quad (2)$$

Задача усложняется при моделировании многослойных объектов с дефектами расслоения – плоскими воздушными промежутками между слоями. Теплопередача в таких дефектах в общем случае происходит путем теплопроводности, конвекции и излучения. Однако анализ составляющих теплового потока, проведенный в [14] показывает, что в тонких дефектах (до 250 мкм) мощность потока теплопроводности существенно превышает величину потоков конвекции и излучения, тогда как с ростом толщины дефекта при его размерах 5–25 мм в нем может развиваться конвекция (при сохранении низкой мощности потока излучения). Излучение становится существенным при разнице температур между границами дефекта более 500° С.

На границах раздела слоев рассматривают два типа ГУ. Дополнительные условия неразрывности (ГУ IV рода) формулируют при прохождении границы дефекта и основного материала. При этом распределение температуры зависит, в том числе, от теплоемкости слоя, поэтому такие дефекты называют емкостными. Если теплоемкостью дефектного слоя ( $i+1$ ) толщиной  $l_{i+1}$  можно пренебречь, то его основной характеристикой становится тепловое сопротивление  $R_{i+1}$ , и соответствующие дефекты называют резистивными. На границах резистивных дефек-

тов температура изменяется скачкообразно, а тепловой поток остается неразрывным [14]:

$$T_{i+1} - T_i = R_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}; R_{i+1} = \frac{l_{i+1}}{\lambda_{i+1}} \quad (3)$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \quad (4)$$

Рассмотренные зависимости и допущения реализованы в модели односторонней процедуры теплового контроля трехслойной пластины при нагреве импульсом Дирака [119]. Модель отличается тем, что внутренний слой поочередно рассматривается как слой с идеальным контактом либо как резистивный дефект между двумя слоями. Пренебрежение теплоотдачей на наружных поверхностях пластины позволяет авторам получить аналитическое решение, пригодное для дальнейшего использования в обратных задачах тепловой дефектометрии.

Трехслойная одномерная модель неограниченной пластины в неадиабатических условиях предложена в [14] для решения различных задач теплового контроля (многослойное изделие, покрытие на подложке и др.). В данной модели средний слой поочередно рассматривается либо как емкостный дефект, либо в качестве связующего материала. Модель основана на одномерном дифференциальном уравнении теплопроводности параболического типа. Граничные условия учитывают теплоотдачу на нагреваемой и обратной поверхности пластины и неразрывность тепловых потоков и температуры на границах слоев. Авторы приводят достаточно сложное аналитическое решение задачи нагрева объекта и отмечают, что расчет подобных задач для неадиабатических пластин с числом слоев более трех в аналитическом виде теоретически возможен, но практически весьма трудоемок вследствие громоздкости результатов преобразований, и в этом случае чаще применяют численные методы. При этом аналитические модели можно использовать для оценки точности численных решений в дефектных областях, для которых классические решения [40, 78] не применяют.

Также отмечено, что при наличии в теле нескольких тепловых барьеров (зон контакта различных материалов и дефектов), односторонним методом теплового контроля удастся исследовать не более 2–3 барьеров, наиболее близко расположенных к поверхности нагрева. Для выявления глубоко залегающих дефектов предложено применять двухстороннюю процедуру теплового контроля (расположение источника нагрева и регистрирующих устройств с разных сторон контролируемого объекта), и соответствующим образом модифицировать математическую модель.

При использовании одномерных моделей для решения задач дефектометрии можно определить глубину залегания дефекта и величину его раскрытия («толщину»), но невозможно определить поперечные размеры (протяженность). Многомерные модели позволяют учитывать рассеяние тепла в материале объекта вокруг дефектов и более корректно определять температурный сигнал над дефектом. При исследовании двумерной модели объекта с дисковидным дефектом для различных материалов [150, 151] определены критические значения отношения радиуса дефекта к глубине залегания, для которых амплитуда сигнала достигает возможного максимума.

При переходе от одномерной постановки задачи к двумерной усложняются уравнения, описывающие процессы внутри материала. В качестве примера можно привести моделирование процессов активного ТК для определения дефектов в многослойных пластинах из углепластика. В первой части [129] представлена одномерная модель многослойной пластины с дефектами, для которой предложено аналитическое решение. Во второй части [130] выполнен переход к двумерной модели и используется численное решение обратной задачи тепловой дефектометрии (определение размеров и глубины залегания дефекта) с точностью порядка 10%.

В зависимости от анализируемой задачи дифференциальное уравнение теплопроводности может быть записано в декартовых, цилиндрических или сфериче-

ских координатах. Разнообразные примеры двумерных и трехмерных моделей для различных объектов ТК приведены в [14, 112, 150].

Для одномерного и двумерного моделирования нагрева многослойных адиабатических пластин разработан метод «теплового четырехполюсника» [120, 147], согласно которому решения уравнения теплопроводности выражаются в виде линейных матричных связей между векторами температуры и тепловых потоков на границах многослойной системы, что позволяет получить решения, структура которых не зависит от граничных условий. С применением метода четырехполюсника разработана двумерная модель сочетания дефектов, расположенных один над другим в различных слоях углепластика [121]. Показано, что сигнал от двух тонких дефектов ведет себя иным образом, нежели сигнал от одного дефекта двойной толщины. Суммарное температурное распределение  $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau)$  над группой малоразмерных дефектов может быть представлено как суперпозиция сигналов от каждого дефекта, как в пространстве, так и во времени:

$$\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau) = \Sigma \Delta T_i(x, y, \tau) \quad (5).$$

Обобщенная трехмерная модель теплового неразрушающего контроля многослойных объектов с неоднородностями предложена для оценки потерь в ограждающих конструкциях, обнаружения дефектов в металлопрокате в ходе технологического процесса, диагностики состояния изоляционного покрытия, швов и стенок труб [39]. Модель основана на нестационарном уравнении теплопроводности в декартовых координатах и учитывает возможность присутствия внутреннего объемного источника тепла. Дефекты моделируются при помощи условий неидеального теплового контакта. Полученные зависимости применяются для расчета значений теоретических температур. Авторами данного способа разработан также метод решения обратной задачи для определения теплопроводности слоев материала контролируемого объекта и параметров геометрии дефектов [98].

Модели для многослойных пластин с дефектами расслоения весьма разнообразны, но при этом существуют общие подходы к их разработке. Набор факторов, ограничений и допущений определяется главным образом целью проводимо-

го исследования, при этом всегда стремятся к упрощению модели для удобства ее практического применения.

### 1.6. Анализ методов решения задач теплопередачи

Процесс распространения тепла в пластине описывается дифференциальными уравнениями, математическая модель процесса включает уравнение и краевые условия, образуя таким образом краевую задачу. Для решения краевых задач теплопередачи применяют аналитические и численные методы [52, 112]. При использовании аналитических методов решение представляется в виде функции, что позволяет проанализировать, как исходные параметры влияют на результат. Точные аналитические методы предполагают получение решения в виде элементарных или специальных алгебраических функций. При применении приближенных аналитических методов выполняется предварительное упрощение, разбиение или преобразование исходной постановки задачи.

Недостатком точных аналитических методов является их малая универсальность. Они применяются в основном к линейным краевым задачам, так как для них выполнение начального условия связано с построением линейной суперпозиции частных решений и в результате получаются решения в виде бесконечного ряда. Этот ряд для малых величин времени плохо сходится. Эти решения мало пригодны для практических приложений, и особенно в случаях, если они используются в качестве промежуточной стадии при получении решения каких-либо других задач (термоупругости, автоматического управления, обратных задач и др.).

Важным преимуществом приближенных аналитических методов является универсальность. Они могут быть применены для нелинейных задач, с переменными свойствами среды, с меняющимися во времени краевыми условиями, с источниками теплоты и др. В данном случае решение находится в виде ряда, ограниченного по числу его членов. При значительном увеличении числа членов ряда выполнение исходного уравнения краевой задачи приводится к решению степенного уравнения (определяющего собственные числа), степень которого зависит от

количества приближений. Решение уравнений высокой степени представляет большие трудности. К тому же, удовлетворение начальных условий связано с решением систем алгебраических уравнений. В связи с чем, число приближений может быть ограниченным.

При решении линейных задач теплопроводности в многослойных объектах применяют метод разделения переменных (метод Фурье), методы преобразования Лапласа, метод источников (метод функций Грина), вариационный метод Ритца, метод Бубнова–Галёркина, комбинированные методы [6, 52].

Решение нелинейных задач теплопереноса в аналитической форме часто сопряжено с большими математическими трудностями и не всегда возможно. В таких ситуациях применяют численные методы на основе сеточной аппроксимации исследуемого объекта – метод конечных разностей (МКР), методы конечных элементов (МКЭ) и граничных элементов (МГЭ). Они предполагают замену исходных дифференциальных уравнений алгебраическими за счет дискретизации объекта моделирования. К недостаткам численных методов относят необходимость решения больших систем линейных алгебраических уравнений, представление решения в виде таблицы чисел для определенного набора исходных данных и возникновение погрешности расчетов, оценка которой часто является более сложной задачей, чем нахождение основного решения [41, 53, 100]

Выбор численного метода для решения той или иной задачи делают исходя из ее постановки. Как правило, на алгоритм численного решения накладываются требования по точности, трудоемкости алгоритма, времени сходимости.

Для линейных систем дифференциальных уравнений (обыкновенных и в частных производных) для тел простейших форм используют метод прогонки. Выбор шаблона разностной схемы не влияет на трудоемкость алгоритма, но может значительно повысить точность решения, особенно для систем обыкновенных дифференциальных уравнений [53].

Для уравнений в частных производных изоморфных тел или тел, теплофизические свойства которых незначительно отличаются от направления, используют схемы расщепления [100].

В системах для неоднородных материалов, например, многослойных, в которых теплофизические свойства слоев сильно различаются, принято применять методы конечных элементов, метод разбиения с взвешенными невязками, вариационные методы и др. Можно варьировать шаг сетки в зависимости от материала слоя [8].

Для сложных форм конструкций часто используется метод взвешенных невязок, с помощью которых «сшиваются» подсистемы уравнений отдельных частей конструкции. Минимизация невязок позволяет свести к минимуму ошибку найденного решения. Метод часто используется совместно с методом расщепления сетки, в котором осуществляется сгущение или разрежение сетки на стыке элементов конструкции. Последний метод применим для стыкуемых элементов сходных форм, в которых одна часть плавно переходит в другую.

Нелинейные системы дифференциальных уравнений, как правило, не имеют точного решения. Для их вычисления используются приближенные методы: методы минимизации или оптимизации. Для систем с заданной функцией минимизации или с заданной областью экстремума проще всего применить метод итераций (последовательных приближений), который часто применяют совместно с методом расщепления по переменным.

Можно использовать неравномерные сетки, линии которых являются линиями уровня поля распределения температур. Этот метод позволяет уменьшить размер матриц и объем вычисления, сохраняя заданную точность, т.к. убирает «лишние» линии сетки. Метод часто применяется для систем с большими градиентами температур, например, для моделирования процессов лазерной обработки материалов [8, 53].

Идея метода конечных разностей (или метода сеток) известна довольно давно. Этот метод считается относительно простым, поскольку не требует гро-

моздких математических вычислений. Практическое применение МКР с появлением быстродействующих компьютерных систем существенно расширилось, поскольку большой объем рутинных вычислений, связанных с размерностью получаемых систем алгебраических уравнений, в настоящее время требует минимальных временных затрат. Метод является эффективным при решении различных задач математической физики, в том числе расчета электромагнитных и тепловых полей [8, 53].

Метод конечных элементов (МКЭ) был разработан в 1930–1940 гг., но широкое распространение он получил после появления современных программных и аппаратных средств. В настоящее время МКЭ применяется в качестве общего средства изучения задач в частных производных при проектировании машин и механизмов, тепловых и электрических двигателей, сложных технических устройств и др. Использование МКЭ в составе современных программных средств повысило его доступность, применимость для задач с произвольной формой области решения [38].

Различные явления, происходящие в непрерывных средах, описываются одними и теми же уравнениями в частных производных. Например, двумерное уравнение Пуассона моделирует теплопроводность в непрерывном режиме, электростатические и магнитостатические процессы. Поэтому один и тот же программный пакет на основе МКЭ может служить для решения сходных задач, происходящих из различных дисциплин (рисунок 5).

Архитектура, составленная из нескольких программных модулей, предполагает, что все звенья одного и того же уровня (например, программы ввода) могут сообщить результаты своей обработки всем звеньям следующего уровня (например, программам расчета).

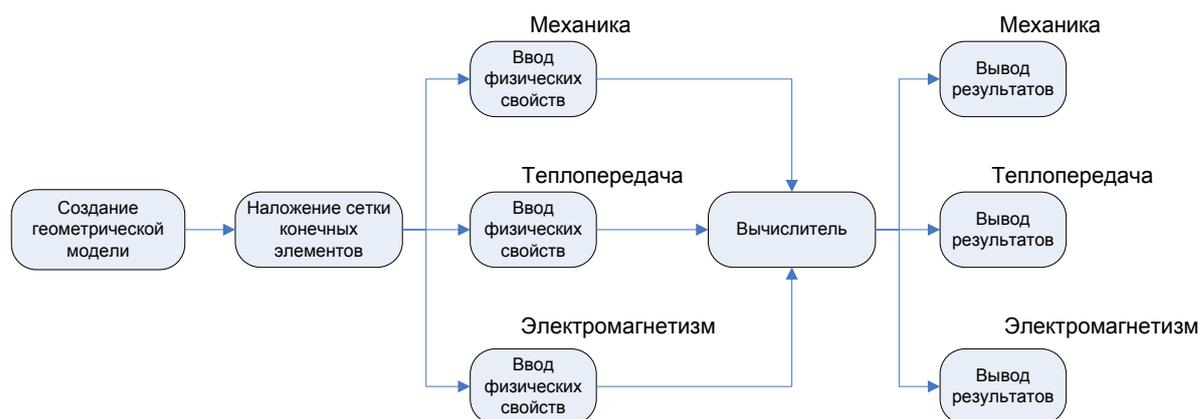


Рисунок 5 – Схема обработки связанных задач методом конечных элементов  
(составлено автором)

Для ускорения и повышения точности расчетов алгоритмы, основанные на применении методов конечных разностей и конечных элементов, реализуют при помощи компьютерных программ для математических расчетов.

### 1.7. Обзор современных программных продуктов для моделирования процессов теплопередачи

В ходе исследования и проектирования процессов и систем активного теплового контроля разрабатываются сложные математические модели теплового состояния, для реализации которых применяют современные средства компьютерного моделирования. Проведенный в пп. 1.5 и 1.6 анализ моделей и методов решения задач теплопроводности показал, что при выборе программных продуктов для моделирования теплового состояния многослойных пластин необходимо учитывать следующие основные требования:

1) возможность проведения расчетов по математической модели аналитическими или численными методами на основе линейных или дифференциальных уравнений с учетом теплофизических характеристик материалов и граничных условий различной степени сложности;

2) расчет двумерного и/или трехмерного температурного поля;

3) визуализация результатов температурного поля в виде графиков и/или модельных термограмм;

4) обработка и анализ температурного поля с натурной или модельной термограммы для целей дефектоскопии (решение обратной тепловой задачи).

Для моделирования широко используются системы класса САЕ (computer-aided engineering), которые позволяют задать параметры модели различного уровня сложности и исследовать характеристики температурных полей. Рассмотрим доступные программные средства для расчета тепловых процессов с акцентом на возможностях свободно распространяемого ПО.

Для выполнения математических расчетов аналитическими и численными методами применяют проприетарные программные пакеты MATLAB [112, 133, 149], MathCAD [138], Maple [132], Mathematica [152] и др.

Среди свободно распространяемых пакетов с аналогичными функциями можно выделить GNU Octave ([www.gnu.org/software/octave](http://www.gnu.org/software/octave)), который по своим возможностям является наиболее полным аналогом MATLAB [3, 124].

Также широко используется научный программный пакет для численных расчетов Scilab ([www.scilab.org](http://www.scilab.org)) с открытым исходным кодом, включающий сотни математических функций, сложные структуры данных (списки, рациональные функции, полиномы, линейные системы) с возможностью интерактивного добавления программных модулей на разных языках (C, C++, Fortran) [143].

Среди альтернатив проприетарному ПО можно также отметить систему компьютерной алгебры Sage ([www.sagemath.org](http://www.sagemath.org)), которая включает алгебру, комбинаторику, вычислительную математику и математический анализ [141].

По известным результатам сравнения функциональности и быстродействия перечисленных свободно распространяемых пакетов наиболее высокую скорость вычислений и широкий ассортимент функций имеет GNU Octave [144].

В настоящее время известно довольно большое число конечно-элементных пакетов для решения различных задач, как коммерческих, так и свободно распространяемых, в том числе с открытым исходным кодом. Коммерческие программ-

ные продукты более удобны для пользователя, содержат хорошо проработанные, понятные препроцессоры и постпроцессоры.

Среди проприетарного программного обеспечения для моделирования методом конечных элементов наиболее известными продуктами являются ANSYS и COMSOL. Это многофункциональные программные пакеты, позволяющие решать задачи электромагнитного, теплового, гидрогазодинамического и механического анализа, в том числе совмещенные (мультифизические) [33, 44, 89, 142, 146]. Возможности обоих продуктов можно оценить в ходе 14-дневного пробного доступа к полнофункциональной версии.

Также тепловые расчеты можно выполнять в пакетах HeatWave и Thermal Analysis Toolkit (Field Precision LLC) [123], а также KELVIN™ и CELSIUS™ (INTEGRATED Engineering Software) [128].

Бесплатные ограниченные версии программ предоставляют разработчики российского пакета конечно-элементного моделирования ELCUT ([www.elcut.ru](http://www.elcut.ru)) и его европейского аналога QuickField ([www.quickfield.com](http://www.quickfield.com)) [35, 139].

Интерактивная система моделирования двумерных краевых задач методом конечных элементов ELCUT применяется для расчета электрических машин, трансформаторов, магнитных систем, электромеханических устройств, кабелей, конденсаторов, элементов конструкций, систем охлаждения и др. [35]

Список пользователей ELCUT включает множество крупных предприятий, научно-исследовательских организаций и университетов России и зарубежных стран.

ELCUT позволяет решать плоские и осесимметричные задачи электростатики, линейной и нелинейной магнитостатики, магнитного поля переменных токов, растекания токов в проводящем массиве, линейной и нелинейной теплопередачи, анализа упругого напряженного состояния, а также совмещенные задачи. В связанной задаче, в дополнение к источникам (нагрузкам), перенесенным из другой задачи, могут быть заданы прочие источники, как в обычной задаче.

Возможно совмещение разных типов связи в одной задаче. Например, после расчета растекания токов, электростатических и магнитных полей в разных задачах, использующих один и тот же файл геометрии модели, можно рассчитать распределение температуры, вызванное джоулевыми потерями, а затем – механические напряжения, вызванные действием температурных деформаций, электростатической и магнитной силой одновременно [139].

Облачная платформа моделирования SimScale ([www.simscale.com](http://www.simscale.com)) предоставляет доступ к инструментам моделирования через браузер без использования специального оборудования. Модуль теплопередачи позволяет вычислять распределение температуры и тепловой поток в твердых телах при тепловых нагрузках для стационарных и переходных процессов. Геометрическая модель загружается из САД-системы, при этом SimScale поддерживает форматы широко распространенных САПР (Autodesk Inventor, CATIA, SolidWorks и др.) [145].

Помимо пакетов САЕ общего применения для моделирования процессов ТК разработано специализированное программное обеспечение, в частности «Multilayer-3D», «ThermoCalc-2D», «ThermoCalc-6L» Томского политехнического университета [14]. В программе «ThermoCalc-2D» реализовано численное решение задачи нагрева трехслойной пластины с дисковидным дефектом (двумерная модель в цилиндрических координатах), а в программе «ThermoCalc-6L» можно исследовать процесс нагрева трехслойного параллелепипеда с дефектами аналогичной формы (трехмерная модель в декартовых координатах) [122, 151].

Среди свободно распространяемых программных продуктов для расчетов на основе МКЭ весьма широкими возможностями обладает вычислительный пакет Agros2D ([www.agros2d.org](http://www.agros2d.org)), разработанный в Университете Западной Богемии (Чехия) [113]. Данный программный комплекс разработан для численного решения двумерных связанных задач в технических дисциплинах. Модули комплексной предобработки и постобработки задач имеют удобный интерфейс, включающий редактор для построения геометрических моделей и ввода данных, генераторы сеток, таблицы слабых форм для дифференциальных уравнений и инструмен-

ты оценки результатов, построения графиков и карт. Процессор основан на библиотеке Hermes2D, содержащей самые современные численные алгоритмы для монолитного и полностью адаптивного решения систем нелинейных и нестационарных дифференциальных уравнений (PDE) на основе метода конечных элементов повышенного порядка точности. Программный продукт разработан на языке C++ и свободно распространяется по лицензии GNU General Public License v2.1.

Agros2D разработан с целью создания универсального инструмента для решения различных типов дифференциальных уравнений. Поэтому ядро программы написано в общем виде, без зависимости от свойств отдельных физических полей. Все данные, связанные с полями, хранятся в отдельных XML-файлах. Такая система упрощает создание новых модулей, поскольку код не нужно менять, необходимо только создать новый XML-файл.

На данный момент Agros2D способен решать задачи в следующих областях: акустика, поле электрического тока, анализ напряженно-деформированного состояния, электростатика, несжимаемые течения, теплопередача, магнитные поля, радиоволны, математические уравнения (уравнения Лапласа, Пуассона, Гельмгольца, волновое уравнение и др.). Помимо перечисленных, Agros2D позволяет решать некоторые виды связанных задач, в частности, электрические токи и теплопередача, магнитные поля и теплопередача, теплопередача и строительная механика. Решение задачи для указанных полей может быть найдено для различных режимов – стационарные состояния, переходные процессы, гармонические поля. В процессе решения могут также учитываться нелинейные свойства материала.

При решении нестационарных задач большой интерес обычно уделяется пространственной дискретизации и попыткам минимизировать ее погрешность при разумных вычислительных затратах. Не менее важно попытаться минимизировать количество шагов по времени, поскольку общее время вычислений пропорционально ему. Обычная стратегия решения переходных задач заключается в дискретизации уравнения в пространстве, его решении и, следовательно, получении системы обыкновенных дифференциальных уравнений во времени, которую

затем можно обрабатывать отдельно с помощью стандартных инструментов для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. В Agros2D вместо этого используется метод Рунге и вначале выполняется дискретизация по времени, поскольку сетка может быть разной на каждом временном шаге из-за возможной адаптивности пространства.

Для дискретизации производной по времени применяется обратный дифференциальный метод (BDF). После дискретизации по времени выполняется пространственная дискретизация, как для стационарной задачи. Единственное отличие заключается в предоставлении значений решений с  $n$  предыдущих временных шагов, спроецированных на текущую сетку, что становится возможным, благодаря использованию библиотеки Hermes [136].

Таким образом, многие существующие программные продукты могут быть применены для решения задач моделирования процессов теплового контроля в ходе оценки качества выпускаемой продукции и технологического оборудования из биметаллических листовых материалов. Интеграция существующих и вновь разрабатываемых программных модулей в составе информационных систем поддержки процессов оценки качества подобных изделий позволяет существенно сократить затраты на подготовку и обработку данных, многократно задействовать разработанные модели в различных экспериментах. Развитие указанных информационных систем основано на использовании алгоритмов методов конечных разностей и конечных элементов, с оптимальным построением сеточных моделей для анализа объектов со сложной геометрией, неровностями поверхности, мало-размерными дефектами, с возможностью ручного или автоматического изменения шага по времени, а также автоматизации расчетов за счет разработки дополнительных программных модулей.

## Выводы по главе 1

Представленный в Главе 1 диссертационной работы анализ используемых на практике подходов, методов и моделей повышения эффективности управления промышленными предприятиями, показал следующее:

1. Существующие подходы, механизмы и средства управления промышленными предприятиями, производящими и использующими листовые биметаллические материалы, на сегодняшний день следует признать не вполне соответствующими достигнутому уровню управленческих методов, алгоритмов и технологий. Последние нуждаются в адекватном улучшении и модернизации или создании новых, оригинальных концепций и разработок. Для повышения эффективности функционирования предприятий, работающих с биметаллическими материалами, необходимо применять актуальные подходы, средства и механизмы, включая создание методов и алгоритмов подготовки и принятия решений руководителями предприятий по основному направлению их деятельности, разработку современных информационных систем управления, а также развитие новых, перспективных технологий оценки качества продукции.

2. Дальнейшее повышение эффективности работы предприятий, выпускающих и использующих биметаллические листовые материалы, вряд ли удастся осуществить без совершенствования подходов к выявлению дефектов многослойных биметаллических материалов и систем контроля; математических моделей теплового состояния многослойных материалов при наличии дефектов соединения слоев; методов решения задач теплопроводности, применяемых для их реализации, и программных средств, используемых для автоматизации данных процессов.

3. При разработке обновленных подходов, моделей и алгоритмов совершенствования управления промышленными предприятиями, выпускающими продукцию и осуществляющими эксплуатацию технологического оборудования из биметаллических материалов, следует учитывать особенности процесса контроля мно-

гослойного биметаллического материала с дефектами соединения слоев, в том числе при разработке математической модели, а также соответствующих методов расчета и программных средств для ее реализации.

Таким образом, формирование комплексной структуры системы выявления и оценки дефектов и обоснование ее внедрения для совершенствования управления предприятием, является актуальной проблемой, в соответствии с которой сформулирована цель и основные задачи диссертационного исследования, представленные во введении.

## ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ, ВЫПУСКАЮЩИМИ И ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЛИСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Концептуальные положения по формированию системы выявления и оценки дефектов многослойных биметаллических листовых материалов методами теплового неразрушающего контроля

Как было показано в Главе 1, многие современные промышленные предприятия в РФ, выпускающие продукцию или использующие различные конструкции из многослойных биметаллических материалов, применяют для оценки их качества во многом устаревшие методы разрушающего контроля. Представленный в диссертационной работе метод теплового неразрушающего контроля в этой связи представляется гораздо более выигрышным, как в плане производительности, мобильности, безопасности, возможности автоматизации и т.п., так и в плане минимизации капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а соответственно, и сроков окупаемости.

Как известно [102], классический цикл управления включает в себя планирование, организацию, контроль и анализ. При этом на всех этапах должен поддерживаться необходимый уровень информирования руководителей предприятия в целом и его подразделений [72, 101].

Разработанный в диссертации обновленный подход к повышению эффективности управления промышленными предприятиями, выпускающими продукцию или использующими различные конструкции из многослойных биметаллических материалов, нацелен на совершенствование каждого из указанных этапов управленческого цикла (рисунок 6).

В частности, на этапе планирования предлагается дополнить комплекс процедур планирования технического обслуживания и ремонта технологического оборудования из биметаллических листовых материалов информацией о выяв-

ленных дефектах для его заблаговременного вывода в ремонт или проведению внепланового технического обслуживания.



Рисунок 6 – Направления совершенствования управления предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы посредством обоснованного внедрения системы выявления дефектов методом теплового контроля

На этапе организации контроля качества выпускаемой продукции из биметаллических материалов рекомендуется реорганизовать технологический процесс посредством внедрения методов теплового неразрушающего контроля.

Этап контроля реализации управленческих решений должен быть дополнен механизмом комплексной оценки разработанной системы выявления дефектов, а также механизмом согласования для выработки согласованного распределения финансовых ресурсов при принятии решения о внедрении указанной системы. Данные механизмы реализуются в алгоритме выбора варианта системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов, раскрытом в п. 2.2.

Этап анализа результатов производственной деятельности необходимо также дополнить процедурами анализа накапливаемых данных по выявленным де-

фектам для установления причин их возникновения и принятия необходимых решений по снижению уровня брака выпускаемой продукции.

Предполагается, что на всех этапах поддерживается достаточный уровень информирования специалистов руководящего звена о выявленных дефектах выпускаемой продукции и технологического оборудования для координации производственного процесса и отслеживания графика выполнения производственного плана.

Учитывая вышеизложенное, современное решение задачи контроля качества выпускаемой продукции и оборудования из многослойных биметаллических материалов должно базироваться на развитой информационной системе выявления дефектов.

Система выявления дефектов, базирующаяся на использовании методов теплового неразрушающего контроля должна реализовывать следующие основные функции:

- 1) обеспечивать заданный режим нагрева (или охлаждения) объекта контроля до определенной температуры, позволяющий достичь пригодного для регистрации температурного сигнала;
- 2) измерять и регистрировать температурное поле объекта (температуру и координаты точек поверхности объекта контроля);
- 3) по характеристикам температурного поля (амплитуде, форме и изменению во времени температурных сигналов) определять наличие дефекта и оценивать его параметры;
- 4) обеспечивать накопление и хранение данных проведенных измерений в виде последовательности значений температуры, а также изображений (термограмм) объекта контроля.

Существующие промышленные установки и комплексы теплового контроля многослойных материалов предназначены в основном для обследования неметаллических и комбинированных композитов [17, 34, 39, 71, 97, 150]. При создании системы для мониторинга дефектов биметаллических материалов на базе универ-

сального оборудования необходимо определить требования и описать все компоненты указанной системы.

В состав технического обеспечения должно быть включено описание всех технических средств, необходимых для нормальной работы системы. Математическое обеспечение должно содержать описание математической модели теплового состояния многослойных биметаллических материалов. В составе программного обеспечения должен быть включен весь комплекс программных средств, обеспечивающих функционирование системы. Информационное обеспечение должно представлять собой описание необходимых наборов данных, как нормативного, так и оперативного характера, которые требуются для осуществления процесса выявления дефектов. В состав организационно-методического обеспечения должна быть включена вся инструктивная и организационно-распорядительная документация, требующаяся для работы системы.

Для нагрева (охлаждения) объекта контроля применяют различные источники теплового нагружения. Для металлических материалов наиболее часто используют оптический нагрев лампами различной мощности или лазером, индукционный нагрев вихревыми токами, пропусканием электрического тока через объект, а также конвекционный нагрев потоками жидкости или газов.

Для проведения измерений нужно подобрать устройство, позволяющее одновременно регистрировать температурное распределение на всей поверхности пластины. Это может быть выполнено при помощи тепловизора.

Расположение источников нагрева и средств измерения относительно объекта контроля влияет на выявляемость дефектов. Наиболее точные результаты дает односторонняя процедура, при которой нагрев и измерение проводятся с одной стороны контролируемого объекта. Двухсторонняя процедура, при которой нагрев производится с одной стороны образца, а измерение температуры – с другой, также пригодна для контроля многослойных биметаллических пластин, поскольку они имеют относительно небольшую толщину и хорошую теплопроводность (рисунок 7).



Рисунок 7 – Способы проведения активного теплового контроля

Полученные в ходе проведения контроля термограммы позволяют выявить участки объекта, различающиеся по температуре. Определить наличие дефекта под аномальным участком и оценить его параметры можно лишь при наличии адекватной математической модели, теоретически описывающей зависимость результатов контроля от свойств объекта и выбранных технологических режимов. Модель должна учитывать особенности контролируемого объекта (форму, геометрические и теплофизические характеристики, способ крепления слоев, возможное расположение и типы дефектов) и применяемого режима теплового контроля [19].

Для получения расчетных значений и обработки экспериментальных данных необходимо также выбрать методы и разработать алгоритмы решения задачи теплового состояния объекта контроля, и на их основе создать специализированное программное обеспечение с применением известных математических пакетов или универсальных языков программирования высокого уровня.

Применение методов теплового неразрушающего контроля на предприятиях регламентируется различными документами по стандартизации и локальными нормативными документами предприятия.

Таким образом, для выполнения требуемых функций формируемая система контроля качества выпускаемой продукции и технологического оборудования должна иметь в составе технические и программные средства, математическое, алгоритмическое и методическое, а также информационное и нормативное обеспечение (рисунок 8).



Рисунок 8 – Состав системы выявления дефектов методом теплового контроля

К техническим средствам относятся тепловизионные системы для регистрации характеристик теплового поля объекта, источник тепловой стимуляции и аппаратные средства компьютерной системы, отвечающей за сбор, обработку и хранение информации. Для создания технического компонента системы мониторинга дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового контроля не требуется какого-либо специализированного оборудования или иных технических средств, кроме набора компьютеров общего назначения с любой со-

временной операционной системой, которые должны быть снабжены дополнительно инфракрасными камерами (тепловизорами) и нагревательными устройствами.

В качестве нагревательных устройств могут быть использованы лампы различной мощности, установки для индукционного и лазерного нагрева, тепловентиляторы [14]. Состав технических средств определяется исходя из особенностей выпускаемой продукции или обследуемого оборудования, условий организации производственного процесса, а также возможностей бюджета предприятия с учетом соотношения затрат и экономической выгоды от внедрения системы.

Важную роль играет алгоритмический компонент системы, интегрирующий методику проведения контроля, математические модели теплового состояния объекта контроля и алгоритмы решения тепловых задач.

Математические модели, входящие в состав математического обеспечения системы, включают теоретическое описание зависимости температурного поля на поверхности объекта, снимаемого тепловизором, от свойств объекта (формы и размеров, теплофизических характеристик материалов и способа крепления слоев, видов дефектов и особенностей их расположения и т.п.) и технологических режимов проведения теплового контроля (мощности и времени воздействия теплового потока нагрева, взаимного расположения нагревателя и тепловизора относительно контролируемого объекта и т.п.) [19, 112].

При создании алгоритмического компонента формируемой системы необходимо выбрать методы и разработать алгоритмы решения задачи теплового состояния объекта контроля. С их помощью не только интерпретируют данные, полученные при фиксации термограмм, но и определяют эффективные условия проведения измерений. Помимо этого, указанные алгоритмы служат основой для разработки специализированного программного обеспечения, интегрируемого в состав системы мониторинга дефектов [53, 75].

Методические рекомендации по проведению процедур теплового контроля включают эффективные условия применения конкретных способов и режимов

контроля, выбора типа источника теплового нагружения, формы и размеров зон тепловой стимуляции и регистрации температуры, взаимного расположения устройств нагрева и измерения температуры.

Программные средства включают стандартное и специальное программное обеспечение, в том числе драйверы технических средств, системные и прикладные программные продукты общего назначения, а также программные пакеты для выполнения расчетов с применением разработанных математических моделей, методов и алгоритмов [36, 50, 136, 142, 151].

Информационное обеспечение должно представлять собой описание необходимых наборов данных, как нормативного, так и оперативного характера, которые требуются для осуществления процесса выявления дефектов.

В состав нормативного и организационного обеспечения входят различные документы по стандартизации и локальные нормативные документы, учитывающие возможности предприятия по выбору тех или иных методов, параметров и режимов теплового неразрушающего контроля [80].

Регламентация работ по контролю качества на конкретном предприятии находит отражение в нормативных документах организаций, учитывающих возможности предприятия по выбору тех или иных методов, параметров и режимов теплового неразрушающего контроля. Разумеется, что локальные нормативные акты разрабатываются с учетом действующих документов национальной системы стандартизации и не могут им противоречить.

Таким образом, формируемая система мониторинга дефектов на предприятии должна обеспечивать не только возможность проведения измерений в оптимальных условиях и представление результатов, но и их программную обработку на основе адекватных математических моделей объекта теплового контроля, методов и алгоритмов решения тепловых задач.

Для обеспечения эффективного функционирования системы для активного ТК исследуемого объекта (рисунок 9) необходимо обеспечить выполнение следующих условий.



Рисунок 9 – Принцип действия системы активного теплового контроля многослойных биметаллических пластин

Система должна позволять осуществлять управление источником теплового нагружения для установления заданного режима нагрева, получение данных температурного поля через определенные промежутки времени, сбор и хранение данных в виде последовательности значений температур или изображений (термограмм), их передачу для обработки специализированной программой.

Накопление и обработка полученной информации о тепловых полях позволит сформировать зависимости, позволяющие по результатам обработки термограмм не только найти дефект, но и определить его тип, параметры, глубину залегания и пр. Для выработки производственных решений стоит обеспечить удобный для восприятия вывод данных, свидетельствующих о наличии дефектов и результатах оценки их параметров.

Формируемая система выявления и оценки дефектов входит органической частью в корпоративную информационную систему (КИС) промышленного предприятия (рисунок 10).

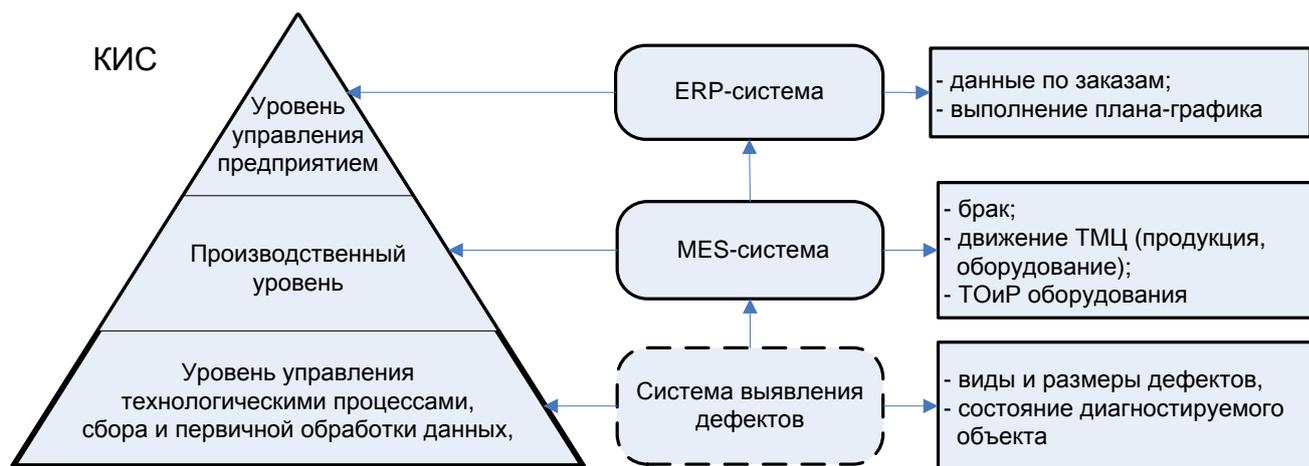


Рисунок 10 – Интеграция системы выявления дефектов и корпоративной информационной системы предприятия

Если представить КИС в виде иерархически организованных уровней, которые охватывают все виды управленческой деятельности на предприятии, то разработанная система будет относиться к уровню управления технологическими процессами, основной задачей которого является сбор и первичная обработка данных – о видах и размерах дефектов, относящихся к определенным диагностируемым объектам (единицам продукции или эксплуатируемого оборудования). Эти данные передаются на следующий уровень, предназначенный для координации и синхронизации производственных процессов. При помощи систем управления производственными процессами (MES – manufacturing execution system) осуществляют учет брака продукции и его движение, а также планирование ремонтных работ и занятость персонала, осуществляющего сервисное обслуживание эксплуатируемого оборудования.

На верхнем уровне – уровне систем управления ресурсами предприятия (ERP – enterprise resource planning) осуществляется управление всеми видами ресурсов компании, а также среднесрочное и долгосрочное планирование деятельности предприятия в целом. Полученные от нижних уровней данные отражаются и учитываются при отслеживании выполнения заказов, плана-графика, расчете себестоимости продукции и др.

Для обеспечения целостности и согласованности данных в системе реализуется обмен информацией с другими модулями КИС (рисунок 11).

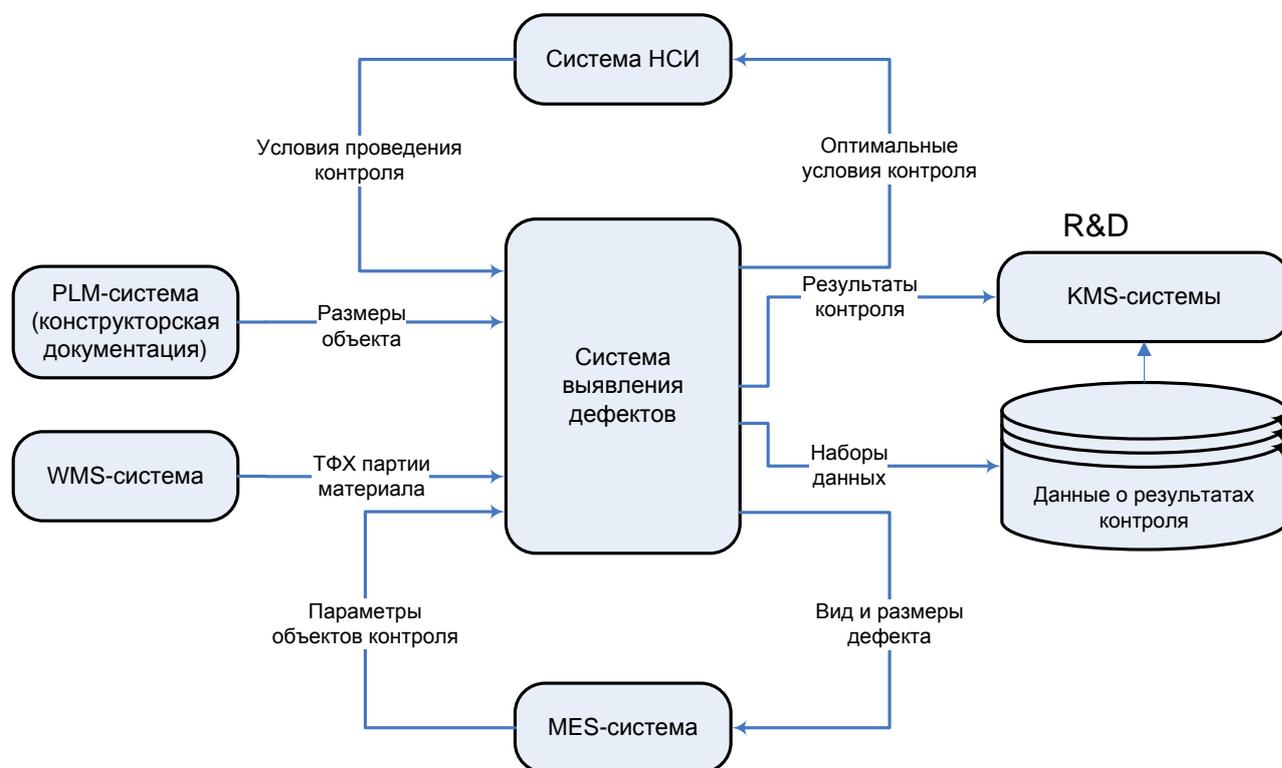


Рисунок 11 – Обмен данными между системой выявления дефектов и компонентами КИС

Всю необходимую информацию для проведения моделирования, расчетов, определения вида дефекта и оптимальных характеристик процесса теплового контроля разработанная система получает от соответствующих модулей КИС. Размеры контролируемых образцов выпускаемой продукции поступают из системы управления жизненным циклом продукции (PLM – product lifecycle management), содержащей актуальную конструкторско-технологическую документацию. ТФХ и другие необходимые параметры конкретной партии материала, из которого изготовлена продукция, передаются из складской системы управления (WMS – warehouse management system). Параметры диагностируемого технологического оборудования поступают из системы управления производственными процессами (MES – manufacturing execution system), а из системы, осуществляющей хранение

нормативно-справочной информации (НСИ) – необходимые нормативные инструкции по проведению измерений.

В свою очередь, система выявления дефектов передает в MES-систему данные о выявленных дефектах и их видах, относящиеся к конкретной партии продукции или единице технологического оборудования. Полученные результаты моделирования используются для актуализации локальных нормативных документов по методике проведения теплового контроля, хранящихся в системе НСИ, а также поступают в хранилище данных и систему управления знаниями (KMS – knowledge management system) для последующего использования в экспериментах и исследованиях (R&D – research and development).

Накопление массивов данных, реальных и модельных термограмм для различных типов и видов дефектов дает возможность совершенствования информационных систем для поддержки процессов оценки качества биметаллических листовых материалов с использованием тепловых методов неразрушающего контроля за счет использования методов искусственного интеллекта, обучения алгоритмов компьютерного зрения на основе наборов изображений и совокупности признаков наличия или отсутствия того или иного дефекта для их классификации по изображениям термограмм в реальном времени.

## 2.2. Комплексный подход к обоснованию выбора системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового контроля

Анализ исследований в области методов контроля качества выпускаемой продукции и технологического оборудования из биметаллических листовых материалов, проведенный в Главе 1, показал, что тепловой метод является одним из наиболее продуктивных и наименее затратных среди методов неразрушающего контроля. Применение методов теплового неразрушающего контроля для биметаллических листовых материалов является эффективным и целесообразным при совершенствовании технологий контроля качества выпускаемой продукции металлургических производств и технологического оборудования крупных предпри-

ятий, способствует улучшению качества и эксплуатационной надежности продукции, снижению рисков возникновения аварийных ситуаций, а также повышению экологической безопасности производства [80].

При принятии решения о вводе в эксплуатацию подобной системы контроля необходимо оценить ее техническую и экономическую эффективность и целесообразность использования на основе различных показателей, которые позволят сопоставить затраты и эффект от внедрения данной технологии с учетом специфических условий деятельности предприятия [88].

При анализе литературы по термографическим методам оценки качества удалось установить, что в настоящее время какие-либо специализированные методики для обоснования целесообразности и оценки эффективности использования теплового контроля в открытом доступе отсутствуют. Методика расчета экономического эффекта от применения теплового неразрушающего контроля качества теплозащиты здания при приемке в эксплуатацию [84] может служить основой для обоснования цены на услуги по обследованию зданий, поскольку сопоставляет ее величину с возможными убытками, возникающими из-за выявленных нарушений в качестве теплозащиты. Однако указанная методика не включает каких-либо данных о стоимости системы контроля, а также затрат на ее внедрение и обслуживание.

В общем случае при оценке эффективности подобных мероприятий в настоящее время применяются «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов» [68], а также «Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» [66]. Обе методики предусматривают использование экспертных методов оценки в сочетании с расчетными методами. Методика [66] носит более узкоспециализированный характер и применяется для оценки эффективности мероприятий локального значения, которые не требуют крупных капиталовложений или существенных изменений в составе выпускаемой продукции. При расчете экономических показателей фокусируется на рас-

чете прибыли и срока окупаемости. Методические рекомендации [68] охватывают более широкий спектр показателей, в том числе чистый приведенный доход, внутреннюю норму доходности и индекс прибыльности, а также предполагают проведение анализа политических, экономических, социальных, технологических и экологических факторов, которые могут повлиять на реализацию программ изменений. Указанные методики могут быть применены в ходе расчета экономических показателей, учитываемых при сопоставлении вариантов проектируемой системы, однако не позволяют оценить технические или производственные характеристики.

При принятии решения о внедрении или модернизации системы выявления дефектов биметаллических листовых материалов перед руководителем предприятия или производственного подразделения (лицом, принимающим решение, ЛПР) стоит задача выбора из вариантов, которые описываются большим числом количественных и качественных характеристик различной степени важности и предпочтительности относительно других. Критерии оценки вариантов при этом могут быть взаимно противоречивы, например, минимизация общей стоимости системы не будет способствовать улучшению обнаружения и оценки дефектов малых размеров. Данная проблема возникает как при обосновании предпочтения выбора системы, основанной на тепловых методах контроля, по сравнению с другими методами, так и при выборе конкретного варианта её реализации (например, используемой модели устройства регистрации температуры, способа нагрева, интеграции с производственной линией и т.п.). Подобную задачу можно отнести к слабоструктурируемым проблемам, для которых поиск оптимального варианта является достаточно трудоемким, требует значительных затрат времени и применения специальных методов многокритериального выбора. Данные методы весьма разнообразны и хорошо разработаны [43, 73, 108, 110], однако их использование в описанном случае требует корректной постановки задачи и формирования модели выбора с учетом предпочтений лица, принимающего решение [111].

Рассмотрим актуальные методы решения задач многокритериального выбора при сочетании количественных и качественных критериев

В общем виде при постановке задачи многокритериального выбора задается множество вариантов выбора (альтернатив)  $X_1, X_2 \dots X_n$ , которые оценены по многим критериям  $k_1, k_2 \dots k_m$ . Для каждого критерия  $k_i$  определена числовая или вербальная шкала оценки  $D_i = \langle d_{i1}, d_{i2} \dots d_{iz} \rangle, i = \overline{1, m}$ , при этом число оценок  $z \geq 2$ , и для разных критериев может быть различным. С учетом системы предпочтений  $P$  необходимо выделить наилучшую альтернативу, либо определить порядок на множестве альтернатив, либо распределить альтернативы по категориям (классам) [60, 109].

Рассматриваемая задача обоснования выбора системы выявления дефектов характеризуется относительно небольшим числом альтернатив  $n$  при достаточно большом числе критериев  $m$ . Применение для ее решения методов, основанных на свертке критериев в виде их взвешенной суммы, малоэффективно, поскольку сама процедура назначения весов критериев потребует больших затрат времени. При этом не исключена сложность обеспечения попарной независимости критериев по предпочтению, а обобщенный критерий не всегда позволяет объяснить и содержательно обосновать полученный результат [81].

Для решения задач с малым числом многокритериальных альтернатив довольно часто используются методы, основанные на попарном сравнении признаков. Одним из наиболее распространенных является метод анализа иерархий (МАИ), предполагающий определение показателей относительной важности для каждой пары критериев, на основе которых последовательно вычисляется итоговый ранг каждого варианта [91]. Данный метод отличается сравнительной простотой, но имеет высокую чувствительность к изменению набора вариантов [60]. Также широко известен метод ELECTRE, при использовании которого определяются индексы согласия и несогласия для каждой пары критериев на основе заданных предпочтений ЛПР, а затем с помощью этих индексов выделяется подмноже-

ство допустимых решений, из которых производится окончательный выбор оптимального варианта. Основные сложности в применении данного метода состоят в необходимости назначения весов критериев и выборе значений для построения решающего правила [56, 60].

При сочетании количественных и качественных критериев оценки альтернатив применяются методы вербального анализа решений (ЗАПРОС, ОРКЛАСС, ПАРК и др.), общим свойством которых является использование словесных формулировок в оценочных шкалах. При этом для задания отношений превосходства вариантов применяются только качественные измерения, числовые весовые коэффициенты не рассчитываются, а вербальные оценки не преобразуются в количественные показатели. Данные методы наиболее приближены к способам обработки информации человеком и позволяют сформулировать описание слабоструктурированной проблемы, которое в значительной мере соответствует реальному явлению. Применяемые процедуры проверки согласованности получаемой информации обеспечивают надежность получаемых данных, а также позволяют ЛПР постепенно выработать окончательное решающее правило и обосновать полученный результат [55, 56].

Практика применения методов решения слабоструктурируемых задач многокритериального выбора при малом количестве альтернатив с большим числом характеристик показывает, что более надежные результаты достигаются за счет уменьшения числа сравниваемых показателей. При этом уменьшение должно происходить не исключением некоторых характеристик из рассмотрения, а путем применения методов поэтапного снижения размерности пространства признаков. Данные методы предполагают объединение характеристик в группы составных критериев, оцениваемых посредством порядковых вербальных шкал с небольшим числом градаций, которые, в свою очередь, могут быть объединены в новые группы на следующем уровне иерархии [77]. При этом снижается количество вопросов, задаваемых эксперту, обеспечивается прозрачность принятия окончательных решений и возможность их обоснования.

Проведенный анализ методов решения задач многокритериального выбора при сочетании большого числа количественных и качественных критериев обеспечивает возможность сделать вывод о том, что для обоснования выбора варианта системы выявления дефектов биметаллических листовых материалов более эффективным будет подход, основанный на объединении методов вербального анализа решений, поэтапного сокращения количества признаков и альтернатив, а также разделения количественных и качественных показателей.

Рассмотрим последовательность обоснования выбора варианта системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового неразрушающего контроля.

Для оценки целесообразности применения внедряемой системы в первую очередь необходимо составить перечень всех ее базовых характеристик. Предлагается использовать следующий комплекс показателей, объединенных в условные группы. В каждой группе выделяются качественные показатели, которые будут оценены по вербальным шкалам, и количественные, оценка которых производится с использованием стандартных единиц измерения.

В группе технических характеристик к количественным показателям можно отнести массу и габариты системы, площадь занимаемого ею производственного участка, а также показатели производительности – количество, минимальные и максимальные размеры выявляемых дефектов, степень точности их определения. Качественными показателями являются:

- возможность осуществления контроля показателей качества продукции с соблюдением условий, предусмотренных соответствующими стандартами или техническими регламентами;
- надежность работы системы;
- сложность конструкции;
- возможность использования универсальных устройств для проведения измерения и обработки данных; возможность интеграции с другими системами контроля и управления (существующими или планируемыми к внедрению);

– возможность реализации непрерывного и автоматизированного контроля, накопления и хранения данных для анализа.

Вторую группу составляют организационные показатели. В их числе качественно можно оценить возможность комбинирования производства и уровень сложности работ по введению системы в эксплуатацию. К количественным показателям относятся:

- длительность работ по введению системы в эксплуатацию;
- количество рабочих мест;
- размер контролируемой партии и числа партий продукции;
- длительность цикла проведения измерений и обработки данных;
- число различных типоразмеров контролируемой продукции;
- загрузка оборудования по времени и сменности и др.

Третью группу образуют социальные показатели, к которым относятся профессиональный и квалификационный состав работников, а также различные характеристики уровня условий труда (степень механизации и автоматизации труда, энерговооруженность, загрязненность воздуха, уровень вибрации и шума и др.). В основном перечисленные показатели являются качественными. Некоторые из них могут быть оценены количественно, например, уровень шума (в дБ), загрязненность воздуха (в процентах), а затем переведены в вербальную шкалу (например, высокий/средний/низкий, или опасный/неопасный).

В четвертую группу входят экологические показатели. К качественным экологическим показателям отнесем наличие и категорию вредных или опасных условий труда, а также степень соответствия актуальным требованиям экологического законодательства. К количественным – массу или объем утилизируемых отходов и брака.

К пятой группе относятся показатели, применяемые для экономического анализа, в том числе:

– капитальные вложения на создание системы контроля (затраты, связанные с приобретением технических средств и программного обеспечения, выполнением

работ по внедрению, настройке и наладке системы, модернизацией существующего оборудования и производственных участков);

- затраты на оплату труда персонала, выполняющего работы по контролю качества продукции;

- затраты на электроэнергию;

- расходы по эксплуатации системы (ремонт, восстановление и содержание средств труда, оплата труда обслуживающего персонала)

- амортизация оборудования;

- затраты на содержание производственных площадей;

- общецеховые расходы;

- затраты на устранение скрытых дефектов, выявленных на этапе производства;

- стоимость отходов и брака и затраты на их утилизацию;

- производительность технологических операций по контролю качества продукции.

Все показатели данной группы являются количественными и измеряются в денежных единицах, в том числе абсолютных (например, в рублях) или относительных (на единицу продукции – например, в рублях на штуку или на тонну выпускаемой продукции, либо на единицу времени – например, рублях в час, месяц, год и т.п.).

Предложенный перечень является достаточно обширным, однако при необходимости эксперты или ЛПР могут дополнить его собственными показателями (например, такими как степень соответствия современным тенденциям развития технологий неразрушающего контроля, наличие потенциала для дальнейшего расширения функциональных возможностей системы и др.).

На следующем шаге происходит формирование множества критериев оценки. Для этого из указанного перечня выбирается набор показателей, учитывающих специфику деятельности и особенности организации производственного процесса конкретного промышленного предприятия. При формировании критери-

ев качественные и количественные признаки должны быть разделены. В качестве критерия либо может быть использована одна из базовых характеристик, либо несколько признаков могут быть объединены в составной критерий известными методами [77].

Далее необходимо сформировать шкалы оценок для каждого показателя. Для качественных показателей составляются вербальные (словесные) шкалы, а для количественных – числовые. Если для какого-либо количественного показателя возможно формирование интервальной шкалы оценки, то он может быть преобразован в качественный с переводом интервальной числовой шкалы в вербальную. Для построения и преобразования шкал используются достаточно апробированные методы, представленные в научной литературе [55, 60]. При этом должен сохраняться принцип разделения качественных и количественных признаков в составных критериях.

На следующем этапе производится оценка вариантов по критериям, базирующимся на качественных показателях. На основе полученных оценок производится ранжирование альтернатив с использованием нескольких известных подходов [55, 60, 77, 101, 111]. Например, может быть произведено ранжирование по каждому критерию, а затем для каждого варианта рассчитан сводный ранг  $R_n$ :

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^m r_i}{m}, \quad (6)$$

где  $i = \overline{1, m}$  – номер критерия;  $r_i$  – ранг (место) варианта по критерию  $k_i$ ;  $m$  – количество критериев оценки.

Другим способом является построение иерархической системы составных критериев с последовательным агрегированием показателей вплоть до единственного объединенного критерия верхнего уровня [77].

Результатом данного этапа является получение подмножества допустимых альтернатив  $X'_1, X'_2 \dots X'_p$ ,  $p < n$ , сформированное пересечением подмножеств наи-

лучших вариантов, отобранных различными способами ранжирования. Количество наилучших вариантов определяется на основе предпочтений ЛПР и может быть изменено на последующих итерациях отбора.

На заключительном этапе производится оценка отобранных альтернатив по количественным критериям и выбор оптимального варианта системы. При относительно большом числе количественных показателей также может проводиться их объединение в составные критерии. Сокращение числа альтернатив, оцениваемых по количественным критериям, требующим проведения сложных и трудозатратных экономических расчетов, позволяет достичь существенной экономии времени и средств на этом шаге.

Если полученный результат не удовлетворяет ЛПР, можно либо изменить способы построения шкал оценки качественных критериев, либо изменить правила формирования составных критериев, либо изменить способы отбора подмножества допустимых альтернатив, а затем повторно выполнить последующие этапы выбора (рисунок 12).

Таким образом, получен алгоритм решения задачи многокритериального выбора варианта системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов, учитывающего особенности деятельности и специфику организации производственного процесса конкретного промышленного предприятия.

## Выводы по главе 2

Разработка обновленного подхода к совершенствованию управления промышленными предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, адекватного изменившимся условиям их функционирования, включила в себя формирование комплексной структуры системы выявления и оценки дефектов методами теплового неразрушающего контроля, а также алгоритм обоснования внедрения этой системы, основанных на применении методов многокритериального выбора.

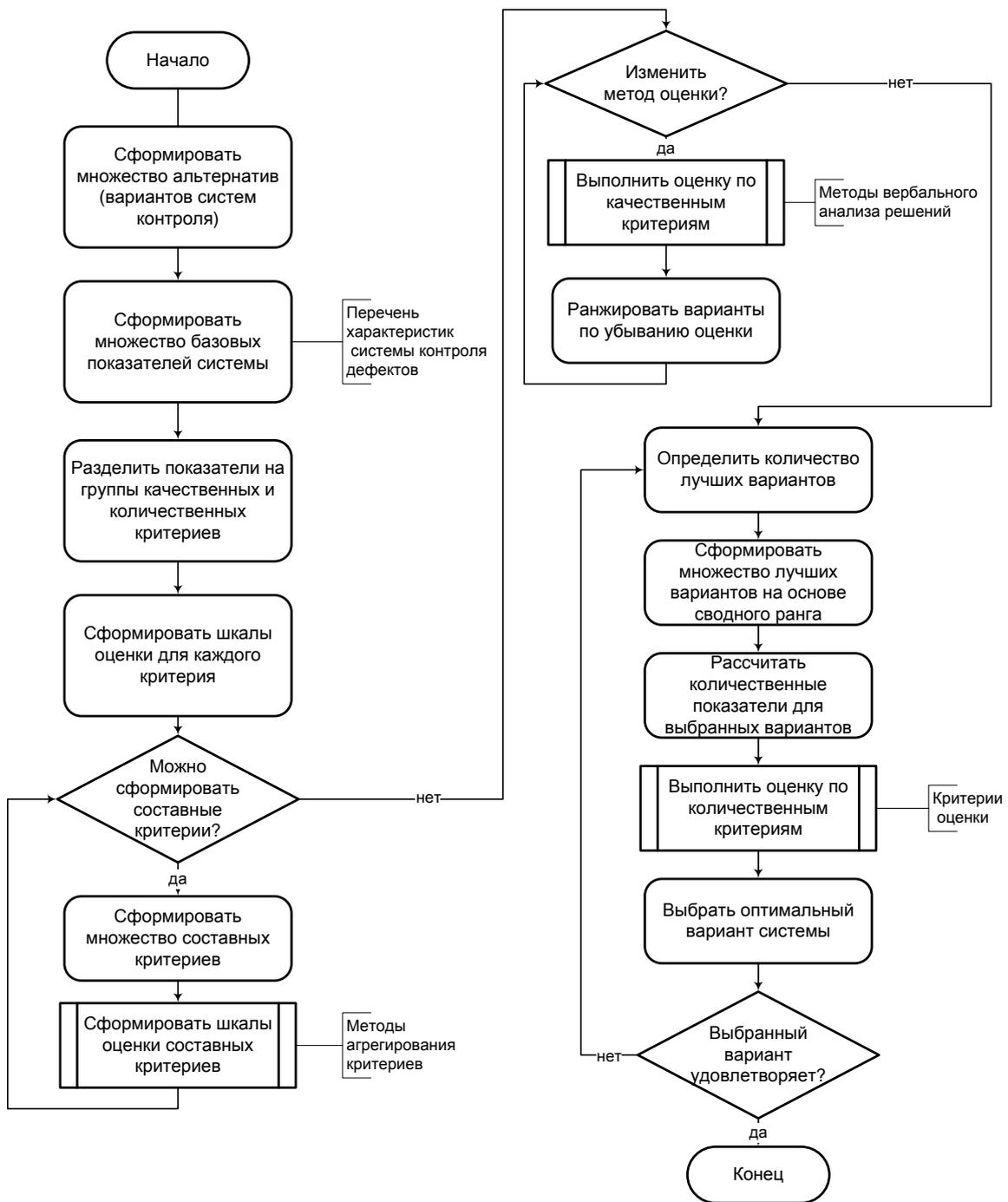


Рисунок 12 – Алгоритм многокритериального выбора варианта системы выявления дефектов

В п. 2.1 представлены концептуальные положения по формированию структуры системы выявления и оценки дефектов многослойных биметаллических листовых материалов методами теплового неразрушающего контроля для совершенствования управления промышленными предприятиями соответствующего профиля, ее интеграции с корпоративной информационной системой предприятия и организации обмена данными с ее отдельными модулями.

В п. 2.2 изложен комплексный подход к обоснованию выбора системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового контроля, основанный на сочетании методов вербального анализа решений, принципа разделения количественных и качественных показателей, а также способов поэтапного сокращения количества признаков и альтернатив.

### ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Математическая модель процесса активного теплового контроля многослойного биметаллического материала при наличии дефектов соединения слоев

Проведение натуральных экспериментов с биметаллическими пластинами затруднительно, поскольку подготовка экспериментальных образцов с заданными параметрами дефектов является технологически сложной и дорогостоящей задачей. При проведении моделирования можно с определенными допущениями имитировать процесс изменения теплового состояния пластины с целью определения необходимых параметров процесса контроля и поведения объекта под влиянием теплового воздействия при наличии тех или иных дефектов. Для разработки модели теплового контроля многослойного биметаллического материала с дефектами опишем свойства объекта и условия проведения моделирования [46, 63, 75].

Рассмотрим трехслойную пластину (рисунок 13) с наружными слоями (1) и (3), между которыми расположен теплораспределительный слой (2). Толщину слоев обозначим соответственно через  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$ . При этом материал наружных слоев и их размеры (высоты  $h_1$  и  $h_3$ ) могут быть различны.

В местах контакта наружных и внутреннего слоев пластины, с одной и другой стороны, имеются дефекты в виде цилиндрических воздушных зазоров диаметром  $d$  и толщиной  $\delta$ . Их размеры существенно меньше размера самой пластины. Размеры дефекта на границе слоев (1) и (2) обозначим через  $d_{12}$ ,  $\delta_{12}$ , соответствующие размеры на границе слоев (2) и (3) – через  $d_{23}$ ,  $\delta_{23}$ . В частном случае, для пластины с одним дефектом, размеры второго дефекта не учитываем и контакт слоев материала в этой области полагаем идеальным.

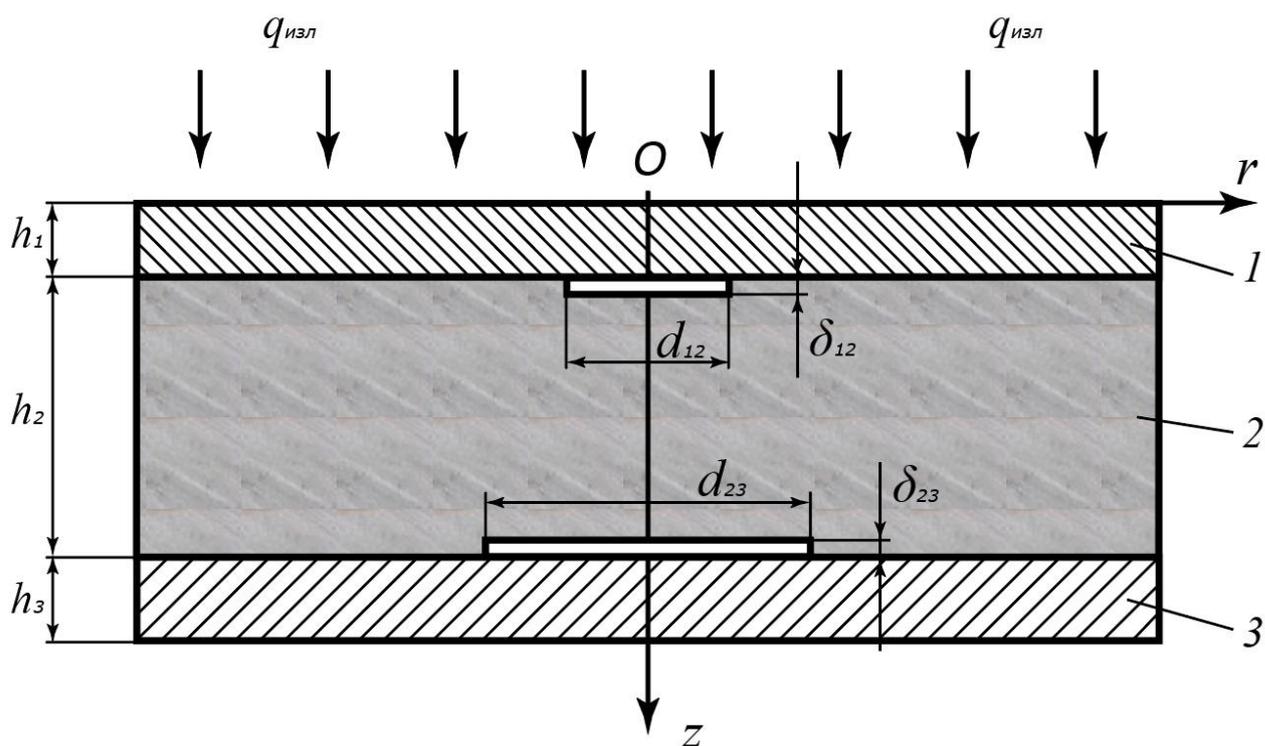


Рисунок 13 – Расчетная схема трехслойной пластины с дефектами в местах контакта слоев

При обнаружении скрытых дефектов в большинстве случаев используют процедуры импульсного активного ТК, поскольку в стационарном режиме сигналы от дефектов нивелируются из-за выравнивания температуры по объему тела, а в условиях теплообмена с окружающей средой разность температур среды и тела не позволяет достичь достаточного значения амплитуды сигнала.

В активных процедурах ТК мощность потока нагрева обычно значительно превышает мощность встречного потока теплоотдачи от тела за счет конвекции и излучения, поэтому теплообмен со стороны источника теплового нагружения можно представить как адиабатический и свести модель к более простому виду [14].

Расположение источников нагрева и средств измерения относительно объекта контроля влияет на выявляемость дефектов. Наиболее точные результаты дает односторонняя процедура, при которой нагрев и измерение проводятся с одной стороны контролируемого объекта [85]. Двухсторонняя процедура, при которой

нагрев производится с одной стороны образца, а измерение температуры – с другой, также пригодна для контроля многослойных биметаллических пластин, поскольку они имеют относительно небольшую толщину и хорошую теплопроводность.

В начальный момент времени пластина имеет температуру  $T_0$  и начинает нагреваться под действием заданного теплового потока излучения  $q_{\text{изл}}$ , при этом тепловой поток от источника теплового нагружения  $q_{\text{изл}}$  направлен по нормали к слоям.

Процесс нагрева соответствует условиям проведения импульсного активного теплового контроля. Вначале многослойная пластина нагревается в течение времени  $\tau_1$ , а затем остывает посредством естественной конвекции в воздухе с температурой  $t_{\text{окр}}$  в течение времени  $\tau_2$ .

Для выявления дефектов с обеих сторон теплораспределительного слоя модель должна учитывать условия проведения односторонней и двухсторонней процедур теплового контроля. Поэтому рассматриваются два варианта воздействия теплового потока  $q_{\text{изл}}$  в течение времени  $\tau_1$ : вариант А – на верхнюю поверхность; вариант Б – на нижнюю поверхность.

Требуется определить нестационарное распределение температур по поверхности верхней и нижней стальной пластины для обоих вариантов воздействия теплового потока.

При моделировании теплового состояния объекта был принят ряд допущений и ограничений.

Для обеспечения возможности определения поперечных размеров дефектов пластина рассматривается как симметричная относительно оси  $z$  в цилиндрической системе координат  $(r, z)$ .

Все слои пластины имеют форму цилиндра радиуса  $R$ , причем диаметр пластины значительно превышает ее толщину ( $R \gg h_i$ ).

Тогда для температурного поля имеет место осевая симметрия ( $dT/d\varphi = 0$ ), температурное поле нестационарное и двумерное –  $T(r, z, \tau)$ .

Отсутствует термическое сопротивление в контакте пластин соседних слоев. Контакт между отдельными слоями пластины полагаем идеальным, то есть на границе раздела выполняется равенство температур и тепловых потоков (граничное условие 4 рода). Передачей тепла в цилиндрическом воздушном зазоре пренебрегаем.

С учетом сформулированных допущений будем полагать, что распределение температуры в исследуемом объекте при ( $\tau > 0, 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$ ) описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

где  $i = 1, 2, 3$  – номер слоя (см. рис. 15);  $\tau$  – время;  $T(r, z, \tau)$  – температура,  $a_i = \lambda_i / (c_i \cdot \rho_i)$  – коэффициент температуропроводности;  $\lambda_i, \rho_i, c_i$  – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость металлов [40, 78].

Индекс 1 соответствует наружному слою 1 при  $0 \leq z \leq h_1$ ; индекс 2 – теплораспределительному слою 2 при  $h_1 \leq z \leq (h_1 + h_2)$ ; индекс 3 – наружному слою 3 при  $(h_1 + h_2) \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$ .

Для решения дифференциального уравнения (7) его необходимо дополнить начальными и граничными условиями.

В начальный момент времени  $\tau = 0$  считаем, что температура во всех точках расчетной области (для  $0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3), 0 \leq r \leq R$ ) равна начальной температуре образца:

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (8)$$

Определим граничные условия (ГУ). На оси цилиндра выполняется условие осевой симметрии (для  $r = 0, 0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$ )

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0. \quad (9)$$

На боковой стенке многослойной цилиндрической пластины имеем (для  $r = R, 0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$ )

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0. \quad (10)$$

На верхней границе слоя 1 пластины при односторонней процедуре контроля (вариант А) для ( $0 < r = R, z = 0$ ) в период нагрева пластины  $0 < \tau \leq \tau_1$  выполняется граничное условие второго рода:

$$q_{\text{изл}} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (11)$$

а при ее остывании  $\tau_1 < \tau \leq (\tau_1 + \tau_2)$  – граничное условие третьего рода:

$$\alpha_{\text{окр}}(T_1 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (12)$$

где  $q_{\text{изл}}$  – тепловой поток нагрева пластины путем теплового излучения;  $\alpha_{\text{окр}}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи (излучением и конвекцией) от внешней поверхности слоя 1 пластины, имеющей температуру  $T_1$ , в окружающую среду с температурой  $t_{\text{окр}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

При расчете тепловых потерь через наружные поверхности тел, которые находятся в спокойном воздухе закрытых помещений (при  $T_1 < 150^\circ\text{C}$ ), можно применить следующую формулу [75, 112]:

$$\alpha_{\text{окр}} = 9,74 + 0,07 \cdot (T_1 - t_{\text{окр}}). \quad (13)$$

Результаты вычислений, полученные с ее помощью, достаточно близки к результатам более точных расчетов.

Для двусторонней процедуры контроля (вариант Б) на верхней стенке пластины наблюдаем ее остывание  $0 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2$  при выполнении граничного условия третьего рода:

$$\alpha_{\text{окр}}(T_1 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}. \quad (14)$$

На нижней границе слоя 3 пластины для односторонней процедуры контроля (вариант А) ( $0 < r = R, z = h_1 + h_2 + h_3$ ) при  $0 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2$  имеем граничное условие третьего рода:

$$\alpha_{\text{окр}}(T_3 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}. \quad (15)$$

Для двусторонней процедуры контроля (вариант Б) в период нагрева пластины  $0 < \tau \leq \tau_1$  в точках ( $0 < r = R, z = h_1 + h_2 + h_3$ ) имеем граничное условие второго рода:

$$q_{\text{изл}} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}, \quad (16)$$

при ее остывании  $\tau_1 < \tau \leq \tau_1 + \tau_2$  граничное условие третьего рода:

$$\alpha_{\text{окр}}(T_3 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}. \quad (17)$$

На границе верхнего стального 1 и алюминиевого 2 слоев пластины (при  $z = h_1, d/2 \leq r \leq R, \tau > 0$ ) задаем граничное условие четвертого рода:

$$\frac{\partial T_1}{\partial z} \lambda_1 = \frac{\partial T_2}{\partial z} \lambda_2; T_1 = T_2. \quad (18)$$

На границе нижнего стального 3 и алюминиевого 2 слоев пластины (при  $z = h_1 + h_2, 0 \leq r \leq R, \tau > 0$ ) также задаем граничное условие четвертого рода:

$$\frac{\partial T_3}{\partial z} \lambda_3 = \frac{\partial T_2}{\partial z} \lambda_2; T_3 = T_2. \quad (19)$$

На границе воздушного зазора, на верхней и нижней стороне  $0 \leq r \leq d_{12}/2$ , при  $z = h_1$  выполняется условие:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = 0, \quad (20)$$

при  $z = h_1 + \delta_{12}$ :

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0. \quad (21)$$

На боковой стороне цилиндрического воздушного зазора при  $r = d_{12}/2$ ,  $h_1 \leq z = h_1 + \delta_{12}$  выполняется условие:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0. \quad (22)$$

На границе воздушного зазора, на верхней и нижней стороне  $0 \leq r \leq d_{23}/2$ , при  $z = h_1 + h_2$  выполняется условие:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = 0, \quad (23)$$

при  $z = h_1 + h_2 - \delta_{23}$ :

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0. \quad (24)$$

На боковой стороне цилиндрического воздушного зазора при  $r = d_{23}/2$ ,  $h_1 + h_2 - \delta_{23} \leq z = h_1 + h_2$  выполняется условие:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0. \quad (25)$$

Таким образом, получена математическая модель (7)–(25), представляющая собой краевую задачу для определения нестационарного распределения температур в трехслойной пластине с динамическими граничными условиями.

Исследуемым параметром при анализе данных температурного поля, полученных при моделировании процессов теплового контроля является дифференци-

альный температурный сигнал  $\Delta T$ , равный разности температур в исследуемой точке  $T$  и в зоне, принятой за бездефектную,  $T_{\text{бд}}$ :

$$\Delta T(r, z, \tau) = T(r, z, \tau) - T_{\text{бд}}(r, z, \tau) \quad (26)$$

Для вычисления распределения температуры в пластине без дефектов используется та же модель, но без учета граничных условий (20)–(25).

3.2. Алгоритм решения краевой задачи теплопередачи в многослойном биметаллическом материале методом конечных разностей

Для решения краевой задачи (7)–(25), приведенной в 3.1, методом конечных разностей [41, 107] вводится разностная сетка с шагом  $\Delta r$  по оси  $r$ , и  $\Delta z$  по оси  $z$  соответственно с учетом симметрии сечения пластины относительно оси вращения (рисунок 14). Шаги по пространственным переменным  $\Delta r$  и  $\Delta z$ , а также временной шаг  $\Delta \tau$  являются равномерными.

Для расчета поля температур используется схема расщепления по координатам [100]. На каждом шаге по времени вводится промежуточный этап, на котором выполняется одномерная аппроксимация по одному из пространственных направлений. Рассматриваемая двумерная задача «расщепляется» на последовательность одномерных задач по каждой из координат, при этом погрешности аппроксимаций промежуточных слоев при суммировании уничтожаются [8, 112].

Для решения уравнения (7) используется схема расщепления, которая приводит к безусловно устойчивой локально-одномерной схеме, по оси  $r$  и по оси  $z$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (27)$$

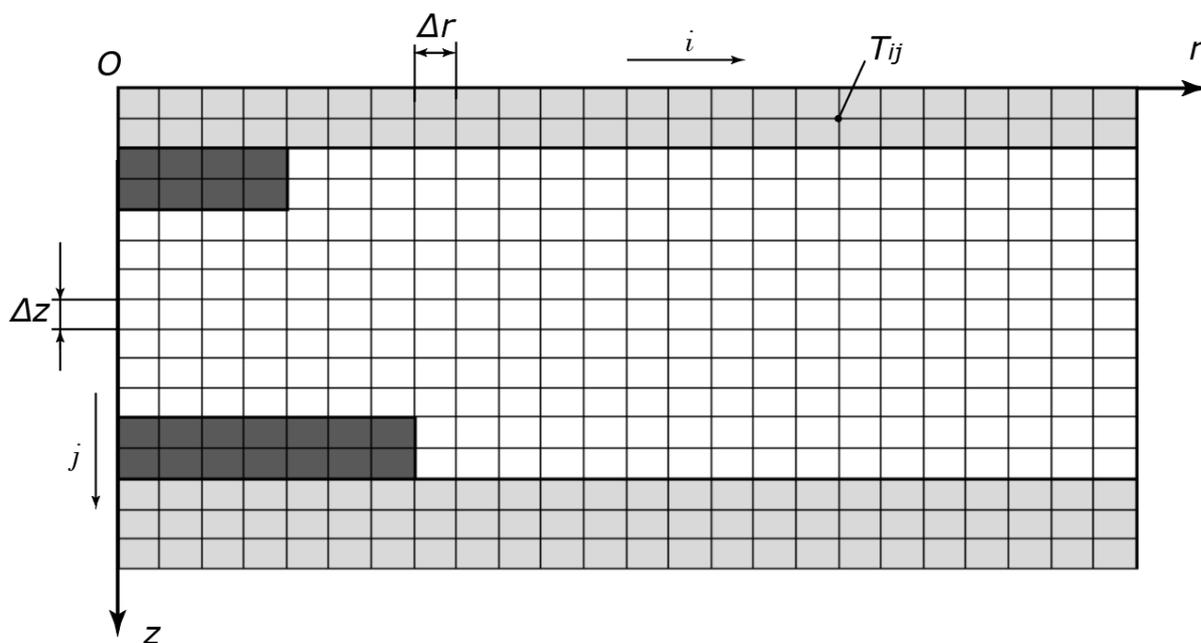


Рисунок 14 – Схема наложения разностной сетки на рабочую область

Сеточные функции обозначаются при помощи индексов  $i, j, k$ :

$$T(r_i, z_j, \tau_k) = T_{i,j}^k \quad (28)$$

где  $i$  – номер шага по координате  $r$ ,  $i=1, 2, \dots, N_R$ ,  $N_R$  – число шагов по координате  $r$ ,  
 $j$  – номер шага по координате  $z$ ,  $j=1, 2, \dots, N_z$ ;  $N_z$  – число шагов по координате  $z$ ,  
 $k$  – номер шага по времени,  $k=0, 1, 2, \dots, K$ ,  $K$  – число шагов по времени.

Дифференциальные операторы в уравнении (27) заменяются их разностными аналогами с использованием неявной схемы.

В результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями получается следующая система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\frac{T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k}{\Delta\tau/2} = a \left( \frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta r^2} + \frac{1}{(i-1) \cdot \Delta r} \cdot \frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - T_{i-1,j}^{k+1/2}}{2 \cdot \Delta r} \right), \quad (29)$$

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta\tau/2} = a \left( \frac{T_{i,j+1}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1}}{\Delta z^2} \right).$$

При этом процесс решения двумерной задачи заменяется процессом последовательного решения двух одномерных задач. Описанная разностная схема расщепления (29) имеет преимущества в смысле простоты и наглядности решаемой задачи и относительно небольшого объема вычислений [41, 100].

Каждое из соотношений (29) образует систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые решаются известным методом алгоритма прогонки [8, 53].

Метод прогонки предполагает, что существуют такие коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , для которых выполняются равенства:

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{k+1/2} &= \alpha_i T_{i+1,j}^{k+1/2} + \beta_i, \\ T_{i,j}^{k+1/2} &= \alpha_j T_{i,j+1}^{k+1/2} + \beta_j \end{aligned} \quad (30)$$

При прямой прогонке из уравнений (29), (30) определяются прогоночные коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , а при обратной – неизвестные значения температуры.

При этом область решения разбивается на однородные части, для которых теплофизические характеристики материала постоянны. При переходе через границу учитывается равенство температур в соседних слоях.

Известные значения на границах сечения и в точках перехода между слоями и через границу дефекта определяются из соответствующих начальных и граничных условий (8)–(25).

Прогонка выполняется последовательно для каждого участка, поочередно по оси  $z$ , затем по оси  $r$  на каждом шаге по времени с записью и хранением промежуточных рассчитанных значений температуры в каждой точке сечения (рисунк 15).

Подробная реализация численного алгоритма приближенного решения краевой задачи (7)–(25) методом конечных разностей для частного случая при  $d_{23} = 0, \delta_{23} = 0$  изложена в [75] и приведена в Приложении А.

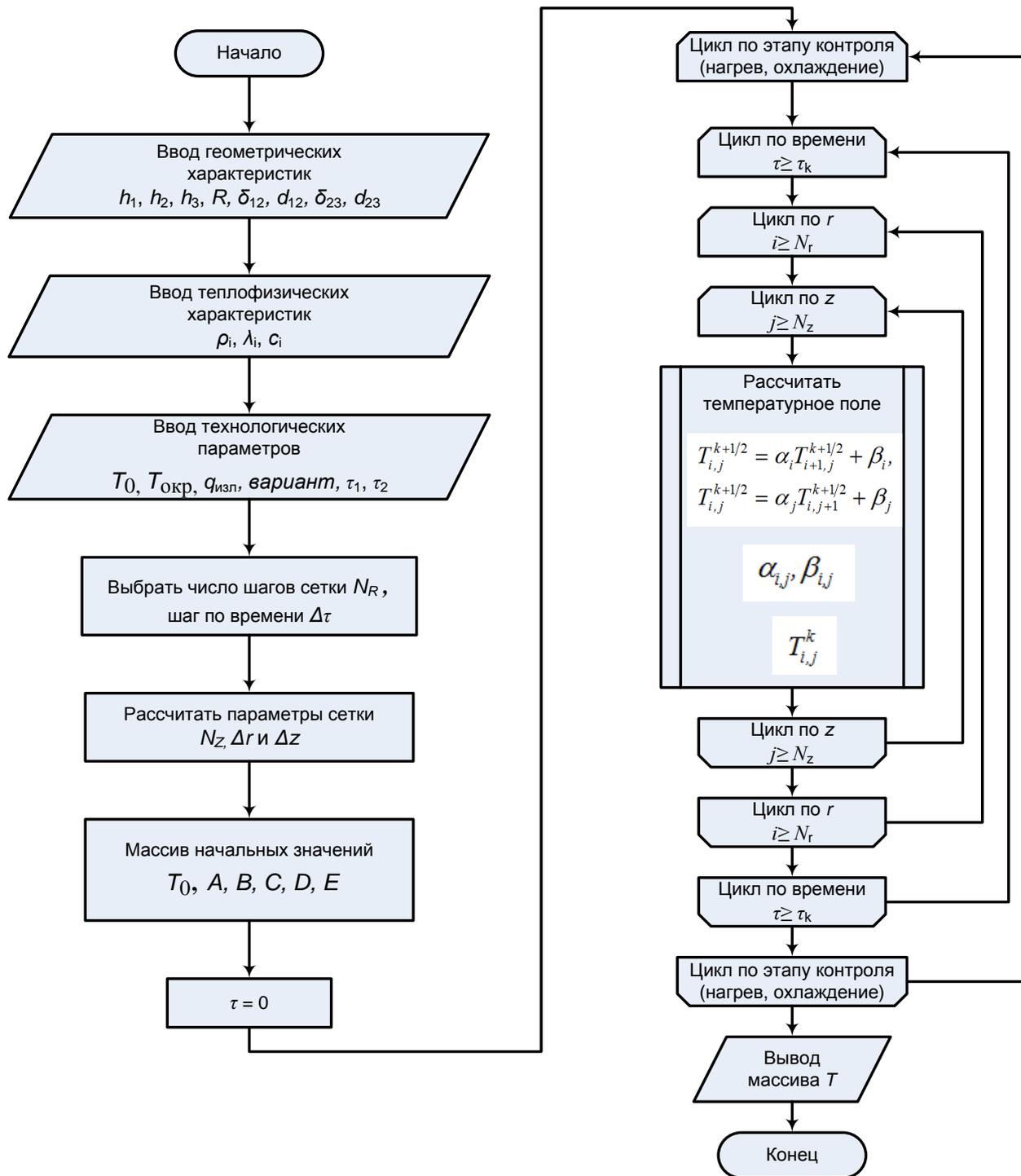


Рисунок 15 – Алгоритм расчета температурного поля в сечении пластины методом конечных разностей

### 3.3. Комплекс входных и выходных данных вычислительного пакета Agros2D при моделировании процесса нагрева и охлаждения трехслойной биметаллической пластины с дефектами методом конечных элементов

По результатам проведенного в п. 1.7 обзора и анализа функциональных возможностей современных программных средств для расчета задач теплопроводности методом конечных элементов в качестве средства моделирования в проводимых исследованиях теплового состояния многослойных пластин с дефектами выбран программный пакет Agros2D [113]. Его основными преимуществами являются возможность численного моделирования мультифизических (связанных) нелинейных задач, использование треугольных, четырехугольных и криволинейных конечных элементов, одновременное использование разных типов сеток для разных физических полей, автоматическое наложение сеток различной плотности, а также встроенная поддержка языка Python, в том числе вычислительных и графических библиотек [136].

Рабочий процесс в Agros2D, как и большинстве других конечно-элементных пакетов, можно разделить на три основные фазы. Вначале в препроцессоре задаются основные свойства задачи и создается геометрическая модель. Затем вычислительный блок (процессор) выполняет решение. После того как решение получено, можно использовать различные инструменты постпроцессора для его представления и анализа.

В препроцессоре Agros2D реализованы возможности, необходимые для описания сложной инженерной задачи. На начальном этапе добавляются физические поля (всего представлено 10 видов физических полей) и для каждого из них определяются общие свойства процесса (стационарный или нестационарный). Также есть возможность выбрать методы решения (линейные или нелинейные, в том числе адаптированные) и задать начальные условия для нестационарных процессов. Для анализа нестационарного процесса выбираются метод определения шага и общие ограничения для выполнения расчета.

После выбора рассматриваемых физических полей и типов анализа пользователь приступает к созданию геометрической модели, включающей в себя узлы, ребра (в том числе криволинейные) и области. Модель с простой геометрией может быть создана непосредственно в редакторе препроцессора, более сложную модель можно импортировать из файла в формате DXF. Поддерживаются плоские и осесимметричные модели.

Для моделирования процесса нагрева и охлаждения трехслойной пластины с дефектами (см. рисунок 13) входные данные для задания общих свойств процесса представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Ввод общих свойств процесса моделирования

Параметр	Значение
Тип координат	Осесимметричный
Тип сетки	Triangle – треугольная
Физическое поле:	Heat transfer
Анализ	Переходный процесс
Анализ переходных процессов – Начальные условия	Начальная температура объекта $T_0$ (в Кельвинах)
Метод:	Фикс. шаг
Total time (s)	Время нагрева (в секундах)
Кол-во шагов	Количество шагов по времени (в шагах)

Для построения геометрической модели пластины задаются координаты вершин (Node), построить ребра (Edge) и установить метки для материалов (Label). Ввод координат вершин осуществляется в метрах. Ось симметрии направлена по вертикали. Координаты вершин (рисунок 16) можно рассчитать по формулам (таблица 6).

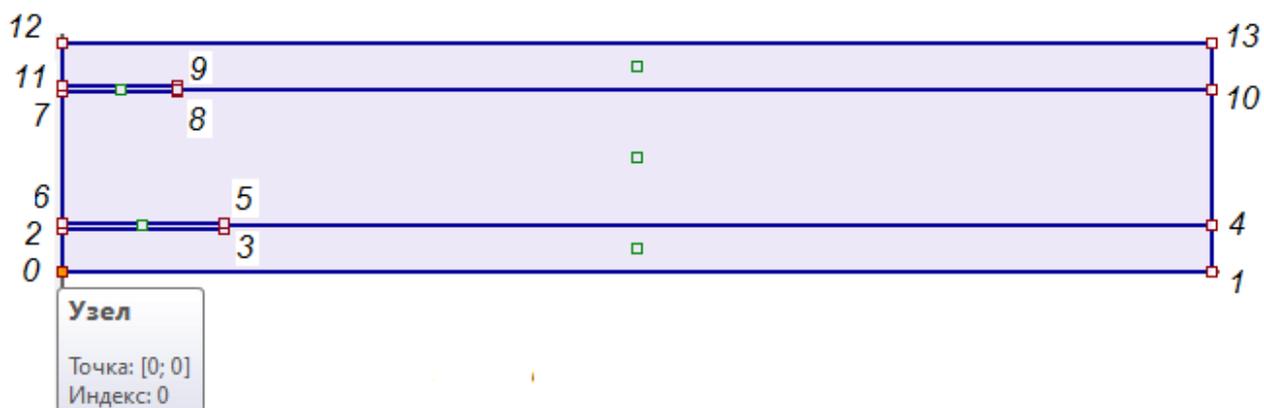


Рисунок 16 – Индексы вершин модели пластины с дефектами

Таблица 6 – Расчет координат вершин модели

Индекс вершины	Координата $R$	Координата $z$
0	0	0
1	$R$	0
2	0	$h_3$
3	$d_{23}/2$	$h_3$
4	$R$	$h_3$
5	$d_{23}/2$	$h_3 + \delta_{23}$
6	0	$h_3 + \delta_{23}$
7	0	$h_3 + h_2 - \delta_{21}$
8	$d_{12}/2$	$h_3 + h_2 - \delta_{21}$
9	$d_{12}/2$	$h_3 + h_2$
10	$R$	$h_3 + h_2$
11	0	$h_3 + h_2$
12	0	$h_3 + h_2 + h_1$
13	$R$	$h_3 + h_2 + h_1$

Вторая функция препроцессора – задать физические свойства отдельных частей объема и границы, определив физические характеристики материала в соответствии с выбранным типом задачи и граничные условия.

Для замкнутых областей сечения задаются метки (Label), в которых хранятся данные о теплофизических свойствах материала – теплопроводности, плотности, удельной теплоемкости (рисунок 17).

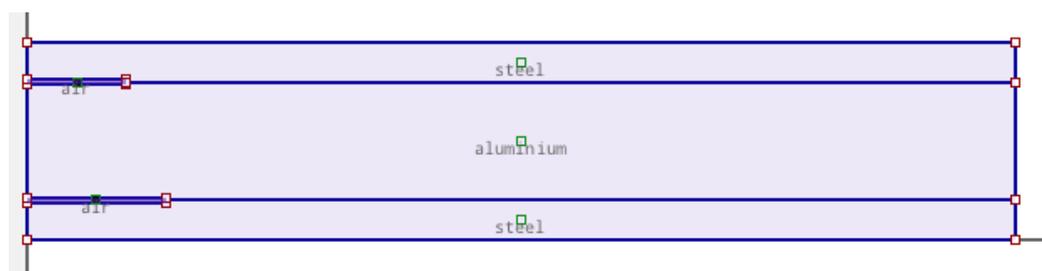


Рисунок 17 – Ввод теплофизических свойств материала модели

Для ребер модели задаются граничные условия (рисунок 18) в соответствии с параметрами режима нагрева и охлаждения пластины.

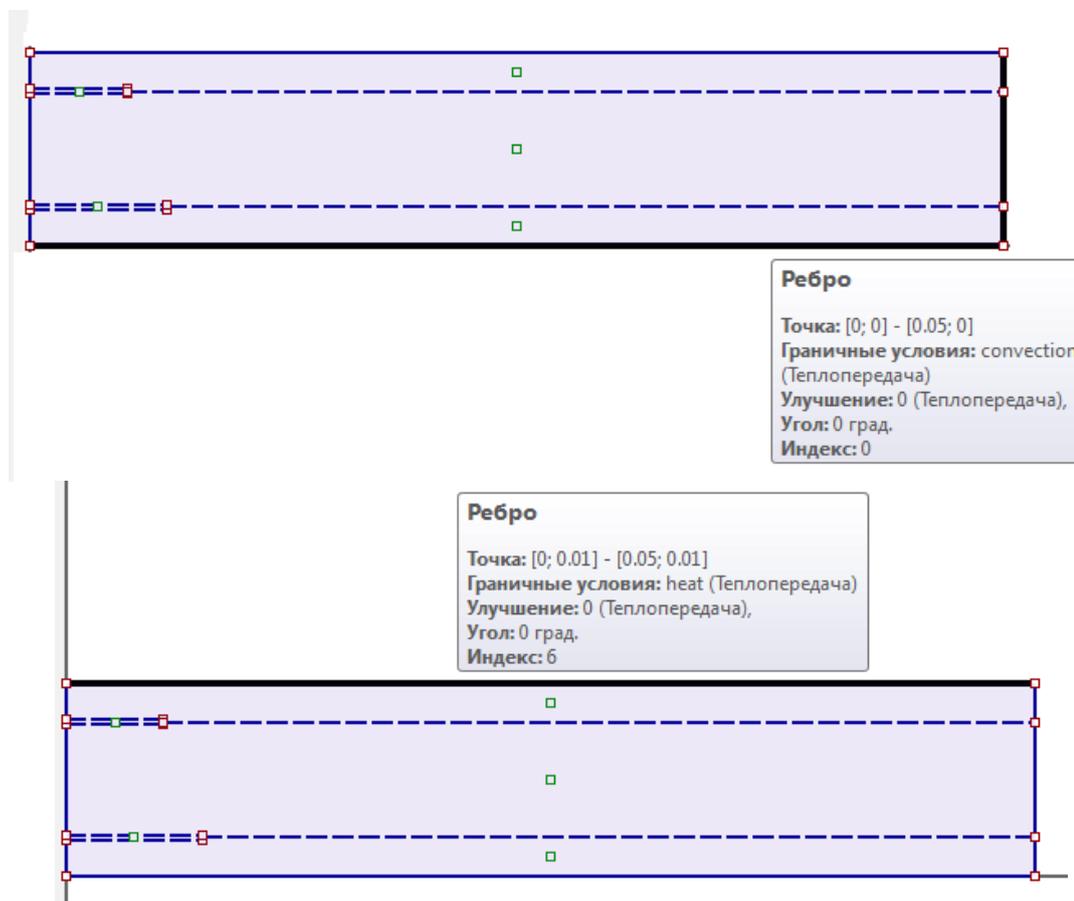
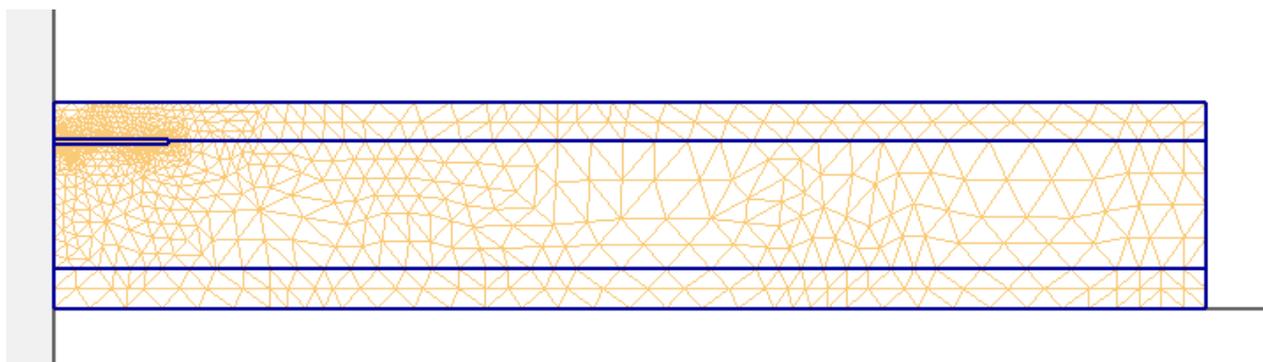


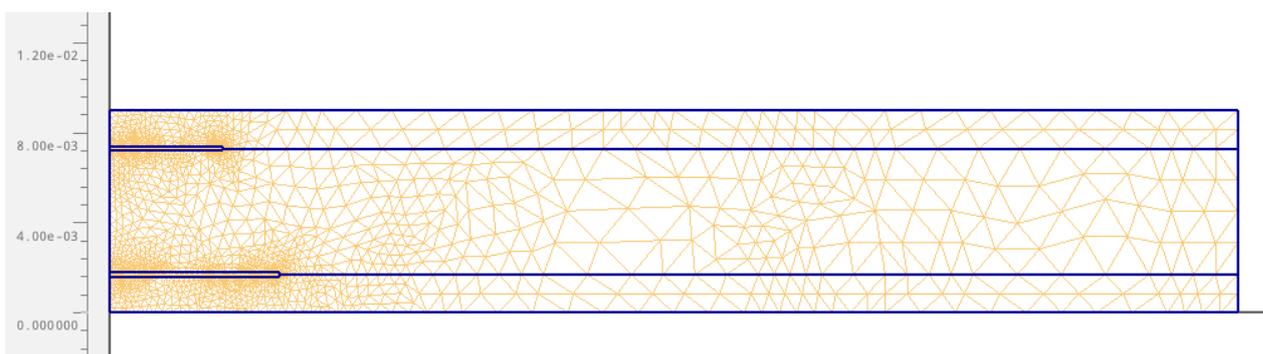
Рисунок 18 – Ввод граничных условий

Для граничного условия 2 рода (нагрев) нужно ввести значение плотности теплового потока ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) и температуры окружающей среды (К). Для граничного условия 3 рода (конвекция) необходимо задать значение коэффициента теплоотдачи ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ) и температуры окружающей среды (К). Для теплоизолированных ребер (ось вращения) все параметры установить равными нулю. Созданная модель объекта может быть сохранена в файл формата \*.a2d.

После завершения ввода необходимых исходных данных выполняется создание и наложение сетки конечных элементов. Отличительной особенностью пакета Agros2D является автоматическая адаптация величины элементов сетки. Для модели пластины с расслоениями уменьшен размер элементов в области дефекта (рисунок 19). Модель сетки может быть сохранена в файле формата \*.msh.



а)



б)

Рисунок 19 – Конечно-элементная осесимметричная модель трехслойной пластины с наложенной сеткой:

а) с одним дефектом; б) с двумя дефектами

Затем выполняется основной этап конечно-элементного расчета. В ходе процесса выполняется решение системы линейных уравнений (для самой простой линейной задачи без адаптивности только один раз, в общем случае – многократно) путем подачи собранных матрицы и вектора во внешний линейный решатель.

Результаты расчета выводятся в постпроцессоре (рисунок 20) и могут быть экспортированы в виде набора данных в формате \*.csv или графических файлов.

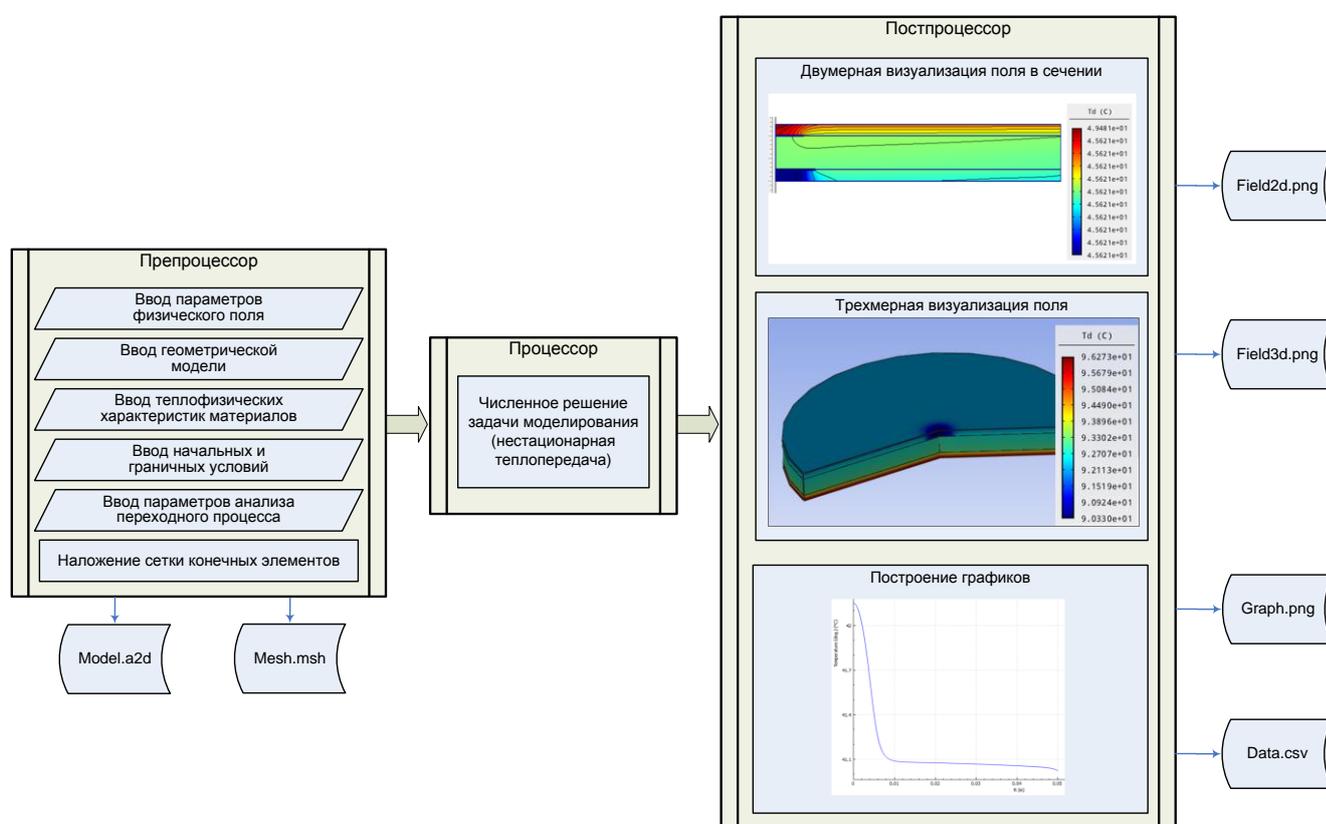


Рисунок 20 – Схема проведения моделирования в программном пакете Agros2D

В Agros2D все операции можно выполнять из графического интерфейса пользователя, что позволяет обрабатывать задачу быстро и эффективно.

Таким образом, Agros2D сочетает в себе передовые численные алгоритмы для решения дифференциальных уравнений с современным и эффективным графическим интерфейсом пользователя. Такое сочетание позволяет практикам пользоваться быстрыми и надежными алгоритмами. Продвинутый графический ин-

терфейс также полезен для разработки самих алгоритмов, поскольку поддерживать, тестировать и модифицировать такую программу гораздо проще, чем традиционные академические одноцелевые коды. Благодаря полному отделению вычислительной логики от определения физических полей, добавление новых модулей происходит очень просто, поскольку сам код не нуждается в изменении.

#### 3.4. Программа «Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля»

Алгоритм решения краевой задачи теплопередачи в многослойном биметаллическом материале методом конечных разностей, представленный в п. 3.2 и Приложении А, реализован в виде программы «Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля» (рисунок 21) на языке Matlab, которая позволяет производить моделирование теплового состояния трехслойной пластины при наличии дефекта в виде воздушной прослойки между металлами при тепловом неразрушающем контроле (нагреве и последующем охлаждении биметаллической пластины) [96].

Исходными данными для расчета являются геометрические размеры пластины и дефекта, теплофизические характеристики материалов слоев, мощность теплового потока, условия нагрева и последующего охлаждения.

В программе реализованы: ввод данных из файла, выполнение расчета температурного поля методом конечных разностей, графическое представление изотермических линий в сечении пластины (рисунок 22), распределения абсолютных значений температуры (рисунок 23) и дифференциального температурного сигнала по поверхности пластины в моменты окончания времени нагрева и охлаждения.

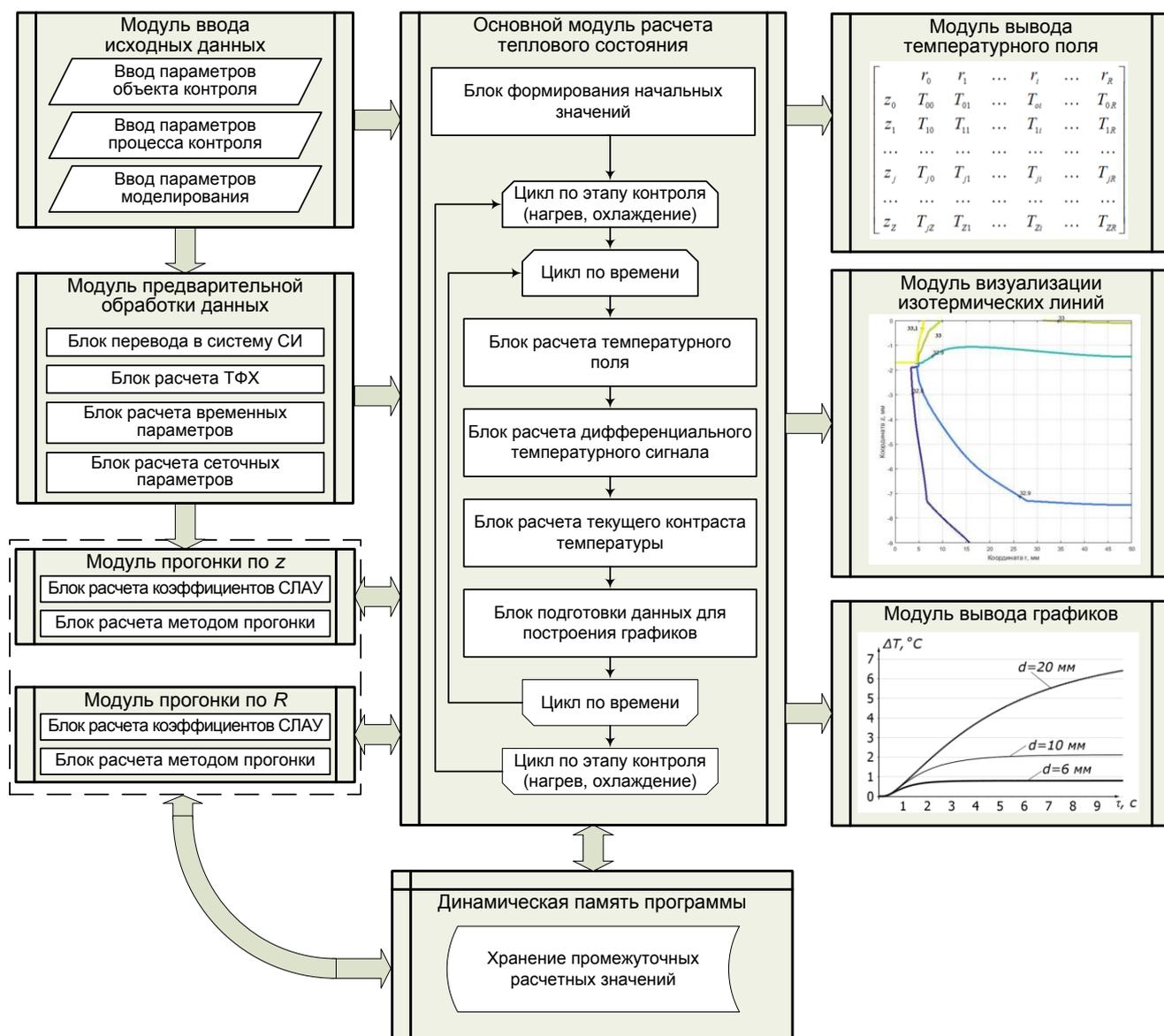


Рисунок 21 – Структура программы «Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля»

Сплошными линиями на рисунке 23 показано распределение температуры после нагрева пластины. При этом верхняя линия отображает распределение температуры по верхней стенке пластины (со стороны нагрева), что соответствует односторонней процедуре теплового контроля, а нижняя – соответственно, на нижней стенке пластины, что соответствует двухсторонней процедуре. Линиями из маркеров показано распределение температуры после остывания нагретой пластины в течение времени  $\tau_2$ .

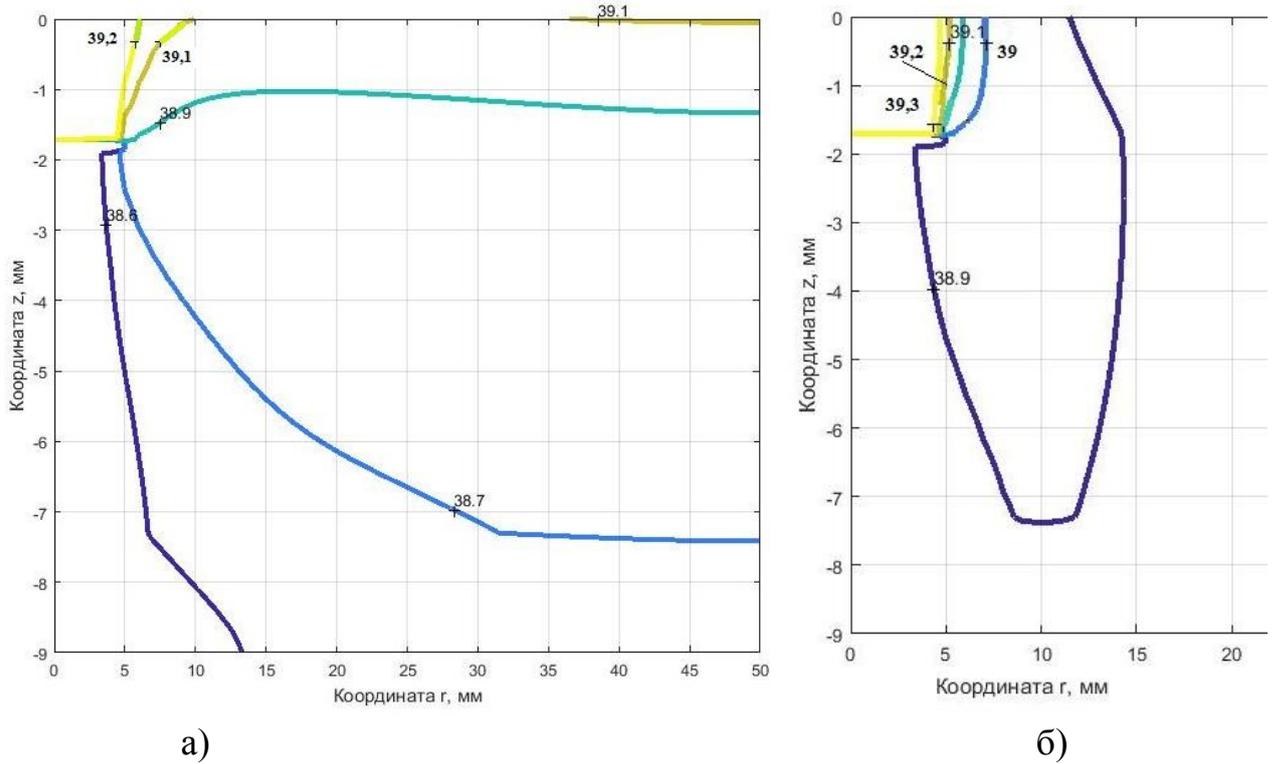


Рисунок 22 – Линии уровня температурного поля в пластине:  
 а – после периода нагрева; б – после периода охлаждения на воздухе

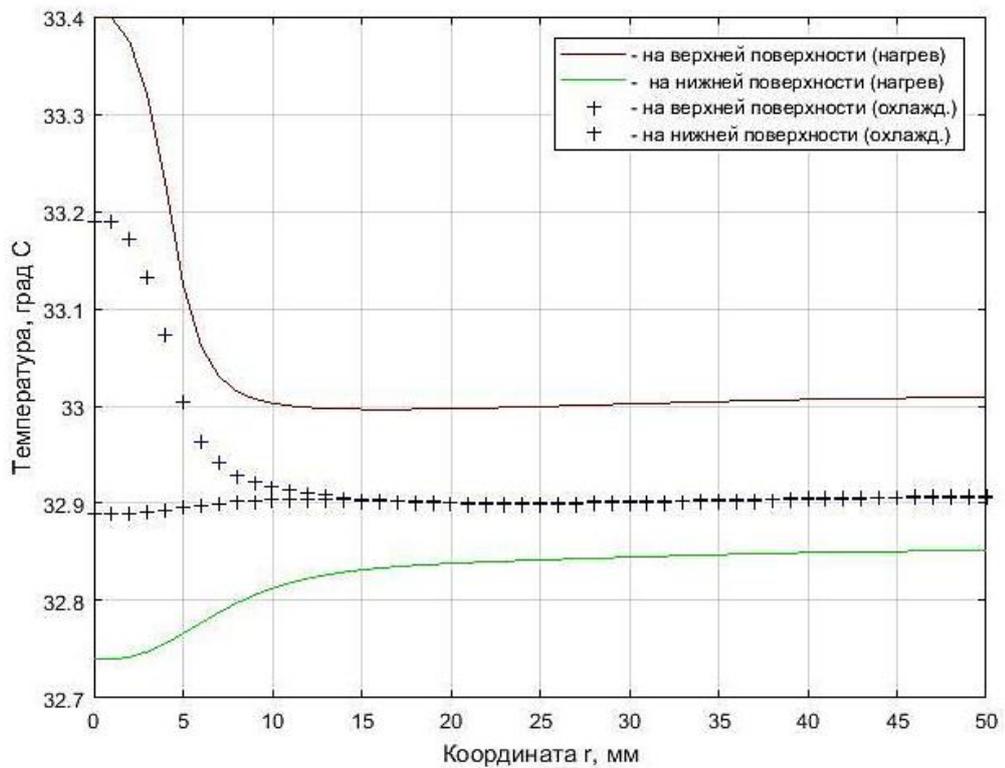


Рисунок 23 – Распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины с дефектом после ее нагрева и охлаждения

Автором диссертации разработан исходный код программы и проведено тестирование в различных режимах работы. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение Б).

### Выводы по главе 3

1. Разработанная в диссертации система выявления и оценки дефектов многослойных биметаллических листовых материалов обеспечивает не только возможность проведения измерений в оптимальных условиях и представление результатов, но и их программную обработку на основе вновь созданных математических моделей объекта теплового контроля, методов и алгоритмов решения тепловых задач.

2. Интеграция существующих и вновь созданных программных модулей в составе информационных систем поддержки процессов оценки качества подобных изделий позволяет существенно сократить затраты на подготовку и обработку данных, многократно задействовать разработанные модели в различных экспериментах. Развитие указанных систем основано на использовании алгоритмов методов конечных разностей и конечных элементов, с оптимальным построением сеточных моделей для анализа объектов со сложной геометрией, неровностями поверхности, малоразмерными дефектами, с возможностью ручного или автоматического изменения шага по времени, а также автоматизации расчетов за счет разработки дополнительных программных модулей.

## ГЛАВА 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ, СВЯЗАННЫХ С ПРОИЗВОДСТВОМ И ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрим экспериментальные примеры применения разработанной модели в процессе выявления дефектов в виде расслоений в биметаллической пластине. Практические расчеты в примерах проведены для образца (см. рисунок 13) со следующими характеристиками (таблица 7).

Таблица 7 – Размеры и теплофизические характеристики образца

Параметр	Наружные слои (1, 3)	Внутренний слой (2)	Дефекты (12),(23)
Толщина, мм	1,7	5,6	0,2
Диаметр, мм	100	100	–
Материал	Сталь	Алюминий	Воздух
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7850	2712	1,2
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	504	897	1005
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	17	203,5	0,02

4.1 Исследование влияния мощности теплового потока и времени нагрева на величину температурного сигнала на поверхности пластины с дефектом при различных вариантах взаимного расположения устройства регистрации температуры и источника теплового потока

В ходе моделирования рассматриваются различные варианты взаимного расположения устройства регистрации температуры и источника теплового потока различной мощности, и определяется время нагрева, при котором наблюдается температурный сигнал достаточной амплитуды [47].

Объект контроля – трехслойная пластина (см. рисунок 13) с одним расслоением,  $d_{23} = 0$ ,  $\delta_{23} = 0$ , обозначим  $d_{12} = d$ ,  $\delta_{12} = \delta$ .

Наблюдение температурного сигнала при нестационарном нагреве ведется на отрезке времени  $\tau_1=60$  с, шаг расчета 0,1 с. Начальная температура пластины  $T_0=20^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды  $t_{\text{окт}}=20^\circ\text{C}$ . Мощность теплового потока нагрева  $q_{\text{изл}}$  в различных вариантах решения составляет 6 кВт/м<sup>2</sup>, 10 кВт/м<sup>2</sup> и 30 кВт/м<sup>2</sup>.

Расчеты проведены в программном пакете Agros2D методом конечных элементов для различных значений мощности теплового потока и положения источника нагрева. Нагрев задавался поочередно на верхней и нижней поверхности пластины, измерения производились со стороны дефекта.

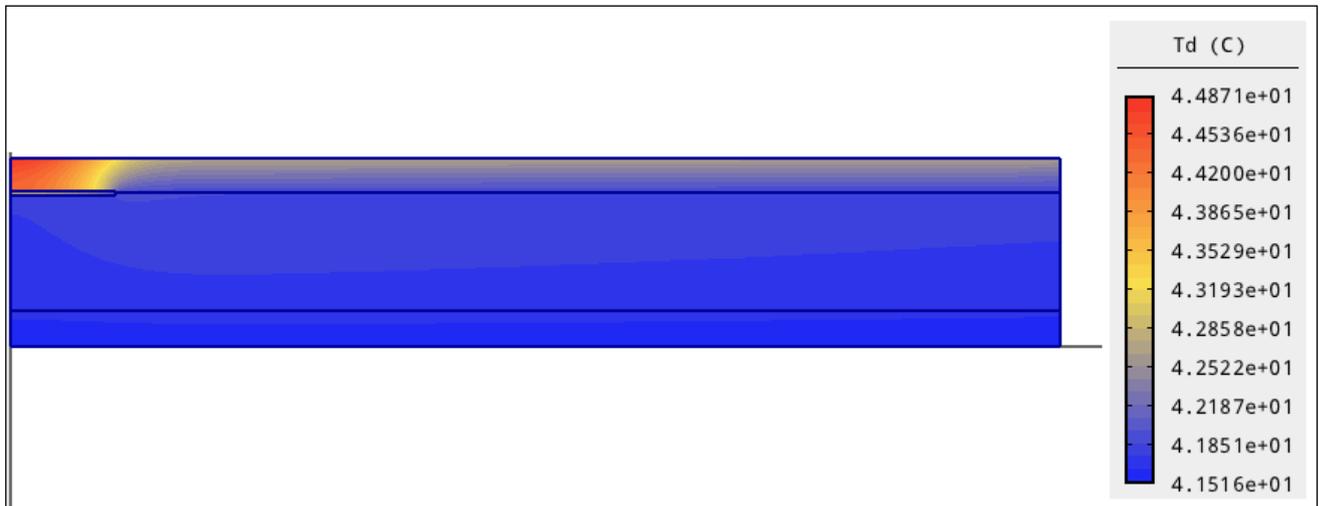
На рисунке 24 показана картина температурного поля в сечении и на поверхности пластины по окончании нагрева для одного из случаев. Здесь граничное условие нагрева было задано для ребра, соответствующего поверхности пластины, расположенной ближе к дефекту. Температурная картина поля свидетельствует о том, что над дефектом наблюдается локальный перегрев, а на нижней поверхности пластины – локальное снижение температуры.

Максимальная температура наблюдается в центре дефекта и постепенно снижается при приближении к его границам и переходе через них. Визуально диаметр области перегрева, который будет зафиксирован тепловизором, больше диаметра самого дефекта.

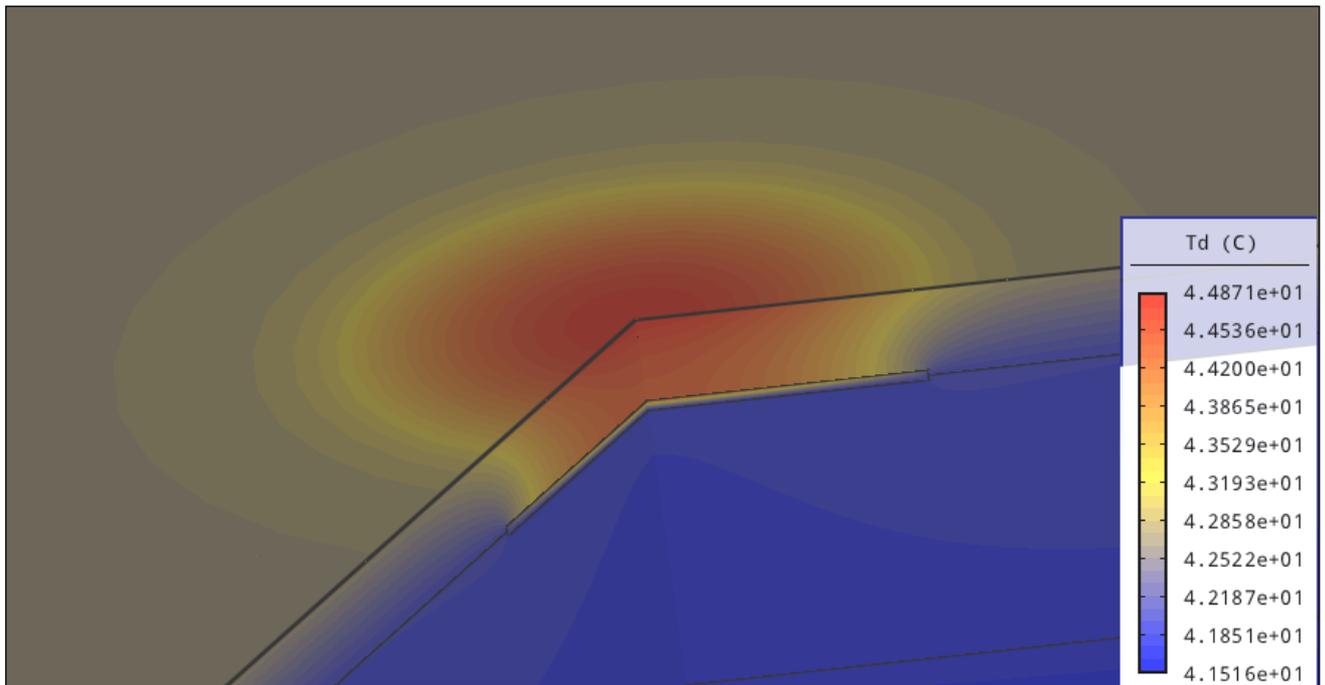
По результатам моделирования построены графики дифференциального температурного сигнала (26) для всех вариантов численного эксперимента. При этом температура бездефектной области определялась для пластины с идентичными геометрическими и теплофизическими характеристиками, но без дефекта (проводился аналогичный эксперимент по моделированию для пластины без дефекта).

На рисунке 25 представлена картина распределения температурного сигнала по поверхности пластины со стороны дефекта при нагреве с той же стороны (рисунок 25, а) и с противоположной (рисунок 25, б).

Первый случай соответствует односторонней процедуре теплового контроля, второй – двухсторонней.

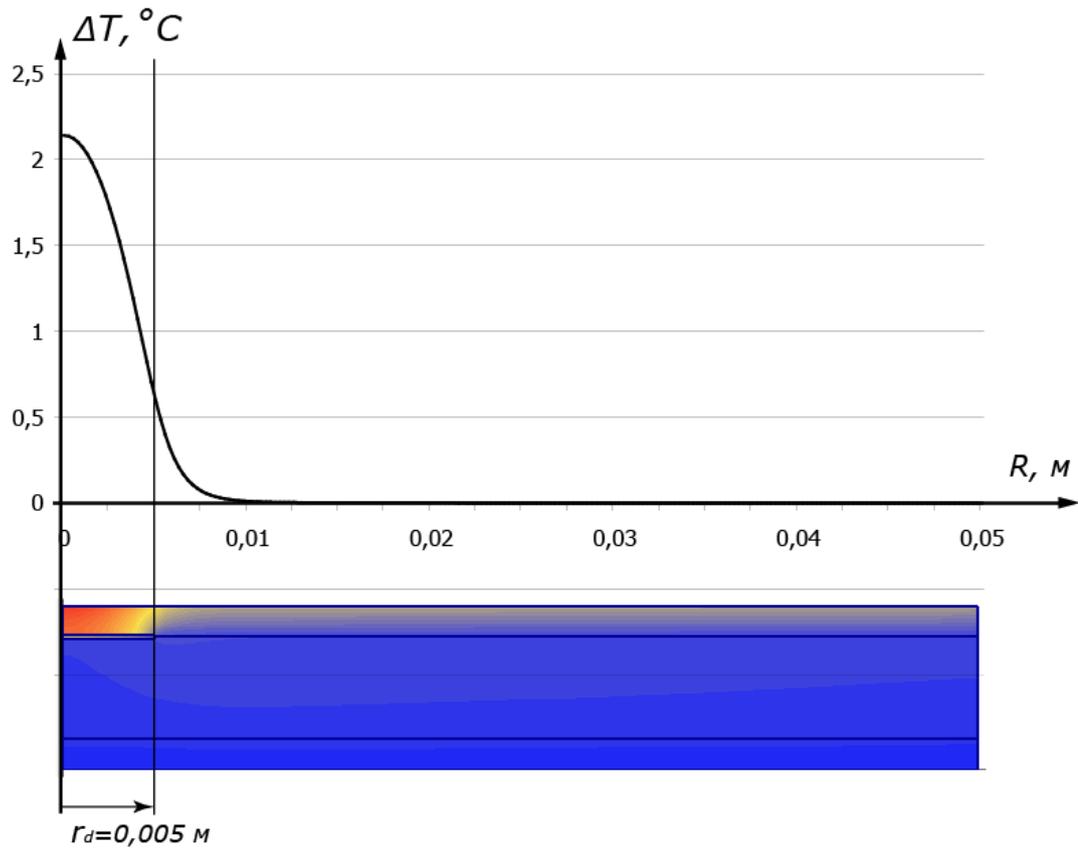


а)

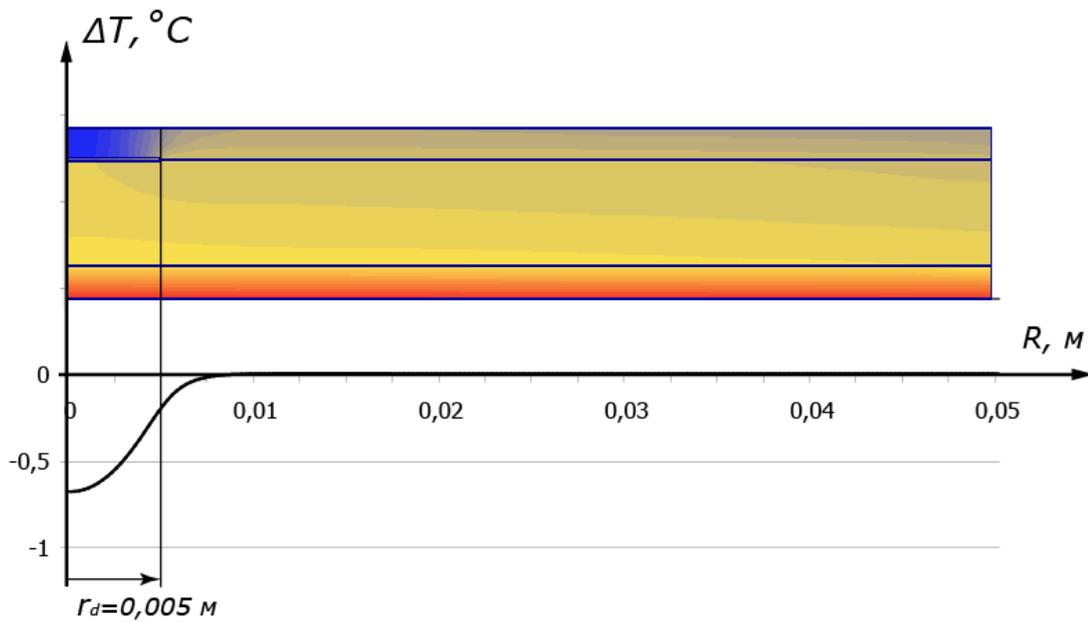


б)

Рисунок 24 – Распределение температуры при измерении со стороны нагрева по истечении 60 с при мощности теплового потока  $10 \text{ кВт/м}^2$ :  
а – в сечении пластины; б – в трехмерной модели пластины



а)



б)

Рисунок 25 – Температурный сигнал над дефектом при  $q_{\text{изл}} = 10$  кВт/м<sup>2</sup>:  
 а – при нагреве со стороны дефекта; б – при нагреве с обратной стороны

Можно наблюдать, что дефект в виде тонкой воздушной прослойки между металлами оказывает термическое сопротивление тепловому потоку, которое приводит к увеличению температуры над дефектом, регистрируемому на нагреваемой поверхности, или к ее понижению, если устройства тепловой стимуляции и регистрации температуры расположены по разным сторонам пластины (при двухсторонней процедуре).

Максимальная величина температурного сигнала наблюдается на оси цилиндрического дефекта.

Сравним значения температурного сигнала на поверхности пластины со стороны дефекта при различной мощности теплового потока нагрева для разных нагреваемых поверхностей (рисунок 26).

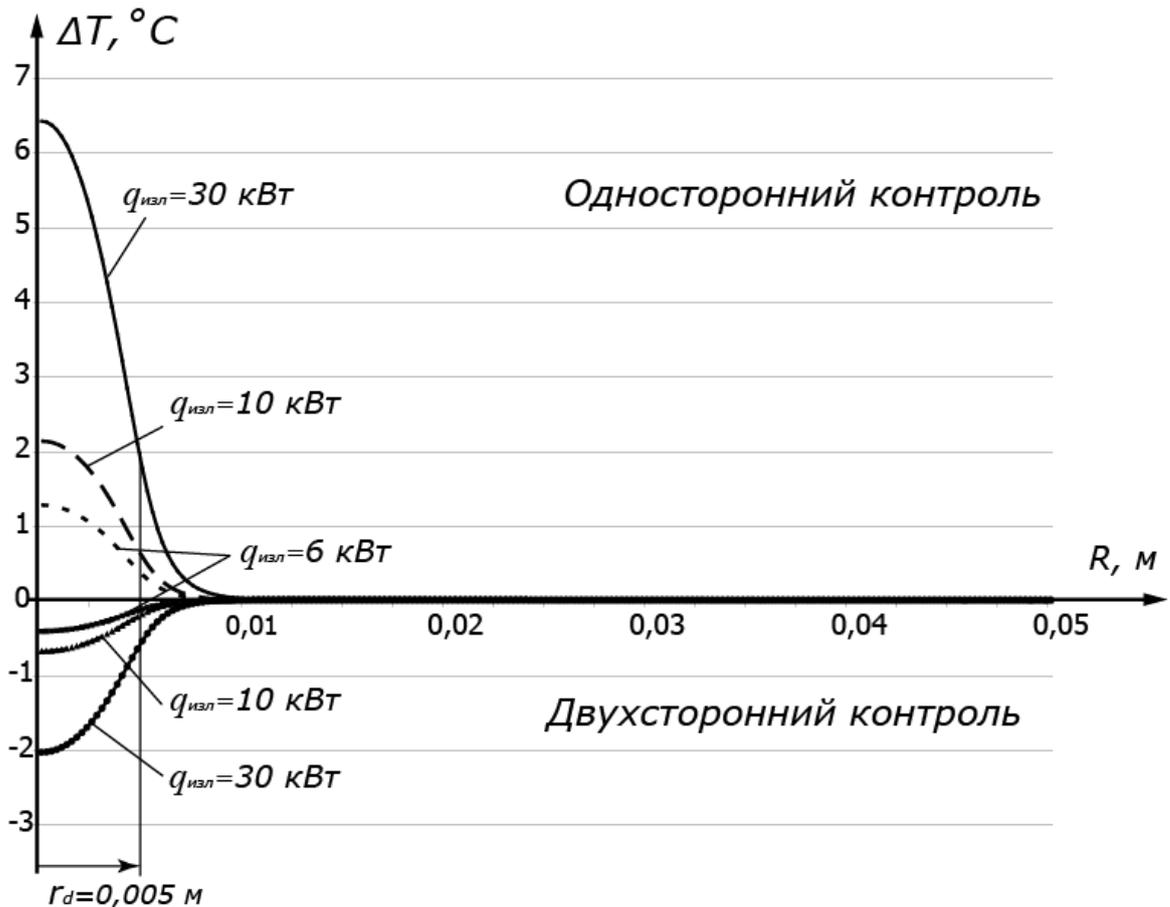


Рисунок 26 – Температурный сигнал над дефектом при различной мощности теплового воздействия

Анализ полученных данных показывает, что увеличение мощности тепловой стимуляции ведет к росту температурного сигнала.

Для определения оптимального времени нагрева пластин построены графики зависимости температурного сигнала над дефектом в центральной точке поверхности пластины от времени (рисунок 27).

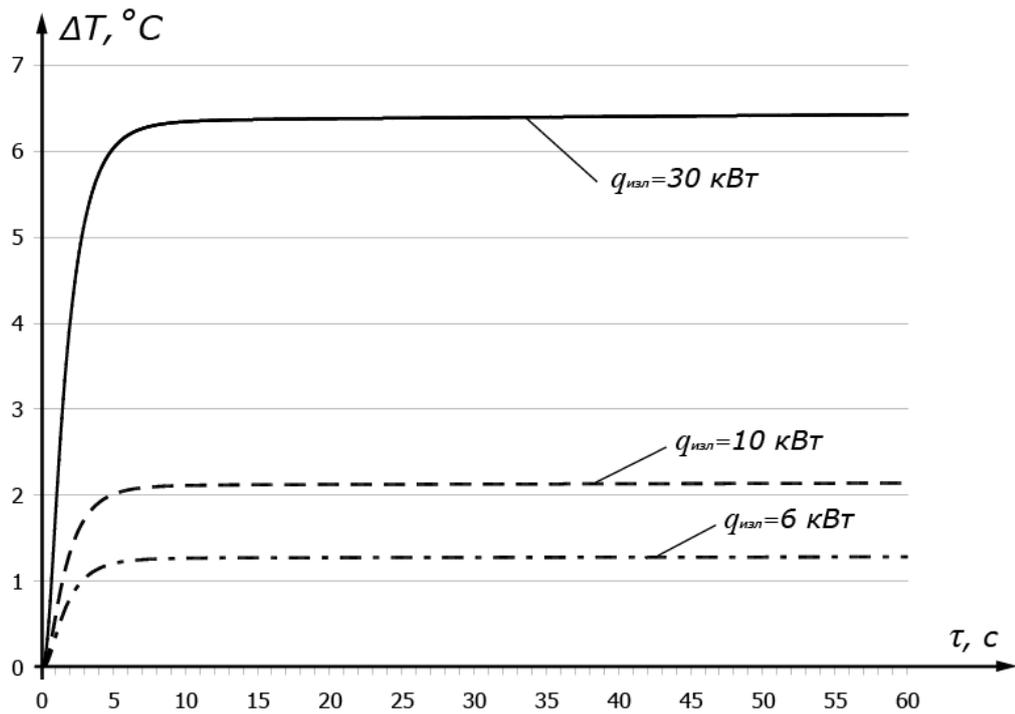
Во всех рассмотренных случаях можно определить характерный момент времени, до наступления которого температурный сигнал устойчиво растет. При одностороннем контроле время нагрева для исследуемого объекта может быть сокращено до 10 с, при двустороннем – до 15 с. При дальнейшем нагреве сигнал изменяется на сотые доли градуса, что является пределом чувствительности современных тепловизоров.

Для сравнения температурных полей после периода нагрева и охлаждения выполнены расчеты методом конечных разностей в программном пакете GNU Octave с использованием программного модуля «Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля» [96].

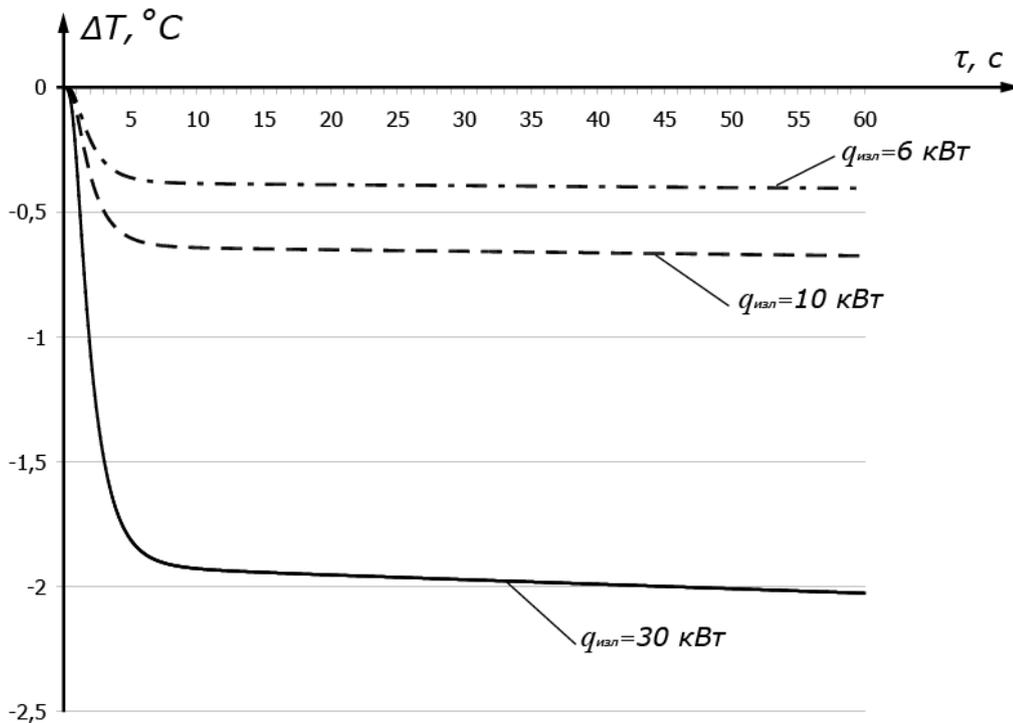
Диаметр воздушного зазора  $d=10$  мм, его толщина  $\delta=0,2$  мм. Начальная температура пластины  $T_0=30$  °С, температура окружающей среды  $t_{\text{окр}}=20$  °С. Тепловой поток излучения  $q_{\text{изл}}=10$  кВт/м<sup>2</sup>. Время нагрева  $\tau_1=60$  с и время охлаждения на воздухе  $\tau_2=5$  с.

В результате расчета получены данные температурного поля в узлах сетки для моментов времени  $\tau_1$  и  $\tau_1+\tau_2$ . На основе этих данных построены различные графики (рисунки 28–35).

На рисунках 28–30 показаны линии уровня температурного поля (изотермы) в сечении пластины, проходящем через ось симметрии при нагреве объекта тепловым потоком различной мощности. Показаны результаты для нагрева сверху (вариант А) и последующего охлаждения.

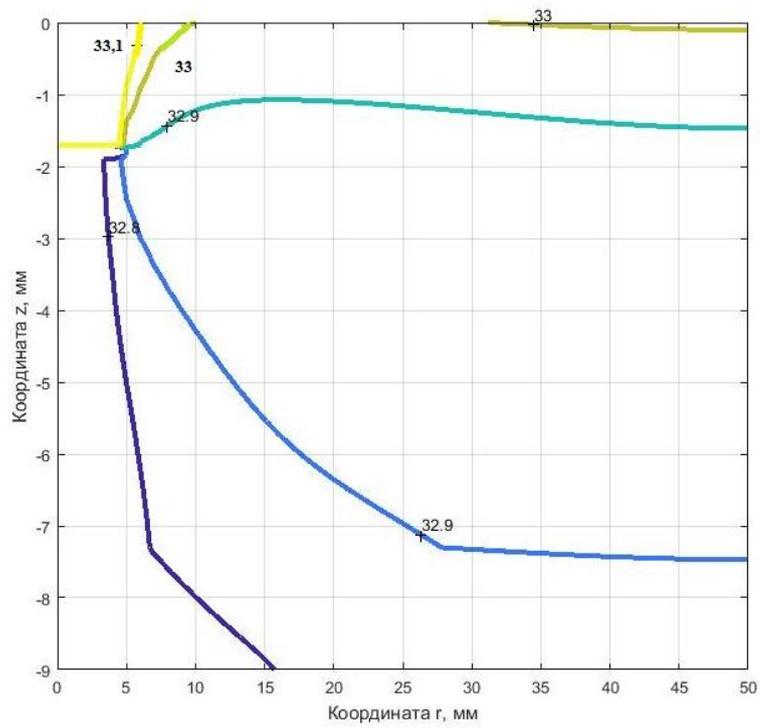


а)

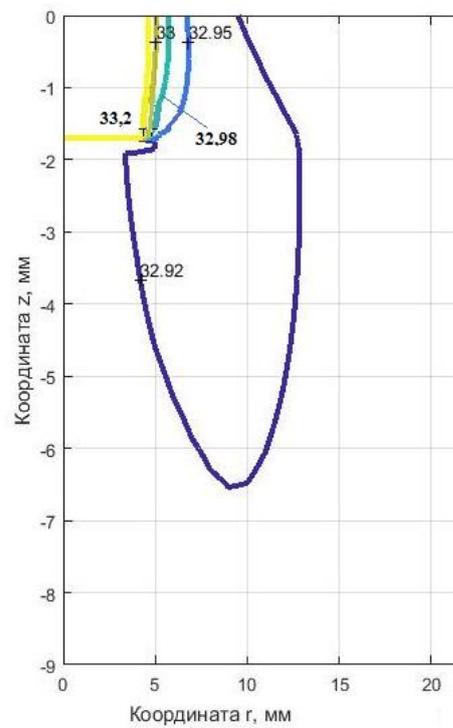


б)

Рисунок 27 – Зависимость дифференциального сигнала на оси от времени нагрева:  
 а – при одностороннем контроле; б – при двухстороннем контроле

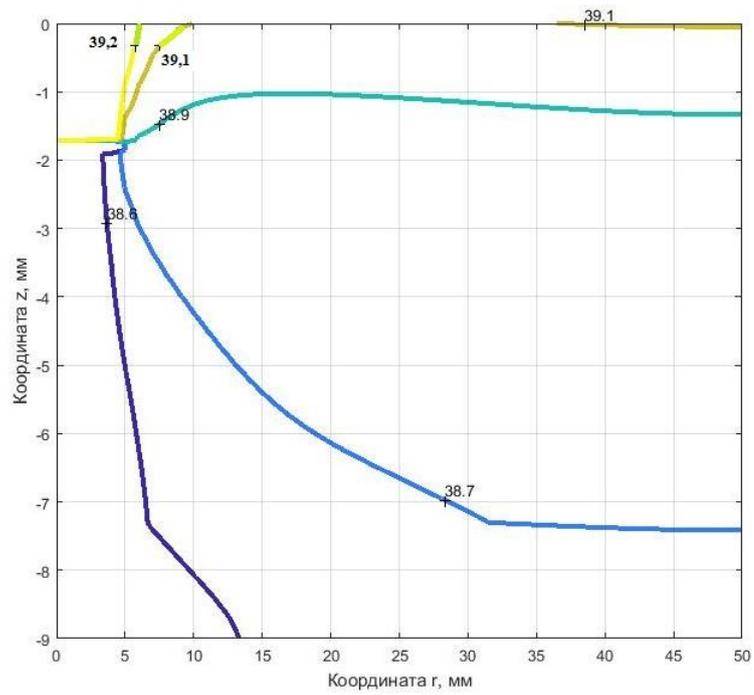


а)

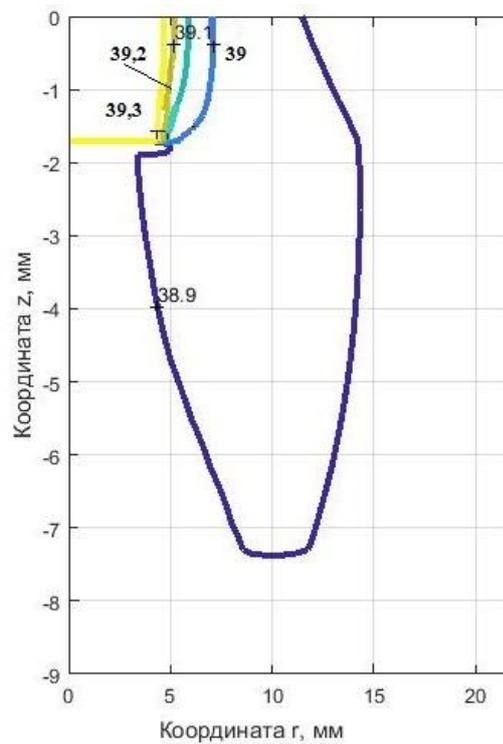


б)

Рисунок 28 – Линии уровня температурного поля в пластине  
при мощности теплового потока  $q_{\text{изл}} = 1 \text{ кВт/м}^2$ :  
а – после периода нагрева; б – после периода охлаждения на воздухе

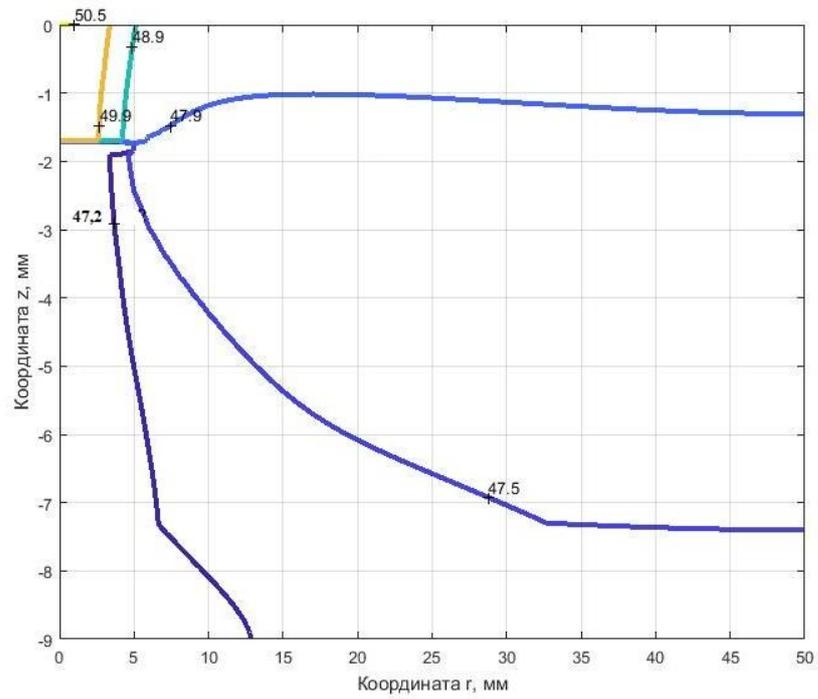


а)

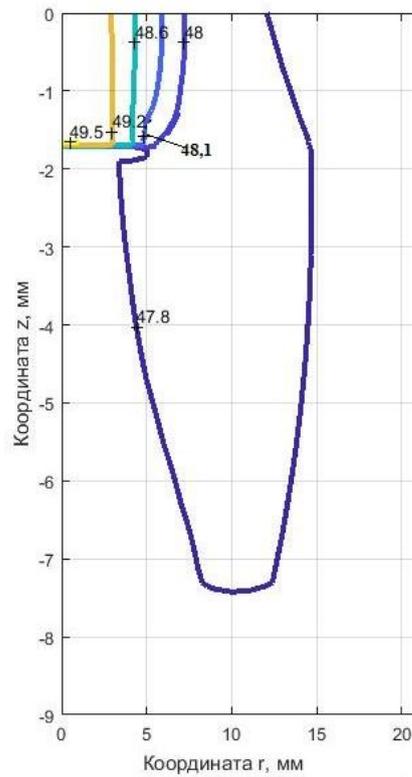


б)

Рисунок 29 –Линии уровня температурного поля в пластине при мощности теплового потока  $q_{\text{изл}} = 3 \text{ кВт/м}^2$ :  
 а – после периода нагрева; б – после периода охлаждения на воздухе



а)



б)

Рисунок 30 – Линии уровня температурного поля в пластине при мощности теплового потока  $q_{\text{изл}} = 6 \text{ кВт/м}^2$ :  
а – после периода нагрева; б – после периода охлаждения на воздухе

Видно, что качественная картина температурных полей подобна и выбор теплового нагружения во многом определяется имеющимися источниками нагрева и чувствительностью тепловизора.

На рисунках 31–34 показано распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины после ее нагрева и дальнейшего охлаждения на воздухе. Нагрев производится с верхней стороны (по варианту А).

Показаны результаты расчетов при мощности тепловых потоков  $1 \text{ кВт/м}^2$ ,  $3 \text{ кВт/м}^2$  и  $6 \text{ кВт/м}^2$  и при разных диаметрах воздушного зазора  $d=10 \text{ мм}$  и  $d=16 \text{ мм}$ .

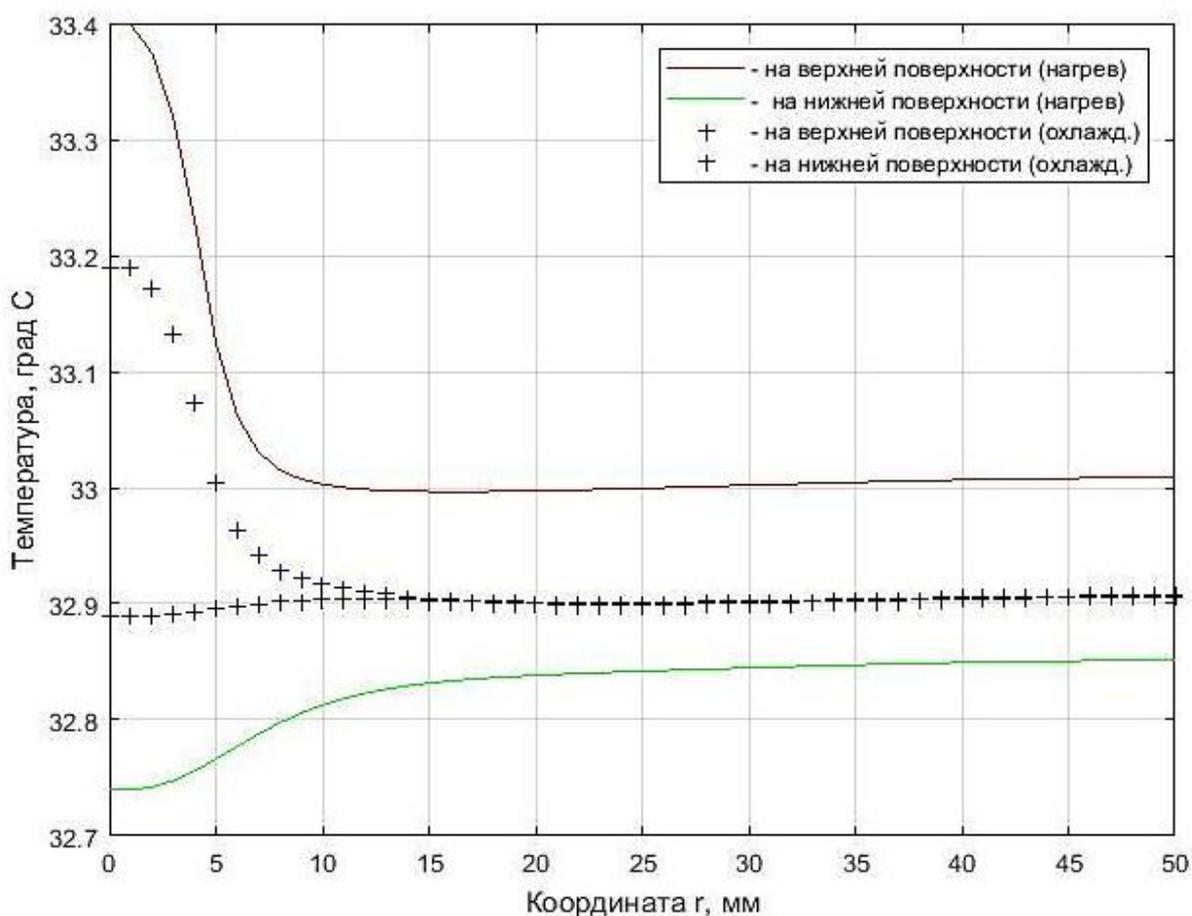


Рисунок 31 – Распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины с дефектом после ее нагрева и охлаждения при мощности теплового потока  $q_{\text{изл}} = 1 \text{ кВт/м}^2$  и диаметре воздушного зазора  $d = 10 \text{ мм}$

Сплошными линиями на рисунках 31–34 показано распределение температуры после нагрева пластины. При этом верхняя линия отображает распределение температуры по верхней стенке пластины (со стороны нагрева), что соответствует односторонней процедуре теплового контроля, а нижняя – соответственно, на нижней стенке пластины, что соответствует двухсторонней процедуре.

Сравнивая величину полезного сигнала, можно сделать вывод, что односторонняя процедура является более эффективной.

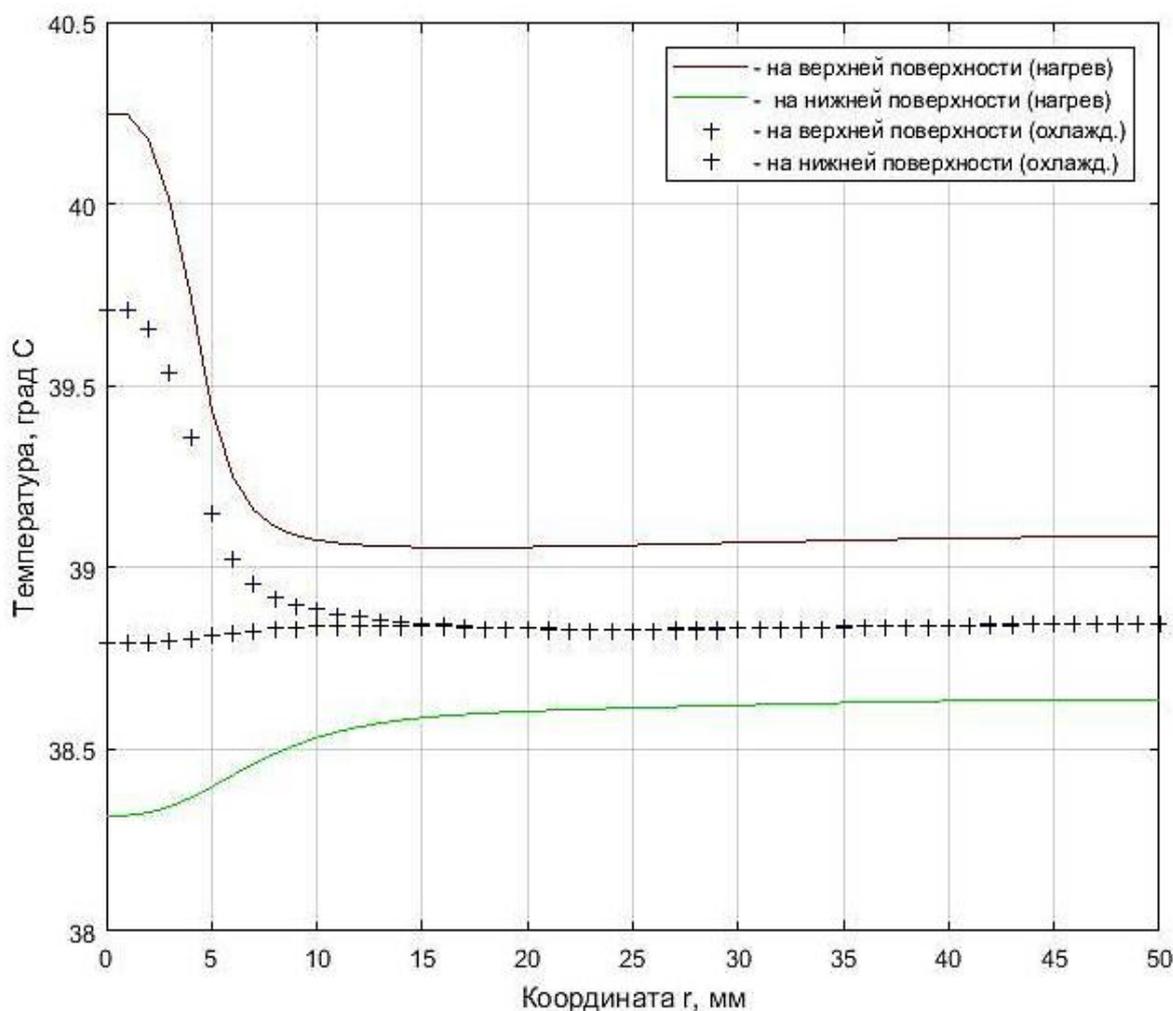


Рисунок 32 – Распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины с дефектом после ее нагрева и охлаждения при мощности теплового потока  $q_{\text{изл}} = 3 \text{ кВт/м}^2$  и диаметре воздушного зазора  $d = 10 \text{ мм}$

Можно наблюдать локальное увеличение температуры над дефектом при измерении со стороны дефекта и локальное снижение температуры при снятии показаний с обратной стороны.

Линиями из маркеров (см. рисунки 31–34) показано распределение температуры после остывания нагретой пластины в течение времени  $\tau_2$ . Можно наблюдать, что качественная картина распределения температуры сохраняется и перепад температур практически не изменяется.

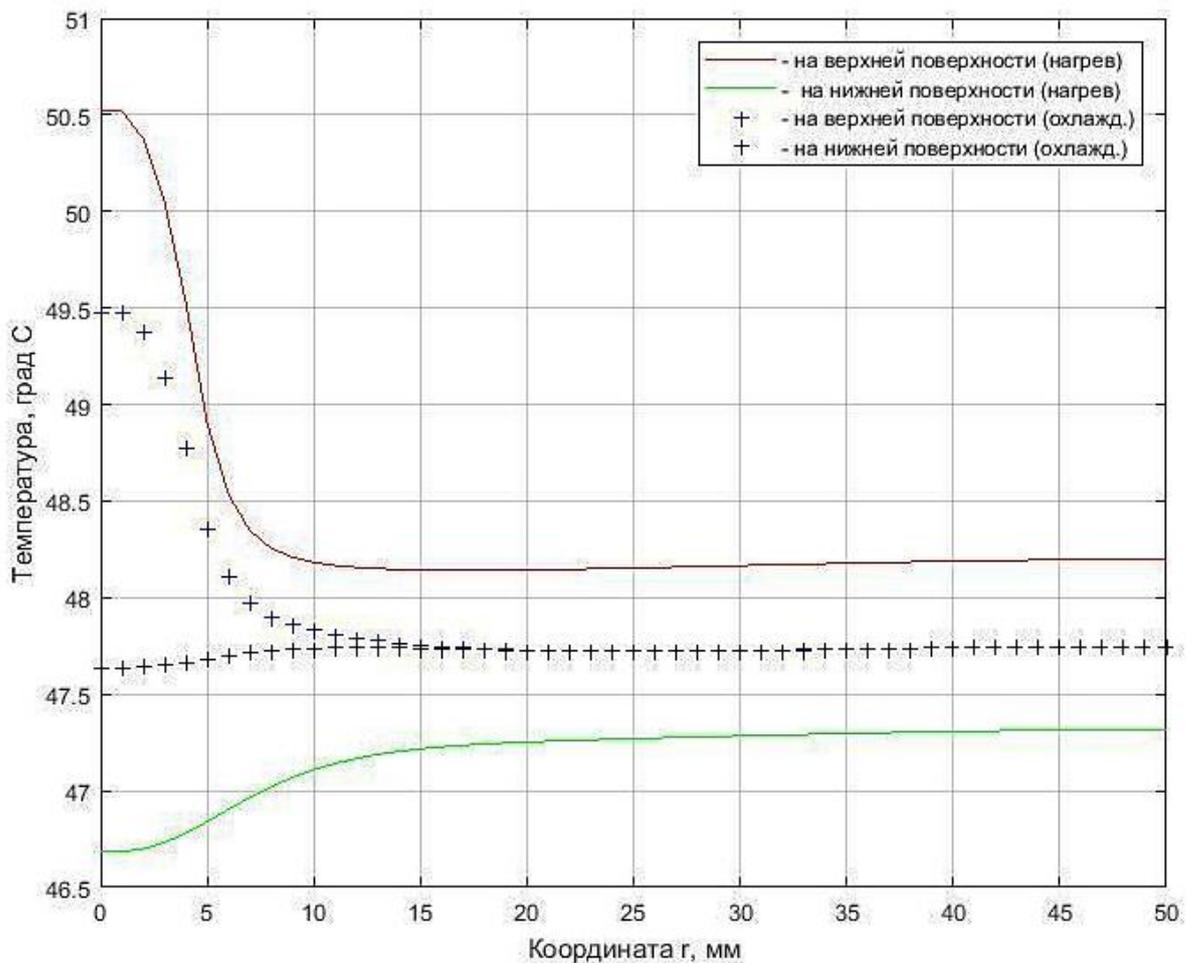


Рисунок 33 – Распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины с дефектом после ее нагрева и охлаждения при мощности теплового потока  $q_{\text{изл}} = 6 \text{ кВт/м}^2$  и диаметре воздушного зазора  $d = 10 \text{ мм}$

При этом сигнал со стороны дефекта (односторонний контроль) остается достаточно заметным, а с нижней стороны (двухсторонний контроль) практически нивелируется.

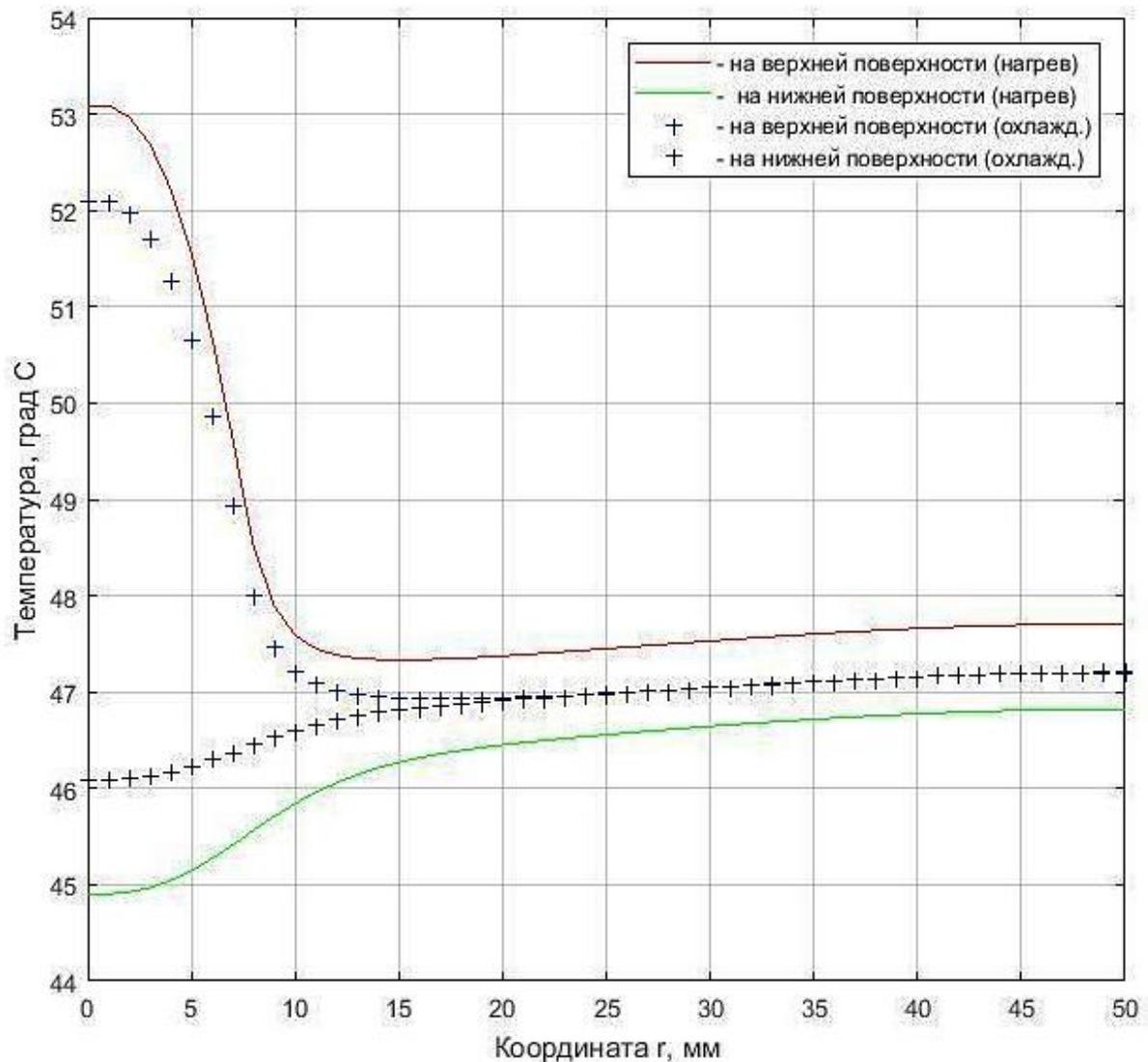
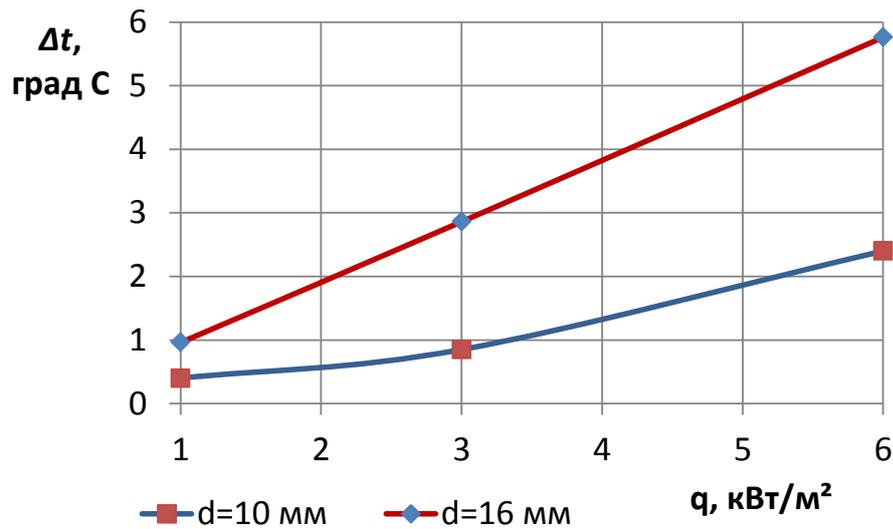


Рисунок 34 – Распределение температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей многослойной пластины с дефектом после ее нагрева и охлаждения при мощности теплового потока  $q_{\text{изл}} = 6 \text{ кВт/м}^2$  и диаметре воздушного зазора  $d = 16 \text{ мм}$

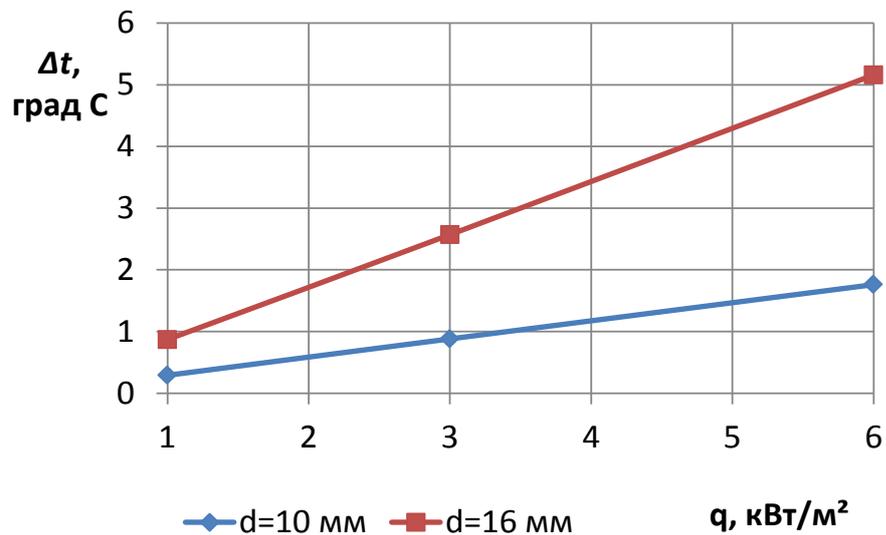
Сравнивая величину значений температуры (см. рисунки 31–34), можно сделать вывод о том, что температурный перепад над дефектным участком с обе-

их сторон пластины увеличивается при увеличении мощности теплового потока нагружения.

При аналогичном сравнении значений температуры для различных величин диаметра дефекта (рисунок 35) можно установить, что увеличение размера дефекта вызывает увеличение температурного перепада.



а)



б)

Рисунок 35 – Зависимость разницы температур в районе дефекта для верхней поверхности многослойной пластины от теплового потока:  
а – после периода нагрева; б – после периода охлаждения

На верхней поверхности пластины после ее нагрева наблюдается максимальное значение температуры  $t_{\max}$  на оси цилиндрического дефекта. При движении по радиусу от оси наблюдается провал температуры  $t_{\min}$  на расстоянии  $r = (0,8...1) \cdot \frac{d}{2}$ . Таким образом, диагностируя размер области где наблюдается перепад температур можно проводить дефектometriю, то есть определять размер имеющегося расслоения биметалла.

При использовании тепловизора точность измерений размера дефекта будет определяться разностью температур  $\Delta t = (t_{\max} - t_{\min})$ .

На основе компьютерного моделирования установлено, что чем больше тепловой поток и размер дефекта (диаметр) тем больше величина полезного сигнала  $\Delta t$  (см. рисунок 35). Видно, что за время охлаждения перепад температуры на верхней поверхности пластин практически не изменился.

Аналогичные результаты, полученные при задании теплового потока согласно варианту Б для нагрева пластин снизу, показали существенно меньшую эффективность с точки зрения получения полезного температурного сигнала [75].

Таким образом, результаты проведенного моделирования показывают, что дефекты расслоения между металлами оказывают сопротивление тепловому потоку, поэтому при измерении температуры со стороны источника теплового воздействия над дефектом будет наблюдаться локальное повышение температуры, а при расположении устройств тепловой стимуляции и регистрации температуры с разных сторон пластины – ее снижение. Увеличение мощности тепловой стимуляции способствует росту амплитуды температурного сигнала. Максимальная величина сигнала наблюдается на оси дефекта, по результатам последовательных измерений температуры в центральной точке поверхности пластины над дефектом в ходе нагрева определен характерный момент времени, до наступления которого наблюдается устойчивый рост температурного сигнала.

#### 4.2. Исследование влияния размера дефекта на величину дифференциально-температурного сигнала на поверхности пластины

Размеры и теплофизические характеристики пластины соответствуют данным предыдущего примера и таблицы 7. Расчеты проведены в программном пакете Agros2D методом конечных элементов.

Нагрев и измерение температуры выполняются со стороны дефекта. Время нагрева  $\tau_1 = 10$  с, шаг расчета 0,05 с. В различных вариантах решения диаметр воздушного зазора  $d$  принимается равным 6 мм, 10 мм и 20 мм, мощность теплового потока нагрева  $q_{\text{изл}}$  составляет 6 кВт/м<sup>2</sup>, 10 кВт/м<sup>2</sup> и 30 кВт/м<sup>2</sup>.

В результате моделирования получены расчетные значения температуры на поверхности пластины, на основе которых построены графики распределения дифференциального температурного сигнала по радиусу пластины. Показаны результаты для мощности теплового потока  $q_{\text{изл}}$ , равной 6 кВт/м<sup>2</sup> (рисунок 36) и 30 кВт/м<sup>2</sup> (рисунок 37).

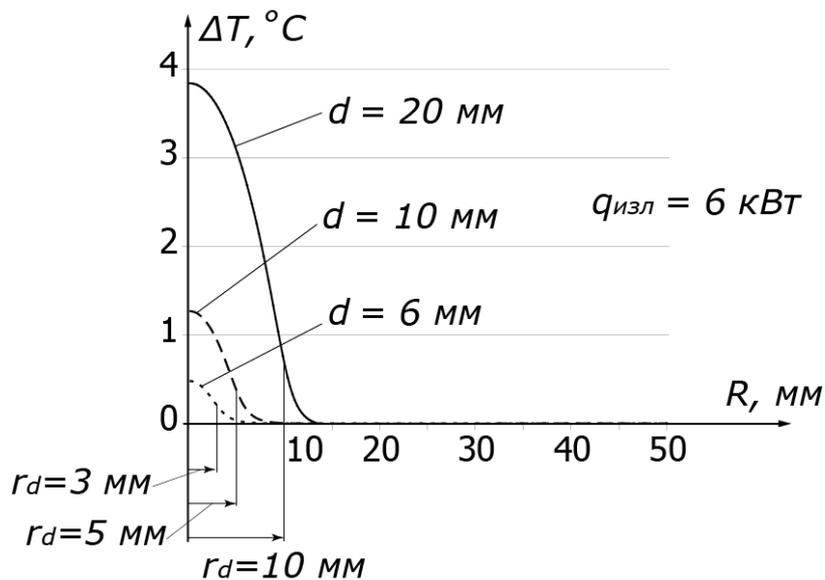


Рисунок 36 – Распределение температурного сигнала по поверхности пластины при различной протяженности дефектов при мощности теплового потока 6 кВт/м<sup>2</sup>

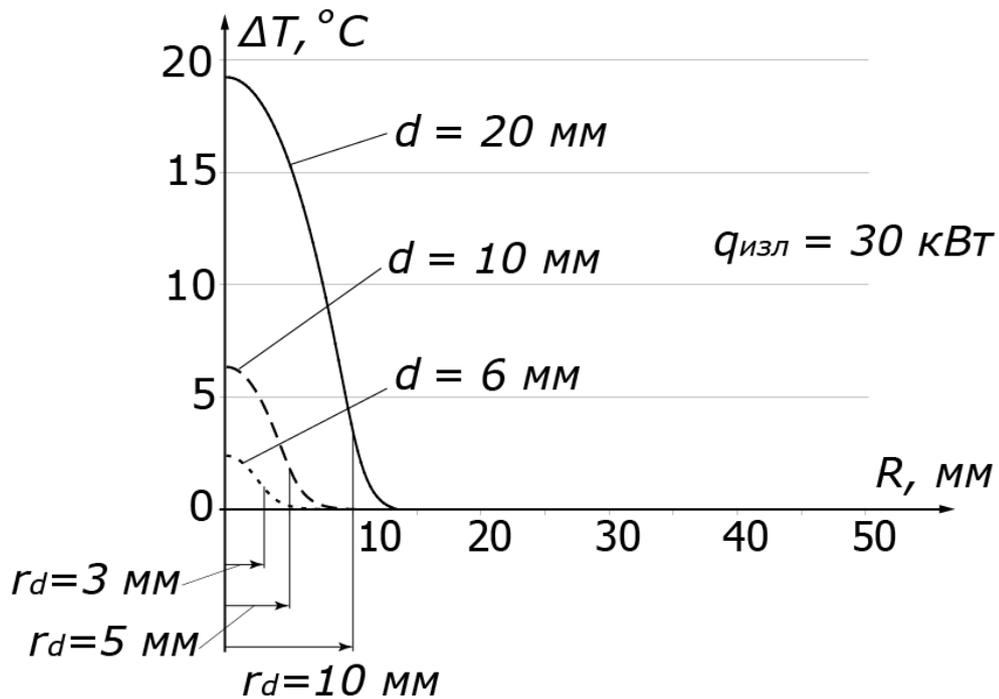


Рисунок 37 – Распределение температурного сигнала по поверхности пластины при различной протяженности дефектов при мощности теплового потока 30 кВт/м<sup>2</sup>

Полученные результаты позволяют установить, что при приближении к границе дефекта величина дифференциального температурного сигнала существенно снижается.

Можно сделать вывод, что для качественного выявления дефектов малого размера необходимо увеличивать интенсивность тепловой стимуляции. Для определения оптимального режима нагрева образцов с небольшими дефектами необходимо проведение дополнительных вычислений.

Рассмотрим зависимость температурного сигнала над дефектом в центральной точке поверхности пластины от мощности теплового потока (рисунок 38) и диаметра дефекта (рисунок 39).

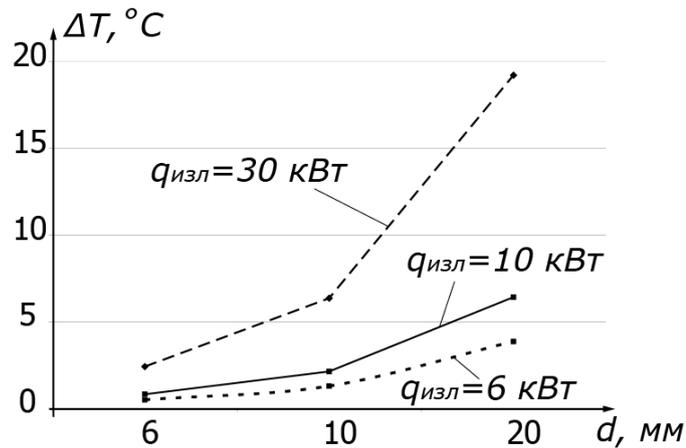


Рисунок 38 – Максимальный температурный сигнал над дефектом после нагрева при различных значениях диаметра дефекта

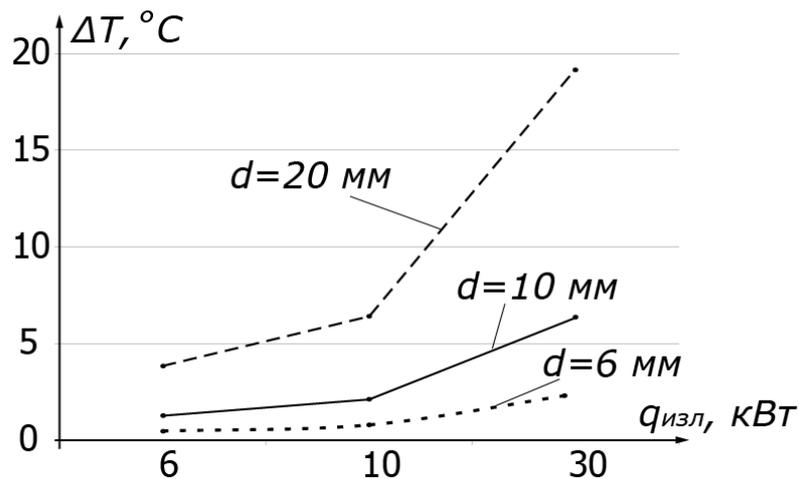


Рисунок 39 – Максимальный температурный сигнал над дефектом после нагрева при различных значениях мощности теплового потока

Можно наблюдать, что при увеличении мощности теплового потока и размера дефекта величина полезного температурного сигнала растет.

Для определения оптимального времени нагрева пластины построены графики зависимости дифференциального температурного сигнала над дефектом в центральной точке поверхности пластины от времени (рисунки 40, 41).

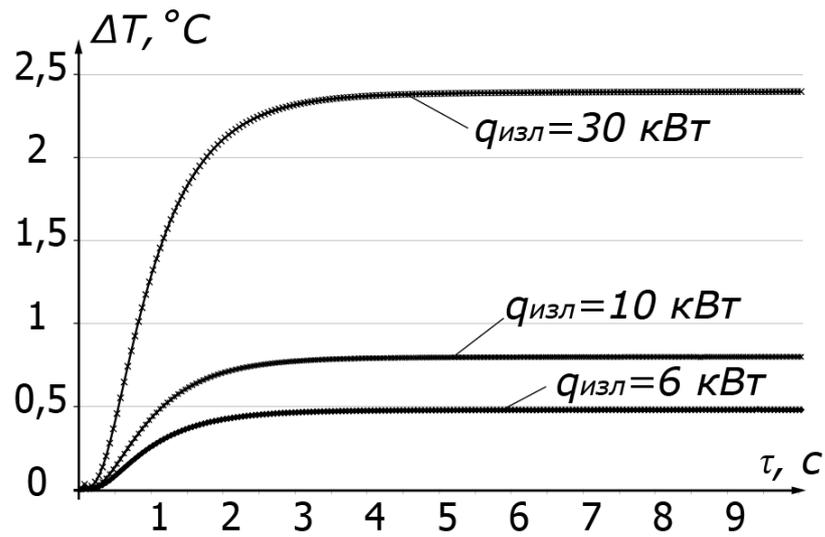


Рисунок 40 – Зависимость дифференциального температурного сигнала над дефектом от времени нагрева при диаметре дефекта  $d = 6$  мм

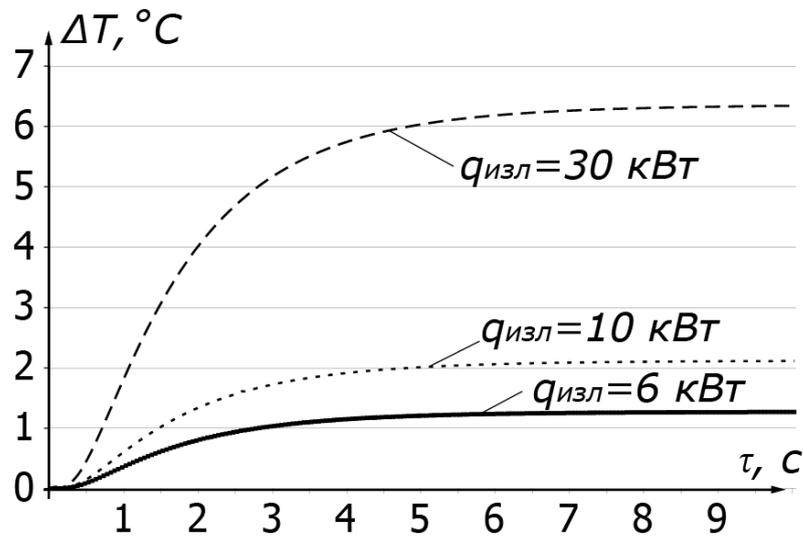


Рисунок 41 – Зависимость дифференциального температурного сигнала над дефектом от времени нагрева при диаметре дефекта  $d = 10$  мм

Во всех рассмотренных случаях можно определить характерный момент времени, до наступления которого температурный сигнал устойчиво растет, а при дальнейшем нагреве – практически не изменяется. При сравнении температурных сигналов для различных значений диаметра дефекта и неизменной мощ-ности теп-

лового потока можно наблюдать, что данный момент наступает тем раньше, чем меньше размер дефекта (рисунок 42).

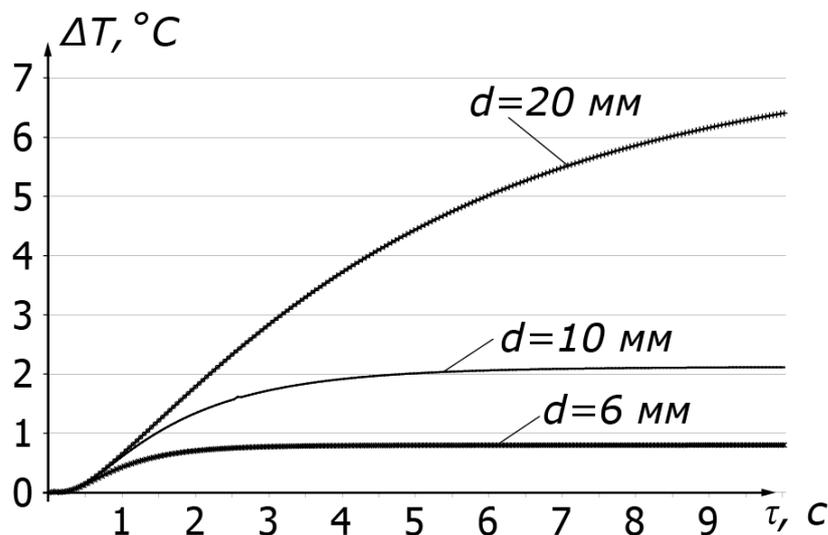


Рисунок 42 – Зависимость дифференциального температурного сигнала над дефектом от времени нагрева при мощности теплового потока  $q_{\text{изл}} = 10 \text{ кВт/м}^2$

Результаты проведенного моделирования согласуются с результатами предыдущего примера и показывают, что при увеличении мощности теплового потока и размера дефекта величина дифференциального температурного сигнала растет. При исследовании образцов с дефектами малого размера необходимо увеличивать мощность теплового потока. Моделирование позволяет определить характерный момент времени, до наступления которого температурный сигнал устойчиво растет, причем данный момент наступает тем раньше, чем меньше размер дефекта [48].

#### 4.3. Определение размера дефекта по данным температурного поля различными методами

На термограммах экспериментальных образцов дефект создает видимый «отпечаток», образуемый точками с повышенной или пониженной температурой. Его размеры могут быть определены в пикселях с последующим переводом в тра-

диционные метрические единицы. Однако при визуальной оценке погрешность может достигать 20%, что является следствием увеличения температурного «отпечатка» при диффузии тепла в образце [14].

Для более точной оценки применяют различные методы повышению информативности термографического изображения (усреднение, вычитание, деление изображений, наложение термограмм, полученных одновременно при односторонней и двусторонней процедуре контроля и др.).

Помимо визуальной оценки определение размеров дефекта выполняют путем анализа профиля температуры на поверхности образца. Для этого набор значений температуры в отдельных точках поверхности преобразуют в графическое изображение температурного поля. Над дефектным участком полученный график функции температуры имеет характерный профиль с максимальной амплитудой в центральной точке дефекта.

В англоязычных источниках описан способ определения размера дефекта, обозначаемый аббревиатурой FWHM – «Full Width Half Maximum» [114]. Ширина дефекта измеряется по положению проекции точки, соответствующей половине высоты максимального температурного перепада. Этот способ оценки дает приемлемые результаты, однако для некоторых материалов оценка размера дефекта получается заниженной. Описаны адекватные результаты определения размеров расслоений в углепластиковых композитных материалах и коррозии стальных пластин.

В.П. Вавилов и В.В. Ширяев [14] показали, что экстремумы производных от температуры по любой из поверхностных координат  $dT/dx$  в точности соответствуют проекциям границ внутренних дефектов на контролируемую поверхность. На рисунке 43 показан пример расчетного профиля, полученного для дефекта радиусом  $r_d = 1$  мм на глубине 0,5 мм и высоте дефекта 0,2 мм, в изделии из алюминия при импульсном воздействии теплового потока  $1 \text{ МВт/м}^2$ . Причем для алюминия точные оценки размеров дефекта имеют место при малых временах ( $\tau_1$ ) на-

блюдения (менее 0,01 с), в то время как при больших временах ( $\tau_2$ ) происходит существенное расплывание температурного отпечатка.

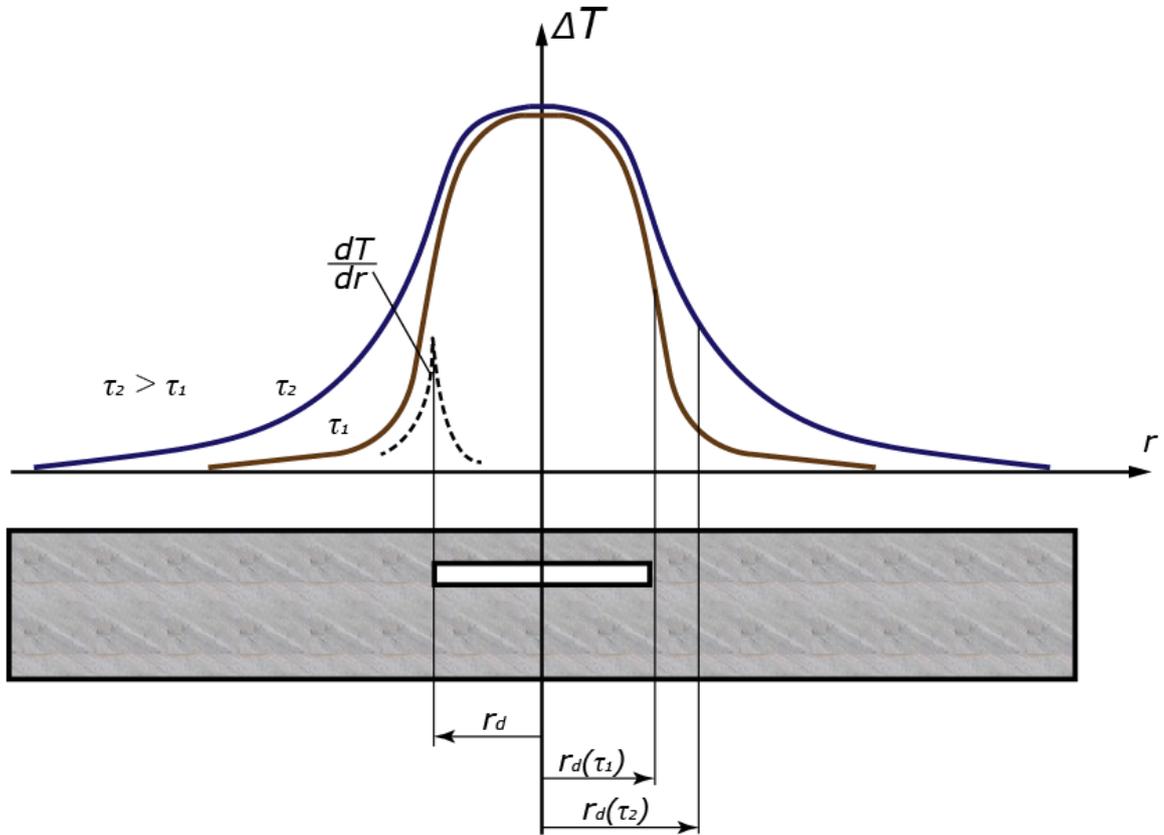


Рисунок 43 – Нормализованные профили температуры над воздушным дефектом в алюминиевой пластине

Выполним решение задачи для различных режимов нагрева и времен наблюдения в программном пакете GNU Octave методом конечных разностей с использованием программного модуля «Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля» [96].

Размеры пластины (см. рисунок 13) и теплофизические характеристики образца соответствуют таблице 7. Рассматривается пластина с одним расслоением,  $d_{23} = 0, \delta_{23} = 0, d_{12} = d, \delta_{12} = \delta$ .

Начальная температура пластины  $T_0=20^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды  $t_{\text{окр}}=20^\circ\text{C}$ .

В различных вариантах решения диаметр воздушного зазора  $d$  принимается равным 5 мм и 10 мм, мощность теплового потока нагрева  $q_{\text{изл}}$  составляет 10 кВт/м<sup>2</sup>, 30 кВт/м<sup>2</sup> и 100 кВт/м<sup>2</sup>.

Нагрев и измерение температуры выполняются со стороны дефекта. Время нагрева и шаг расчета выбираются в зависимости от величины мощности теплового потока.

В различных вариантах решения диаметр воздушного зазора  $d$  принимается равным 5 мм и 10 мм, мощность теплового потока нагрева  $q_{\text{изл}}$  составляет 10 кВт/м<sup>2</sup>, 30 кВт/м<sup>2</sup> и 100 кВт/м<sup>2</sup>.

На рисунке 44 представлены графики распределения температуры по поверхности пластины со стороны дефекта при  $d = 5$  мм,  $q_{\text{изл}} = 100$  кВт/м<sup>2</sup>. Время нагрева  $\tau_1=1$  с, шаг расчета 0,01 с. Выполнены расчеты для времени наблюдения  $\tau_1=1$  с (после нагрева, график  $T_1$ ) и  $\tau_2=1,5$  с (после охлаждения на воздухе, график  $T_2$ ).

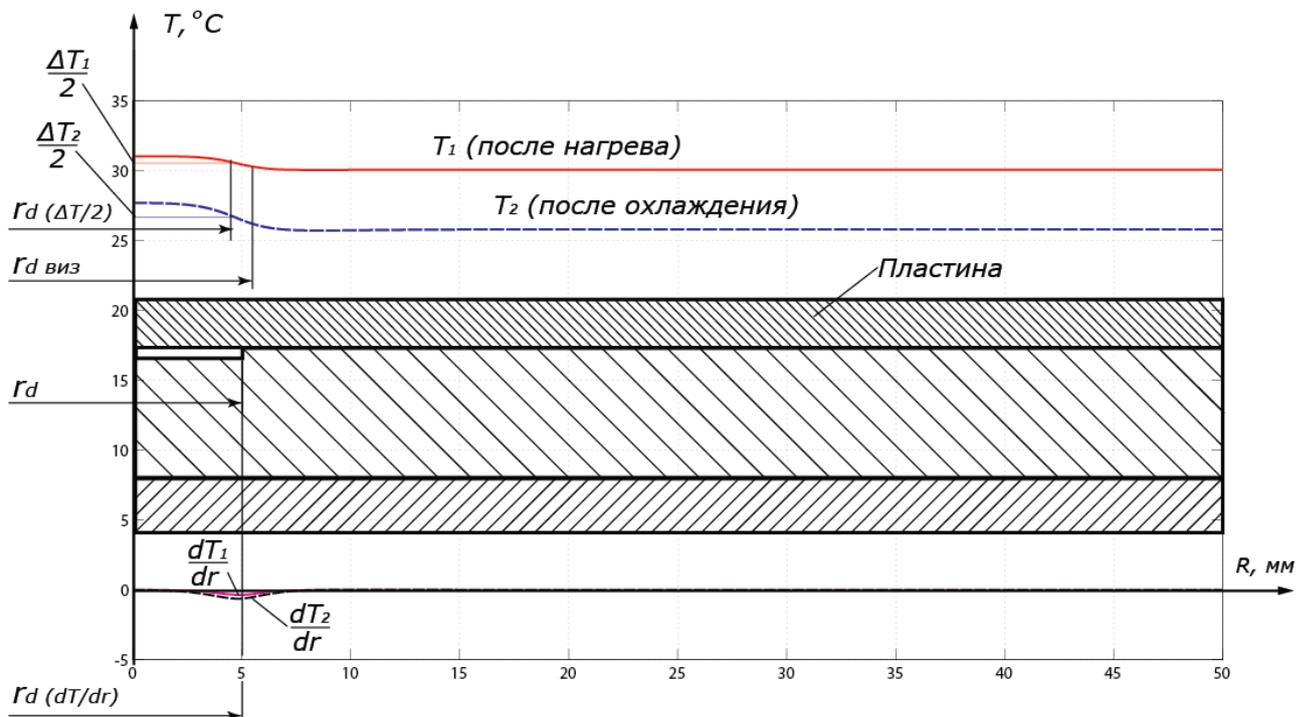


Рисунок 44 – Определение радиуса дефекта на основе анализа профиля температуры

Определены точки, соответствующие половине высоты амплитуды изменения температуры  $\frac{\Delta T_1}{2}$  (после нагрева) и  $\frac{\Delta T_2}{2}$  (после охлаждения).

Также показаны графики производных функции распределения температуры  $\frac{\partial T_1}{\partial r}$  (после нагрева) и  $\frac{\partial T_2}{\partial r}$  (после охлаждения).

Видно, что проекции экстремума производной  $r_d \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)$  точно соответствуют радиусу дефекта  $r_d$  как при наблюдении после нагрева, так и после охлаждения. В то же время радиус дефекта, определенный по проекции половины высоты амплитуды температуры  $r_d \left( \frac{\Delta T}{2} \right)$ , меньше фактического размера дефекта в обоих случаях. При визуальной оценке радиус дефекта  $r_{d \text{ виз}}$  превышает фактический.

На рисунке 45 представлены графики распределения дифференциального температурного сигнала  $\Delta T_1$  (после нагрева) и  $\Delta T_2$  (после охлаждения). При расчете значений температурного сигнала в качестве температуры бездефектной зоны используется значение  $T_i$  в точке  $r_i = R$ . Построены графики производных функции температурного сигнала  $\frac{\partial(\Delta T_1)}{\partial r}$  (после нагрева) и  $\frac{\partial(\Delta T_2)}{\partial r}$  (после охлаждения), определены проекции характерных точек для оценки радиуса дефекта.

Можно установить, что проекция экстремума производной  $r_d \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)$  точно соответствуют радиусу дефекта  $r_d$  как при наблюдении после нагрева, так и после охлаждения. Радиус дефекта, определенный по проекции половины высоты амплитуды температуры  $r_d \left( \frac{\Delta T}{2} \right)$ , меньше фактического размера дефекта в обоих случаях. Радиус дефекта  $r_{d \text{ виз}}$ , соответствующий визуальной оценке, превышает фактический на 25–30%.

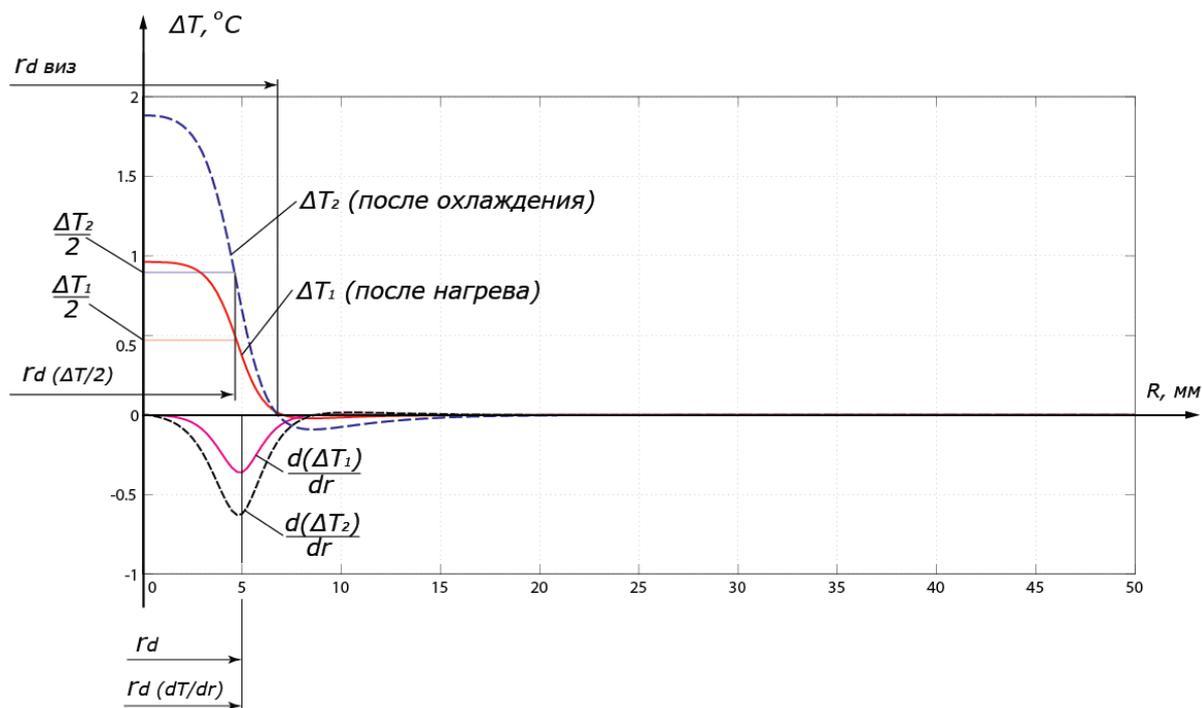


Рисунок 45 – Определение радиуса дефекта на основе анализа профиля дифференциального температурного сигнала

Оценки радиуса дефекта различными способами соответствуют оценкам, полученным при анализе профиля распределения температуры (см. рисунок 44), но переход к дифференциальному температурному сигналу позволяет более наглядно представить результаты проведенных вычислений.

В таблице 8 представлены результаты моделирования теплового состояния для различных значений мощности теплового потока, времени нагрева и охлаждения.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что оценка радиуса дефекта по проекции экстремума производной температуры и дифференциального температурного сигнала обеспечивает точное определение размера дефекта на используемой модели при различных параметрах режима нагрева.

Таблица 8 – Результаты моделирования

Тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>	Время нагрева, с	Время наблюдения, с	Шаг, с	$r_d$ , мм	$r_d \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ , мм	$r_d \left( \frac{\Delta T}{2} \right)$ , мм
10000	30	30	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	35	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	45	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	30	0,1	10,0	10,0	9,0
	30	35	0,1	10,0	10,0	8,75
	30	45	0,1	10,0	10,0	8,75
30000	5	5	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	10	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	15	0,1	5,0	5,0	4,75
	5	5	0,1	10,0	10,0	9,25
	5	10	0,1	10,0	10,0	8,50
	5	15	0,1	10,0	10,0	8,25
	30	30	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	35	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	45	0,1	5,0	5,0	4,75
	30	30	0,1	10,0	10,0	9,0
	30	35	0,1	10,0	10,0	8,75
	30	45	0,1	10,0	10,0	8,75
100000	1	1	0,01	5,0	5,0	4,75
	1	0,5	0,01	5,0	5,0	4,75
	1	6	0,01	5,0	5,0	4,5
	1	1	0,01	10,0	10,0	10,0
	1	0,5	0,01	10,0	10,0	10,0
	1	6	0,01	10,0	10,0	9,0
	2	2	0,01	5,0	5,0	5,0
	2	3	0,01	5,0	5,0	4,75
	2	10	0,01	5,0	5,0	4,75
	2	2	0,01	10,0	10,0	9,75
	2	3	0,01	10,0	10,0	9,5
	2	10	0,01	10,0	10,0	8,5

Определение радиуса дефекта по проекции точки, соответствующей половине максимального температурного перепада приводит к занижению размера

дефекта. При малых временах наблюдения оценка более точная (отклонение в большинстве случаев не превышает одного радиального шага расчетной сетки), а при увеличении времени охлаждения величина отклонения растет [76].

#### 4.4. Исследование влияния сочетания дефектов на величину температурного сигнала на поверхности пластины

Для многослойных композитных конструкций распространенным дефектом является появление расслоений разных размеров, расположенных одно над другим, в соседних слоях материала. При этом дефект, расположенный ближе к поверхности, на которой производится измерение температуры, может «затенять» более глубокий. Определение размеров дефектов в подобных случаях затруднительно, поскольку сигнал от более глубокого дефекта может быть менее выраженным и его сложно будет различить на фоне сигнала от основного дефекта [121, 150].

Рассмотрим пластину с двумя расслоениями (см. рисунок 13), основные размеры и теплофизические характеристики которой соответствуют таблице 7.

Мощность теплового потока нагрева  $q_{\text{изл}}$  составляет  $10 \text{ кВт/м}^2$ . Начальная температура пластины равна температуре окружающей среды  $T_0 = t_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$ .

Время наблюдения при нестационарном нагреве  $\tau_1 = 30 \text{ с}$ , метод расчета – фиксированный шаг с числом шагов 300 (шаг расчета составил 0,1 с).

Моделирование проведено поочередно для пластин с одним дефектом ( $d_{12} = 10 \text{ мм}$ ,  $\delta_{12} = 0,2 \text{ мм}$  и  $d_{23} = 15 \text{ мм}$ ,  $\delta_{23} = 0,2 \text{ мм}$  соответственно), затем для пластины с двумя дефектами, для вариантов значений  $d_2$ , равных 15, 30 и 50 мм.

Расчеты проведены в программном пакете Agros2D методом конечных элементов для различных положений источника нагрева.

Для каждой пластины нагрев задается поочередно на верхней и нижней стенке, измерение температуры производится также на верхней и нижней стенке для каждого варианта нагрева. Запись значений температуры выполняется на последнем шаге расчета.

Для вычисления дифференциального температурного сигнала (26) используется распределение температуры по поверхности аналогичной пластины без дефектов при тех же условиях нагрева и регистрации температуры.

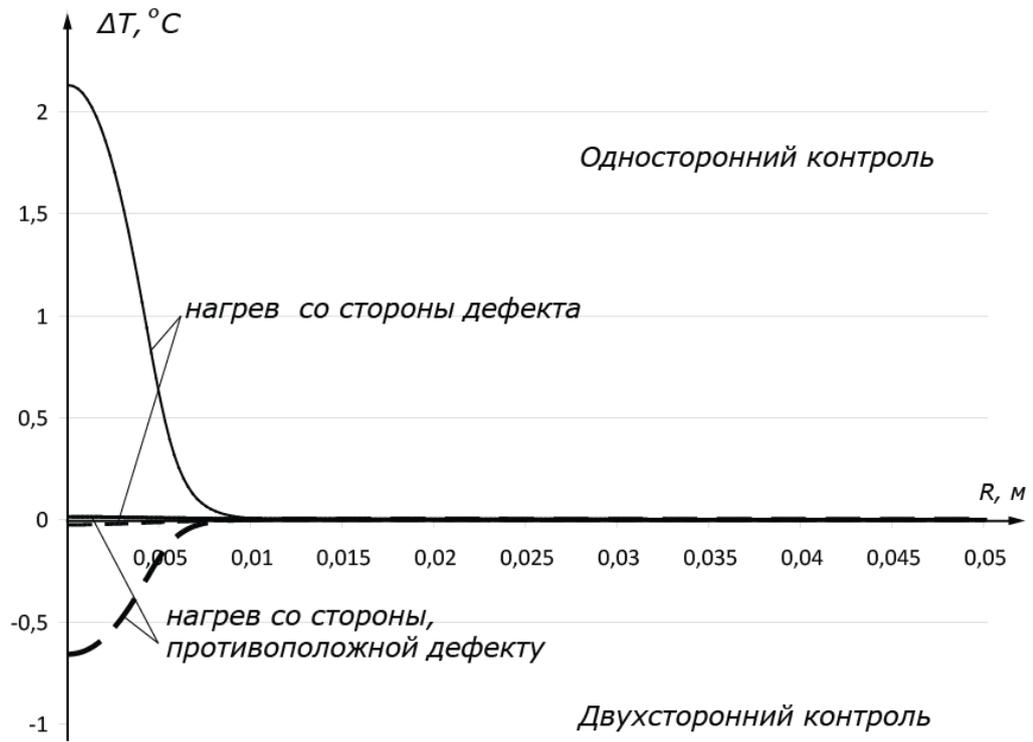
По результатам моделирования для всех вариантов эксперимента определены значения дифференциального температурного сигнала в точках поверхности на верхней и нижней стенке пластины и построены графики распределения температурного сигнала.

На рисунке 46 показано распределение температурного сигнала по поверхности пластины с одним дефектом  $d_{12} = 10$  мм (рисунок 46, а) и  $d_{23} = 30$  мм (рисунок 46, б).

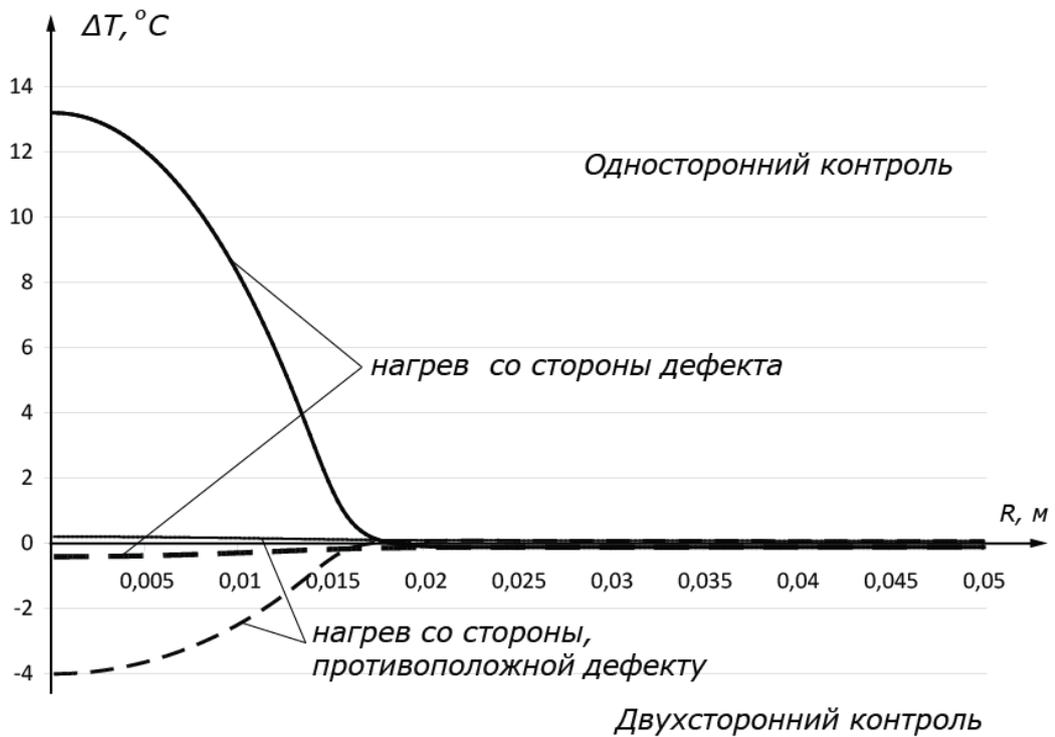
При нагреве и измерении температуры со стороны дефекта (односторонний контроль) в обоих случаях наблюдается локальный перегрев ( $\Delta T > 0$ ), а при измерении с другой стороны пластины (двухсторонний контроль) – понижение температуры ( $\Delta T < 0$ ). Ширина сегмента кривой, соответствующего локальному температурному перепаду увеличивается при увеличении поперечного размера дефекта для обоих вариантов нагрева. Величина полезного сигнала увеличивается при увеличении диаметра дефекта. Наиболее информативным в обоих вариантах является температурный сигнал со стороны дефекта при одностороннем контроле. При нагреве и измерении со стороны, противоположной дефекту, температурный сигнал слабо выражен.

На рисунке 47 представлены графики распределения температурного сигнала по поверхности пластины с двумя дефектами:  $d_{12} = 10$  мм,  $d_{23} = 15$  мм (рисунок 47, а) и  $d_{12} = 10$  мм,  $d_{23} = 30$  мм (рисунок 47, б).

При обоих вариантах нагрева во всех случаях наблюдается выраженный температурный сигнал как с верхней, так и с нижней стороны пластины. Амплитуда сигнала больше со стороны дефекта большего диаметра. Сопоставляя значения амплитуды сигнала и ширины сегмента кривой, соответствующей локальному температурному перепаду на одной из поверхностей пластины, можно определить, какой из дефектов находится ближе к этой стороне поверхности.



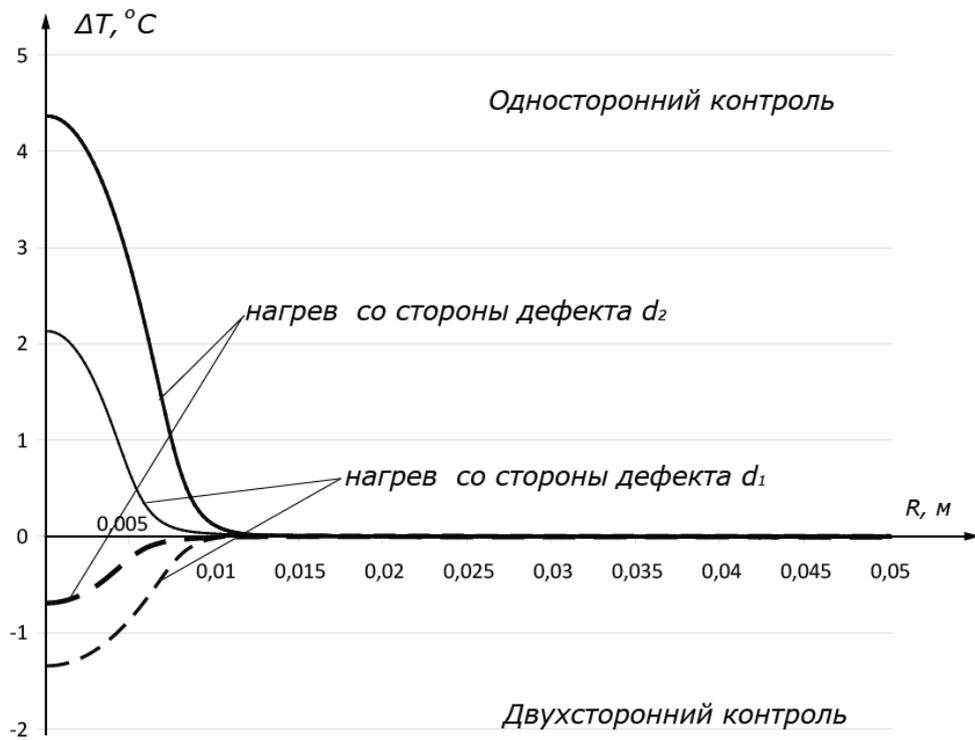
а)



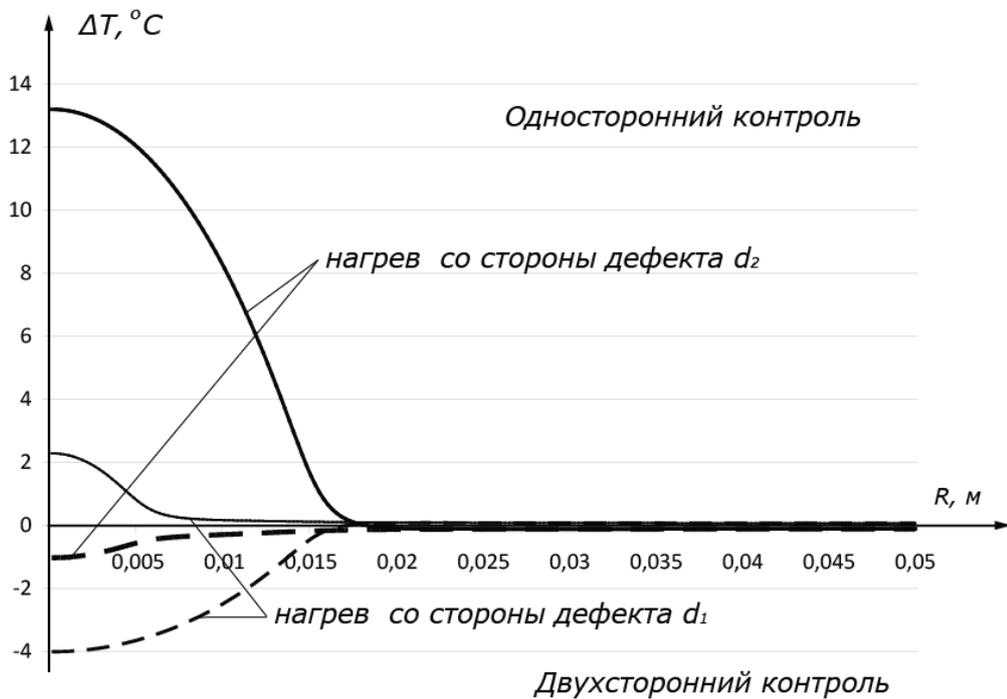
б)

Рисунок 46 – Температурный сигнал для пластин с одним дефектом:

а) при  $d_{12} = 10 \text{ мм}$ ; б) при  $d_{23} = 30 \text{ мм}$



а)



б)

Рисунок 47 – Температурный сигнал для пластин с двумя дефектами:

а) при  $d_1 = 10$  мм и  $d_2 = 15$  мм; б) при  $d_1 = 10$  мм и  $d_2 = 30$  мм

Сопоставим графики распределения температурного сигнала для пластин с одним и двумя дефектами.

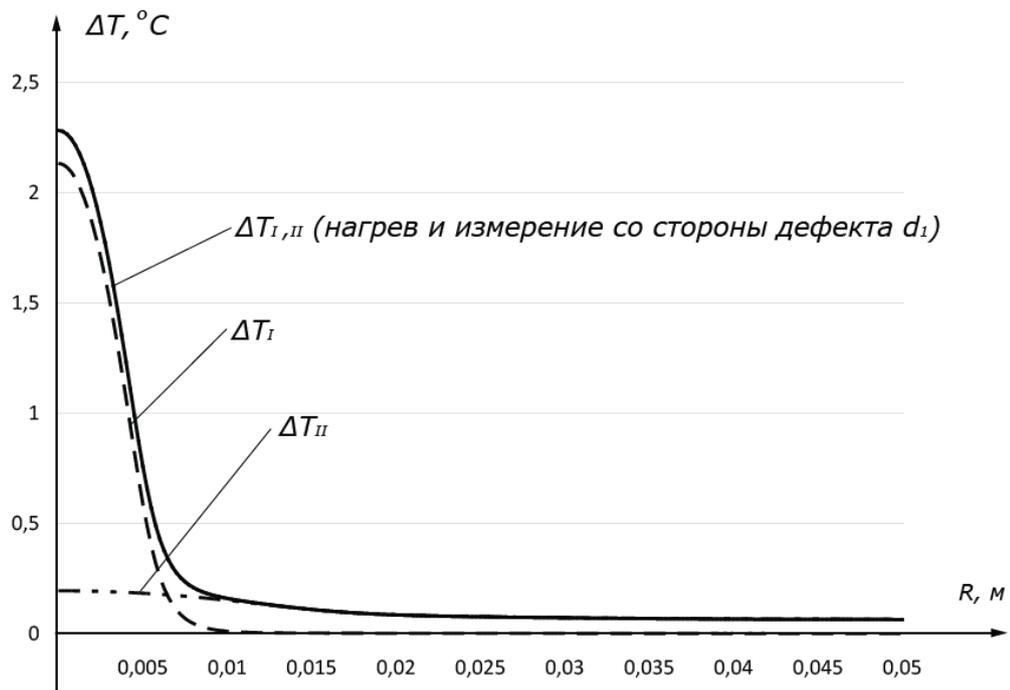
На рисунке 48 представлена картина распределения сигнала по верхней стенке поверхности пластины при одностороннем контроле. Сигнал для пластины с одним дефектом  $d_{12}$  обозначен через  $\Delta T_I$ , для пластины с одним дефектом  $d_{23}$  – через  $\Delta T_{II}$ , для пластины с двумя дефектами – через  $\Delta T_{I, II}$ . Расположение дефектов  $d_{12}$  и  $d_{23}$  соответствует рисунку 12, графики для дефектов  $d_{12} = 10$  мм,  $d_{23} = 30$  мм приведены на рисунке 48, а, для дефектов  $d_{12} = 10$  мм,  $d_{23} = 50$  мм – на рисунке 48, б.

Сумма соответствующих сигналов для пластин с одним дефектом приблизительно равна сигналу для пластины с двумя дефектами (максимальное отклонение  $\varepsilon = \Delta T_{I, II} - (\Delta T_I + \Delta T_{II})$  наблюдается на оси пластины и составляет  $0,045$  °С для  $d_{12} = 10$  мм,  $d_{23} = 50$  мм), что соответствует результатам работы [121].

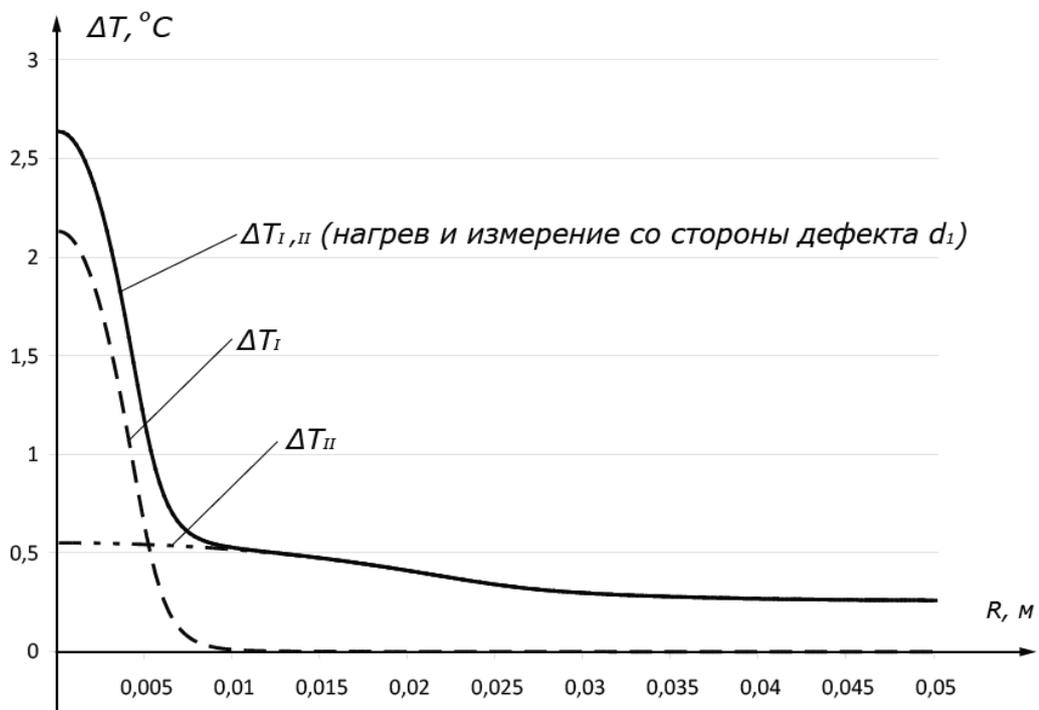
На рисунке 49 приведено сравнение температурных сигналов для пластин с двумя дефектами при различных значениях  $d_{23}$ .

При одностороннем контроле со стороны меньшего дефекта для пластины с  $d_{12} = 10$  мм,  $d_{23} = 50$  мм (рисунок 49, а) можно наблюдать второй локальный перепад температуры меньшей амплитуды, соответствующий дефекту  $d_{23}$ . Для пластин с меньшим диаметром  $d_{23}$  подобного эффекта не проявляется. При нагреве и измерении температуры со стороны дефекта  $d_{23}$  (рисунок 49, б) сигнал от дефекта  $d_{12}$  практически незаметен, больший дефект может полностью «затенять» дефект меньшего размера.

Таким образом, данные, полученные в результате моделирования, показывают, что при сочетании дефектов, расположенных один над другим, величина температурного сигнала для пластины с двумя дефектами приближенно равна сумме соответствующих сигналов от одиночных дефектов.



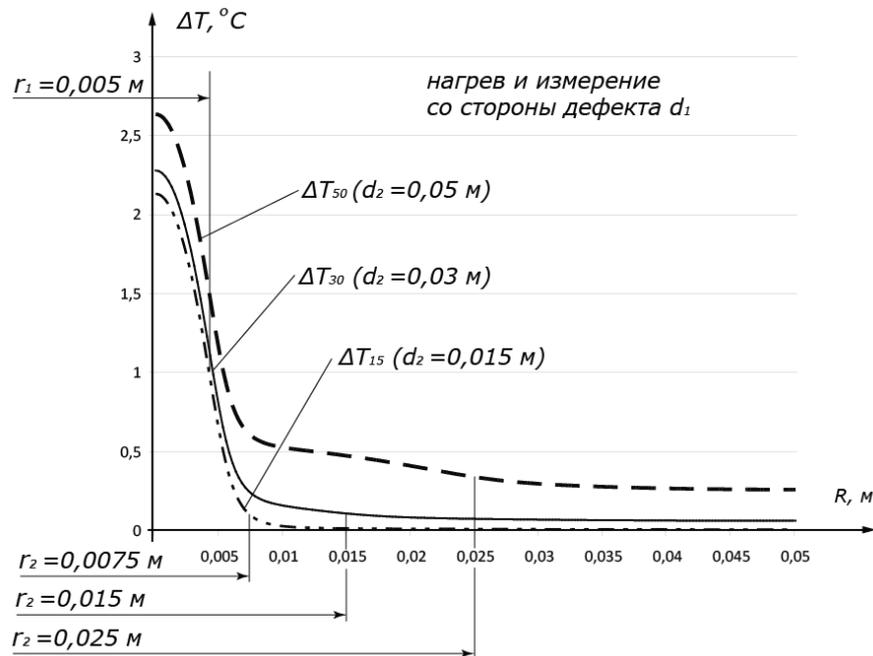
а)



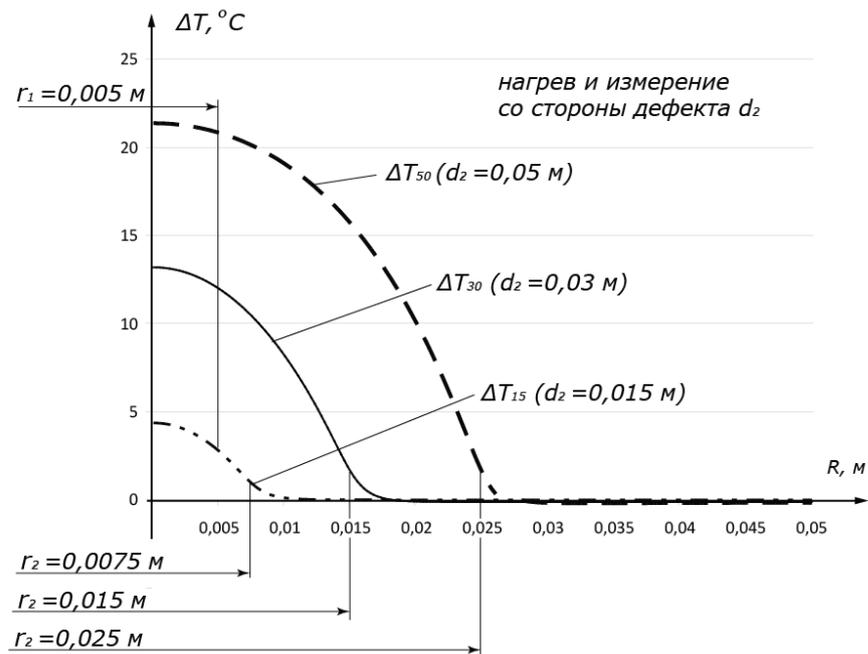
б)

Рисунок 48 – Сравнение температурных сигналов для пластин с одним и двумя дефектами:

а) при  $d_{12} = 10$  мм и  $d_{23} = 30$  мм; б) при  $d_{12} = 10$  мм и  $d_{23} = 50$  мм



а)



б)

Рисунок 49 – Температурный сигнал для пластин с двумя дефектами при различных вариантах расположения устройств нагрева и регистрации температуры:

а) нагрев и измерение со стороны дефекта  $d_{12}$ ;

б) нагрев и измерение со стороны дефекта  $d_{23}$

Анализ температурного поля для пластин с одним и двумя дефектами позволяет сделать вывод, что при двойном расслоении температурные сигналы с обеих сторон пластины имеют выраженную амплитуду при различных вариантах взаимного расположения устройств тепловой стимуляции и регистрации температуры.

Сопоставив параметры температурного сигнала для разных сторон пластины, можно определить, с какой стороны относительно теплораспределительного слоя может быть расположен дефект [46].

#### Выводы по главе 4

Приведенные примеры иллюстрируют влияние различных параметров контролируемых объектов и используемых режимов теплового контроля на величину и характер распределения информативного параметра – дифференциального температурного сигнала. Проведение численных экспериментов способствует определению оптимальных условий выполнения измерений, а также накоплению данных для дальнейшего анализа теплового состояния многослойных пластин с дефектами расслоения.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Повышение эффективности управления промышленными предприятиями, выпускающими продукцию и использующими технологическое оборудование из биметаллических листовых материалов, связано как с вопросами общего характера, так и с особенностями, накладываемыми профилем деятельности данных предприятий. Выполненный анализ используемых на практике подходов, методов и моделей повышения эффективности управления промышленными предприятиями; существующих подходов к выявлению дефектов многослойных биметаллических материалов и систем теплового неразрушающего контроля; математических моделей теплового состояния многослойных материалов при наличии дефектов соединения слоев; методов решения задач теплопроводности, применяемых для их реализации, и современных программных средств, используемых для автоматизации данных процессов, показал, что все эти методы требуют модернизации с привязкой их к современным условиям осуществления производственных процессов данных предприятий.

2. В ходе разработки современного подхода к повышению эффективности управления промышленными предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы,

– предложены концептуальные положения по формированию системы выявления и оценки дефектов биметаллических листовых материалов методами теплового неразрушающего контроля и ее интеграции с информационной системой предприятия для совершенствования управления промышленными предприятиями соответствующего профиля при планировании, организации, контроле, анализе деятельности предприятия и повышении уровня информирования руководителей предприятия в целом и его подразделений;

– создан алгоритм обоснования выбора рационального варианта системы контроля дефектов с учетом особенностей деятельности и специфики организа-

ции производственного процесса конкретного промышленного предприятия, основанный на сочетании методов вербального анализа решений, принципа разделения количественных и качественных показателей, а также способов поэтапного сокращения количества признаков и альтернатив.

3. Разработаны математический, алгоритмический и программный компоненты указанной системы:

- разработана математическая модель теплового состояния трехслойной биметаллической пластины с дефектами в виде воздушной прослойки между металлами, учитывающая условия проведения активного теплового контроля;

- разработана компьютерная программа на языке Matlab, реализующая алгоритм решения задачи по предложенной математической модели методом конечных разностей;

- сформирован комплекс входных данных препроцессора вычислительного пакета Agros2D для реализации моделирования процесса нагрева и охлаждения трехслойной биметаллической пластины с дефектами методом конечных элементов;

- разработана компьютерная программа на языке Matlab для моделирования процесса активного теплового контроля трехслойной биметаллической пластины при наличии дефекта расслоения. В программе реализованы: ввод данных из файла, выполнение расчета температурного поля методом конечных разностей, графическое представление изотермических линий в сечении пластины, распределения абсолютных значений температуры и дифференциального температурного сигнала по поверхности пластины в моменты окончания времени нагрева и охлаждения.

4. Для обеспечения практической реализации разработанных в диссертации подходов, моделей, алгоритмов и программных средств предложены методические рекомендации, описывающие порядок проведения вычислительных экспериментов для исследования влияния размера дефекта, мощности теплового потока и времени нагрева на величину температурного сигнала на поверхности пласти-

ны, определения размера дефекта по полученным данным температурного поля, а также исследования особенностей температурного сигнала на поверхности пластины при сочетании дефектов.

Дальнейшее совершенствование информационных систем для поддержки процессов оценки качества биметаллических листовых материалов с использованием тепловых методов неразрушающего контроля возможно за счет использования методов машинного обучения для классификации дефектов по изображениям термограмм в реальном времени. Однако, переход к применению указанных технологий требует предварительного накопления достаточного объема экспериментальных и модельных данных. Перспективные исследования в этой области могут способствовать разработке более совершенных алгоритмов, моделей, инструментов и методов повышения эффективности управления промышленными предприятиями, связанными с производством продукции и эксплуатацией конструкций из биметаллических материалов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аакер, Д. Стратегическое рыночное управление / Д. Аакер; пер. С. Жильцов. – СПб.: Питер, 2002. – 544 с.
2. Акофф, Р. Л. Планирование будущего корпорации / Р. Л. Акофф. – М.: СИРИН, 2002. – 256 с.
3. Алексеев, Е. Р. Введение в Octave для инженеров и математиков / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова. – М.: ALT Linux, 2012. – 368 с.
4. Алешин, Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений / Н. П. Алешин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2019. – 576 с.
5. Алифанов, О. М. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена / О. М. Алифанов, Е. А. Артюхин, А. В. Ненарокомов. – М.: Янус-К, 2009. – 299 с.
6. Аралов, М. Н. Математические и программные средства моделирования теплового поля твердого тела слоистой структуры / М. Н. Аралов, В. Ф. Барабанов // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 2 (60). – С. 4–8.
7. Бекешко, Н. А. Неразрушающий контроль соединений тепловым методом / Н. А. Бекешко // Дефектоскопия. – 1973. – № 5. – С. 118–121.
8. Берковский, Б. М. Разностные методы исследования задач теплообмена / Б. М. Берковский, Е. Ф. Ноготов. – М.: Наука и техника, 1976. – 143 с.
9. Биметаллический прокат / ред. П. Ф. Засуха. – М.: Металлургия, 1970. – 262 с.
10. Бир, С. Кибернетика и управление производством / С. Бир. – М.: Физматгиз, 1963. – 210 с.
11. Бурков, В. Н. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль / В. Н. Бурков, И. В. Буркова, М. В. Губко; под ред. Д. А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 216 с.

12. Бурков, В. Н. Введение в теорию управления организационными системами / В. Н. Бурков, Н. А. Коргин, Д. А. Новиков. – М.: Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 264 с.

13. Быков, А. А. Развитие производства биметаллов / А. А. Быков // *Металлург.* – 2009. – № 9. – С. 61–64.

14. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – М.: Спектр, 2009. – 544 с.

15. Вавилов, В. П. Тепловизоры и их применения / В. П. Вавилов, А. Г. Климов. – М.: Интел универсал, 2002. – 87 с.

16. Вавилов, В. П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) / В. П. Вавилов // *Дефектоскопия.* – 2017. – № 10. – С. 34–57.

17. Вавилов, В. П. Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) / В. П. Вавилов // *Дефектоскопия.* – 2023. – № 6. – С. 38–58.

18. Винер, Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине / Н. Винер; под ред. Г. Н. Поварова; пер. И. В. Соловьева, Г. Н. Поварова. – 2-е изд. – М.: Наука, 1983. – 344 с.

19. Возможности использования математических моделей для теплового контроля дефектов многослойных биметаллических пластин / Л. Ю. Костылева, О. В. Логиновский, Е. А. Рец, И. М. Ячиков // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника.* – 2022. – Т. 22. – № 1. – С. 53–64.

20. Галдин, Д. А. Применение термографии и моделирования температурных полей в композитных пластинах для неразрушающего контроля / Д. А. Галдин, В. О. Каледин // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2020. – № 11. – С. 83–86.

21. Гастев, А. К. Как надо работать: практическое введение в науку организации труда / А. К. Гастев. – 3-е изд. – М.: URSS Либроком, 2011. – 477 с.

22. Гельруд, Я. Д. Управление проектами: методы, модели, системы: монография. Управление проектами / Я. Д. Гельруд, О. В. Логиновский; под ред. А. Л. Шестакова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 330 с.
23. Глушков, В. М. Кибернетика: Вопросы теории и практики/ В. М. Глушков. – М.: Наука, 1986. – 477 с.
24. Голованенко, С. А. Производство биметаллов / С. А. Голованенко. – М.: Металлургия, 1966. – 304 с.
25. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография: основы, техника, применение. / Ж. Госсорг; под ред. Л.Н. Курбатова; пер. Н.В. Васильченко. – М.: Мир, 1988. – 399 с.
26. ГОСТ 10885–85. Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия (с Изменениями N 1, 2) / Официальное издание. – Электрон. дан. – М.: Стандартинформ, 2019. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200001714> (дата обращения: 28.08.2024). – Текст : электронный.
27. ГОСТ 26629–85. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества. Теплоизоляция ограждающих конструкций. – М. : Стандартинформ, 1985. – 16 с.
28. ГОСТ 27002–2020. Посуда из коррозионностойкой стали. Общие технические условия (с Поправкой) / Официальное издание. – Электрон. дан. – М.: Стандартинформ, 2021. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177678> (дата обращения: 05.11.2021). – Текст : электронный.
29. ГОСТ Р 53698–2009. Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.
30. ГОСТ Р 56511-2015 Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования / Официальное издание. – Электрон. дан. – М.: Стандартинформ, 2015. – 12 с. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200122219> (дата обращения: 28.08.2024). – Текст : электронный.
31. ГОСТ Р ИСО 18434-1–2013 Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 1. Общие методы (Переиздание) / Официальное издание. –

Электрон. дан. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107555?section=status> (дата обращения: 08.11.2024). – Текст : электронный.

32. ГОСТ Р ИСО 18434-2–2021 Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 2. Интерпретация термограмм и диагностирование / Официальное издание. – Электрон. дан. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200179734?section=status> (дата обращения: 08.12.2024). – Текст : электронный.

33. Денисов, М. А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование / М.А. Денисов. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. – 149 с.

34. Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля / Д. Ю. Головин, А. И. Тюрин, А. А. Самодуров, и др. – М. : Техносфера, 2019. – 214 с. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/99112.html> (дата обращения: 01.11.2024). – Текст : электронный.

35. Дубицкий, С. Д. ELCUT – универсальная программа расчета магнитных, электрических, тепловых и упругих полей методом конечных элементов / С.Д. Дубицкий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S1. – С. 325–330.

36. Есьман, Р. И. Компьютерное моделирование тепловых процессов в многослойных композиционных структурах / Р.И. Есьман, В.Ф. Шевцов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2006. – № 5. – С. 62–67.

37. Жуков, Н. П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова. – М.: Машиностроение - 1, 2004. – 287 с.

38. Зенкевич, О. К. Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. / О. К. Зенкевич; под ред. Б. Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

39. Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения / З.Г. Салихов и др. – М.: Изд. дом МИСиС, 2008. – 475 с.

40. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
41. Калиткин, Н. Н. Численные методы. / Н. Н. Калиткин; под ред. А.А. Самарского. – 2-е изд., испр. – СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 586 с.
42. Карслоу, Г. С. Теплопроводность твердых тел: / Г. С. Карслоу, Д. Егер; под ред. А. А. Померанцева. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
43. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
44. Ковтун, В. А. Обзор современных прикладных программных комплексов для проведения исследований композитных изделий / В. А. Ковтун, С. Г. Короткевич // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 1. – С. 258–266.
45. Козлов, В. П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В. П. Козлов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 390 с.
46. Костылева, Л. Ю. Мониторинг дефектов расслоения в многослойной биметаллической пластине методом теплового контроля / Л.Ю. Костылева, О.В. Логиновский, И.М. Ячиков. – Текст : электронный. – Челябинск : Издательский центр Южно-Уральского государственного университета, 2024. – С. 287–295. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68530781> (дата обращения: 22.08.2024).
47. Костылева, Л. Ю. Моделирование нестационарной теплопередачи в многослойной биметаллической пластине / Л.Ю. Костылева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 68–79.
48. Костылева, Л. Ю. Моделирование теплового состояния многослойных биметаллических пластин / Л. Ю. Костылева // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022: труды Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 года. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 354–360.

49. Костылева, Л. Ю. Применение комплексного подхода к обоснованию выбора системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового контроля / Л. Ю. Костылева // Системы управления и информационные технологии. – 2024. – № 3 (97). – С. 38–43.

50. Костылева, Л. Ю. Программные средства для моделирования теплового состояния многослойных биметаллических пластин / Л. Ю. Костылева // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук : Материалы 75-й научной конференции, Челябинск, 11–12 апреля 2023 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. – С. 284–290.

51. Кох, Р. Стратегия. Как создавать и использовать эффективную стратегию / Р. Кох. – СПб.: Питер, 2003. – 320 с.

52. Кудинов, В. А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников. – М.: Высш. шк., 2005. – 409 с.

53. Кузнецов, Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. – Томск: Издательство Томского университета, 2007. – 172 с.

54. Кухонная посуда из многослойных коррозионностойких материалов / П. Ф. Засуха, А. А. Ершов, А. С. Мыльников, и др. // Сталь. – 1981. – № 11. – С. 4–5.

55. Ларичев, О. И. Вербальный анализ решений / О. И. Ларичев. – М.: Наука, 2006. – 181 с.

56. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах / О. И. Ларичев. – М.: Логос, 2003. – 390 с.

57. Логиновский, О. В. Корпоративное управление: в 5 т. Т. 2 / О. В. Логиновский, А. А. Максимов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 624 с.

58. Логиновский, О. В. Управление промышленным предприятием : в 5 т. Т. 1 / О. В. Логиновский, А. А. Максимов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 576 с.

59. Логиновский, О. В. Управление и стратегии / О. В. Логиновский. – Оренбург: Издательство Оренбургского гос. университета. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2001. – 704 с.

60. Лотов, А. В. Многокритериальные задачи принятия решений / А. В. Лотов, И. И. Поспелова. – М.: Макс-Пресс, 2008. – 196 с.

61. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

62. Математические модели для исследования теплового состояния тел и управления тепловыми процессами / О. С. Логунова, Е. Б. Агапитов, И. И. Баранкова [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 2 (43). – С. 25–34.

63. Математическое и алгоритмическое обеспечение системы мониторинга дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового контроля / А. В. Голлай, Л. Ю. Костылева, О. В. Логиновский, И. М. Ячиков // Системы управления и информационные технологии. – 2024. – № 1 (95). – С. 68–73.

64. Материаловедение. Технология композиционных материалов / А. Г. Кобелев, М. А. Шаронов, О. А. Кобелев, В. П. Шаронова. – М.: Компания КноРус, 2016. – 270 с.

65. Метод бесконтактного неразрушающего контроля толщин слоев двухслойных изделий и анализ теплофизических процессов в биметаллах / А. П. Пудовкин, В. Н. Чернышов, Ю. В. Плужников, А. В. Колмаков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8. – № 2. – С. 190–200.

66. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/600208> (дата обращения: 27.08.2024). – Текст : электронный.

67. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опас-

ных производственных объектах (РД-13-04–2006). Серия 28. Выпуск 11. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010. – 32 с.

68. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция), утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем России [Электронный ресурс]. – М.: Экономика, 2000. – URL: <https://niec.ru/MethodredMR.pdf> (дата обращения: 27.08.2024). – Текст : электронный.

69. Методы и модели исследования теплового состояния многослойных материалов / О. В. Логиновский, А. В. Голлай, Л. Ю. Костылева, И. М. Ячиков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. – 166 с.

70. Минцберг, Г. Школы стратегий / Г. Минцберг, Б. Альстрэнд, Дж. Лэмпел. – СПб.: Питер, 2002. – 336 с.

71. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. Неразрушающий контроль и диагностика / под ред. В. В. Клюева. – 2. изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.

72. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 500 с.

73. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде. Количественный подход / В. Д. Ногин. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Физматлит, 2005. – 176 с.

74. ОДМ 218.7.2.001–2021 Методические рекомендации по дистанционному определению наличия и степени развития усталостных трещин в элементах металлических пролетных строений автодорожных мостов (включая ортотропные плиты) методом инфракрасной термографии [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/727698157> (дата обращения: 08.11.2024). – Текст : электронный.

75. Определение параметров дефекта расслоения биметаллической пластины посредством активного теплового неразрушающего контроля / О. В. Логиновский, Л. Ю. Костылева, А. А. Максимов, И. М. Ячиков // Вестник Южно-

Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 37–51.

76. Определение поперечных размеров дефектов расслоения биметаллической пластины при активном тепловом неразрушающем контроле / Л. Ю. Костылева, Г. И. Волович, С. Г. Некрасов, Е. А. Рец // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2023. – Т. 23. – № 2. – С. 102–110.

77. Петровский, А. Б. Многокритериальный выбор с уменьшением размерности пространства признаков: многоэтапная технология ПАКС / А. Б. Петровский, Г. В. Ройзензон // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – № 4. – С. 88–103.

78. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – М.: Энергия, 1976. – 349 с.

79. Способ непрерывного контроля толщины слоев и пористости металлического каркаса четырехслойного металлофторопластового ленточного материала: пат. 2290604 Рос. Федерация / Ю.В. Плужников, А.В. Колмаков, А.П. Пудовкин [и др.]. № 2005100895/28; заявл. 26.06.2006; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36. 8 с.

80. Повышение эффективности деятельности промышленных предприятий, связанных с производством и использованием биметаллических листовых материалов / А. В. Голлай, Л. Ю. Костылева, К. А. Коренная, О. В. Логиновский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2023. – Т. 23. – № 4. – С. 76–88.

81. Подиновский, В. В. Анализ решений в условиях неопределенности при нечисловом оценивании предпочтений и вероятностей / В. В. Подиновский // Проблемы управления. – 2020. – № 1. – С. 48–58.

82. Способ обнаружения дефектов в многослойных объектах: а.с. № 699410 А1 СССР, МПК G01N 25/72, / Ю. А. Попов, А. Е. Карпельсон, А. А. Кеткович [и др.], № 2059532; заявл. 11.09.1974; опубл. 25.11.1979. Бюл. № 43. 3 с.

83. Попов, Ю. А. Тепловой контроль качества многослойных изделий / Ю.А. Попов, А. Е. Карпельсон, В. А. Строков // Дефектоскопия. – 1976. – № 3. – С. 76–81.

84. Практика применения теплового неразрушающего контроля при энергетических обследованиях многоквартирных жилых домов / Е.Л. Алексеева, К.И. Ерёмин, Е.П. Комов [и др.] // Наука и безопасность. – 2013. – № 4 (9). – С. 93–125.

85. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 1 / под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.

86. Производство металлических слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев, [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.

87. Райс-Джонстон, У. Тактический менеджмент: методы управления в меняющемся мире / У. Райс-Джонстон. – СПб.: Питер, 2001. – 665 с.

88. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник / под ред. К. М. Великанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение Ленингр. отд-ние, 1989. – 445 с.

89. Решение задач теплообмена. ANSYS 5.7 Thermal Analysis Guide: пер. с англ. / пер. В. П. Югова. – М.: CADFEM, 2001. – 108 с.

90. Рябов, В. Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминиевых соединений / В. Р. Рябов. – М.: Metallургия, 1975. – 287 с.

91. Саати, Т. Л. Принятие решений: Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати; пер. Р. Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.

92. Савин, И. А. Производство слоистых листов и лент с использованием холодного плакирования / И.А. Савин, А.В. Хайруллин // Наука и современность. – 2017. – № 1 (11). – С. 185–199.

93. Слоистые металлические композиции / под ред. И. Н. Потапова. – М.: Metallургия, 1986. – 215 с.

94. Сони, С. Межслойные эффекты в композитных материалах / С. Сони, А. Ванг, Н. Пэйгано; под ред. Ю. М. Тарнопольского, В. Д. Протасова; пер. Н. П. Жмудь, В. Л. Кулакова. – М.: Мир, 1993. – 344 с.

95. Теория управления (дополнительные главы) / под ред. Д. А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 552 с.

96. Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля / И. М. Ячиков, Л. Ю. Костылева, О. В. Логиновский, А. В. Голлай // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619943; заявл. № 2024618152 от 17.04.2024 : опубл. 02.05.2024.

97. Тепловой метод диагностики расслоений в биметаллах / А. П. Пудовкин, В. Н. Чернышов, А. В. Колмаков, Ю. В. Плужников // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9. – № 2. – С. 177–185.

98. Тепловой неразрушающий контроль зданий и строительных сооружений / О. Н. Будадин, Е. В. Абрамова, М. А. Родин, О. В. Лебедев // Дефектоскопия. – 2003. – № 5. – С. 77–94.

99. Тепловой неразрушающий контроль изделий: науч.-метод. пособие / под ред. О. Н. Будадина. – М.: Наука, 2002. – 473 с.

100. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: МГУ, 2004. – 744 с.

101. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: монография / О. В. Логиновский, А. А. Максимов, В. Н. Бурков, [и др.]; под ред. О. В. Логиновского, А. А. Максимова. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.

102. Файоль, А. Общее и промышленное управление / А. Файоль; пер. Б. В. Бабина-Кореня. – М.: Центральный институт труда, 1923. – 122 с.

103. Хадсон, Р. Д. Инфракрасные системы / Р. Д. Хадсон; под ред. Н. В. Васильченко; пер. Я. Б. Герчикова. – М.: Мир, 1972. – 534 с.

104. Черепанов, Г. П. Механика разрушения композиционных материалов / Г. П. Черепанов. – М.: Наука, 1983. – 296 с.

105. Шеер, А.-В. Индустрия 4.0: от прорывной бизнес-модели к автоматизации бизнес-процессов / А.-В. Шеер. – М.: Дело, 2020. – 270 с.
106. Шелдрейк, Дж. Теория менеджмента: от тейлоризма до японизации / Дж. Шелдрейк; пер. В. А. Спивак. – СПб.: Питер, 2001. – 352 с.
107. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. – М.: Мир, 1988. – 544 с.
108. Ширяев, В. И. Алгоритмы управления фирмой / В. И. Ширяев, И. А. Баев, Е. В. Ширяев. – М.: URSS, 2009. – 223 с.
109. Ширяев, В. И. Принятие решений. Прогнозирование в глобальных системах / В. И. Ширяев, Е. В. Ширяев. – М.: URSS, 2009. – 172 с.
110. Ширяев, В. И. Управление бизнес-процессами / В. И. Ширяев, Е. В. Ширяев. – М.: Финансы и статистика, 2014. – 464 с.
111. Эффективное управление организационными и производственными структурами / О. В. Логиновский, А. В. Голлай, О. И. Дранко, [и др.]. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 450 с.
112. Ячиков, И. М. Математическое моделирование теплофизических процессов / И. М. Ячиков, О. С. Логунова, И. В. Портнова. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – 175 с.
113. Agros Suite. – URL: <http://www.agros2d.org> (date accessed: 27.08.2024). – Text : electronic.
114. Almond, D. P. Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment / D. P. Almond, S. K. Lau // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1994. – Vol. 27. – № 5. – P. 1063–1069.
115. Almond, D. P. Edge effects and defect sizing by transient thermography / D. P. Almond, S. Saintey, S. K. Lau. // *Proceedings of Quantitative InfraRed Thermography QIRT'94, Eurotherm Seminar*. – 1994. – P. 247–252. – URL: <http://qirt.org/archives/qirt1994/papers/037.pdf> (date accessed: 26.11.2024). – Text : electronic.
116. Analytical and numerical solutions of two-dimensional problems of heat conduction and electronic optics / G. I. Kurbatova, E. M. Vinogradova // *Vestnik of*

Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. – 2021. – Vol. 17. – № 4. – P. 345–352.

117. Automated defect classification in infrared thermography based on a neural network / Yu. Duan, Sh. Liu, C. Hu, et al. // NDT & E International. – Elsevier, 2019. Vol. 107. – P. 102147.

118. Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography / A. O. Chulkov, V. P. Vavilov, B. I. Shagdyrov, D. Yu. Kladov // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2023. – Vol. 42. – № 1. – P. 20.

119. Balageas, D. L. Pulsed photothermal modeling of layered materials / D. L. Balageas, J. C. Krapez, P. Cielo // Journal of Applied Physics. – 1986. – Vol. 59. – № 2. – P. 348–357.

120. Batsale, J. C. Extension de la méthode des quadripôles thermiques à l'aide de transformations intégrales—calcul du transfert thermique au travers d'un défaut plan bidimensionnel / J. C. Batsale, D. Maillet, A. Degiovanni // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1994. – Vol. 37. – № 1. – P. 111–127.

121. Bendada, A. Non destructive transient thermal evaluation of laminated composites: discrimination between delaminations thickness variations and multidelaminations / A. Bendada, D. Maillet, A. Degiovanni // Proceedings of the 1992 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography 1992 Quantitative InfraRed Thermography. – QIRT Council, 1992. – Nondestructive transient thermal evaluation of laminated composites. – URL: <http://qirt.org/archives/qirt1992/papers/033.pdf> (date accessed: 27.08.2024). – Text : electronic.

122. Developing methodology of pulsed thermal NDT of materials: Step-by-step analysis of reference samples / M. Z. Umar, I. Ahmad, V. P. Vavilov [et al.] // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2008. – Vol. 13. – № 06. – URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=5942&msgid=0&rootID=0> (date accessed: 27.08.2024). – Text : electronic.

123. Field Precision: thermal transport in solids and biological media. – URL: <https://www.fieldp.com/thermal.html> (date accessed: 04.12.2024). – Text : electronic.
124. GNU Octave. – URL: <http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter> (date accessed: 27.08.2024). – Text : electronic.
125. Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation, Second Edition / C. Hellier. – McGraw Hill Professional, 2012. – 724 p.
126. Ibarra-Castanedo, C. Thermographic Image Processing for NDT / C. Ibarra-Castanedo, A. Bendada, X. Maldague // IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires - Octubre 2007. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/254738827> (date accessed: 26.09.2024). – Text : electronic.
127. Inspecting thermal barrier coatings by IR thermography / P. G. Bison, S. Marinetti, E. G. Grinzato [et al.] // Thermosense XXV Thermosense XXV. – SPIE, 2003. – Vol. 5073. – P. 318–327. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5073/0000/Inspecting-thermal-barrier-coatings-by-IR-thermography/10.1117/12.486019.full> (date accessed: 27.08.2024) . – Text : electronic.
128. INTEGRATED Engineering Software. – URL: <https://www.integratedsoft.com/> (date accessed: 04.11.2024). – Text : electronic.
129. Krapez, J. C. Thermographic nondestructive evaluation: Data inversion procedures Part I: 1-D analysis / J. C. Krapez, P. Cielo // Research in Nondestructive Evaluation. – 1991. – Vol. 3. – № 2. – P. 81–100.
130. Krapez, J.-C. Thermographic nondestructive evaluation: Data inversion procedures. Part II: 2-D analysis and experimental results / J.-C. Krapez, X. Maldague, P. Cielo // Research in Nondestructive Evaluation. – 1991. – Vol. 3. – № 2. – P. 101–124.
131. Maldague, X. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing / X. Maldague. – Wiley, 2001. – 716 p.
132. Maple – The Essential Tool for Mathematics – Maplesoft. – URL: <https://www.maplesoft.com/products/maple/> (date accessed: 04.11.2024). – Text : electronic.
133. MATLAB. – URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (date accessed: 04.11.2024). – Text : electronic.

134. Moore, P. O. *Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing*. *Nondestructive Testing Handbook / P. O. Moore*. – American Society for Nondestructive Testing, 2001. – 718 p.

135. *Nondestructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography / E. Grinzato, P. Bison, S. Marinetti, V. Vavilov // Research in Nondestructive Evaluation*. – 1994. – Vol. 5. – № 4. – P. 257–274.

136. *Numerical solution of coupled problems using code Agros2D / P. Karban, F. Mach, P. Kůs [et al.] // Computing*. – 2013. – Vol. 95. – № Suppl. 1. – P. 381–408.

137. *Palumbo, D. Damage Investigation in Composite Materials by Means of New Thermal Data Processing Procedures: Damage Investigation with Stimulated Thermography / D. Palumbo, U. Galietti // Strain*. – 2016. – Vol. 52. – P. 276–285.

138. *Potter, M. C. Schaum's outline of Theory and Problems of Thermodynamics for Engineer / M. C. Potter, C. W. Sommerton*. – McGraw Hill Professional, 1993. – 372 p.

139. *Reutov, Yu. Feasibilities of using the ELCUT software for calculations in nondestructive testing / Yu. Reutov, Yu. Gobov, V. Loskutov // Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2002. – Vol. 38. – № 6. – P. 425–430.

140. *Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nonde-structive testing and evaluation of materials by infrared thermography / C. Ibarra-Castanedo, H. Benitez, X. Maldague, A. Bendada*. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/228417761> (date accessed: 26.09.2024) . – Text : electronic.

141. *SageMath Mathematical Software System – Sage*. – URL: <https://www.sagemath.org/> (date accessed: 04.11.2024). – Text : electronic.

142. *Sause, M. Modeling of NDT Methods Using COMSOL Multiphysics® / M. Sause*. – URL: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-of-ndt-methods-using-comsol-multiphysics> (date accessed: 05.02.2023). – Text : electronic.

143. *Scilab*. – URL: <https://www.scilab.org/> (date accessed: 04.12.2024). – Text : electronic.

144. Sharma, N. A comparative evaluation of Matlab, Octave, Freemath, and Scilab for research and teaching. – URL: <https://userpages.umbc.edu/~gobbert/papers/SharmaGobbertTR2010.pdf> (date accessed: 27.08.2024). – Text : electronic.

145. Simulation Software. Engineering in the Cloud. SimScale. – URL: <https://www.simscale.com/> (date accessed: 27.08.2024). – Text : electronic.

146. The effect of paint coatings on detection of vertical surface cracks in metals by induction thermography / Y. Wang, X. Gao, M. Finckbohrer, U. Netzelmann // *NDT & E International*. – 2019. – Vol. 104. – P. 58–68.

147. Thermal Quadrupoles, Solving the heat equation through integral transforms / D. Maillet, S. André, J.-C. Batsale, [et al.]. – John Wiley and sons, 2000. – 360 p.

148. Thermal tomography characterization and pulse-phase thermography of impact damage in CFRP, or why end users are still reluctant about practical use of transient IR thermography / V. P. Vavilov, S. Marinetti, E. G. Grinzato, P. G. Bison // *Thermosense XX Thermosense XX*. – SPIE, 1998. – Vol. 3361. – P. 275–281. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/3361/0000/10.1117/12.304737.full> (date accessed: 01.12.2024). – Text : electronic.

149. Thermal–numerical model and computational simulation of pulsed thermography inspection of carbon fiber-reinforced composites / F. Lopez, V. de Paulo Nicolau, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2014. – Vol. 86. – P. 325–340.

150. Vavilov, V. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing* / V. Vavilov, D. Burleigh. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – 610 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8 (date accessed: 27.08.2024). – Text : electronic.

151. Vavilov, V. Accuracy issues in modeling thermal NDT problems / V. Vavilov, S. Marinetti, D. Nesteruk // *Proc SPIE*. – 2008. – Vol. 6939.

152. Wolfram Mathematica: Advanced technical computing. – URL: <https://www.wolfram.com/mathematica/> (date accessed: 04.11.2024). – Text : electronic.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А – Алгоритм расчета поля температур методом конечных разностей

Рассмотрим алгоритм приближенного решения краевой задачи (7)–(25) методом конечных разностей для частного случая при  $d_{23} = 0$ ,  $\delta_{23} = 0$ , поэтому обозначим  $d_{12} = d$ ,  $\delta_{12} = \delta$ . Введем разностную сетку, регулярную по пространственным переменным и времени (рисунок А.1).

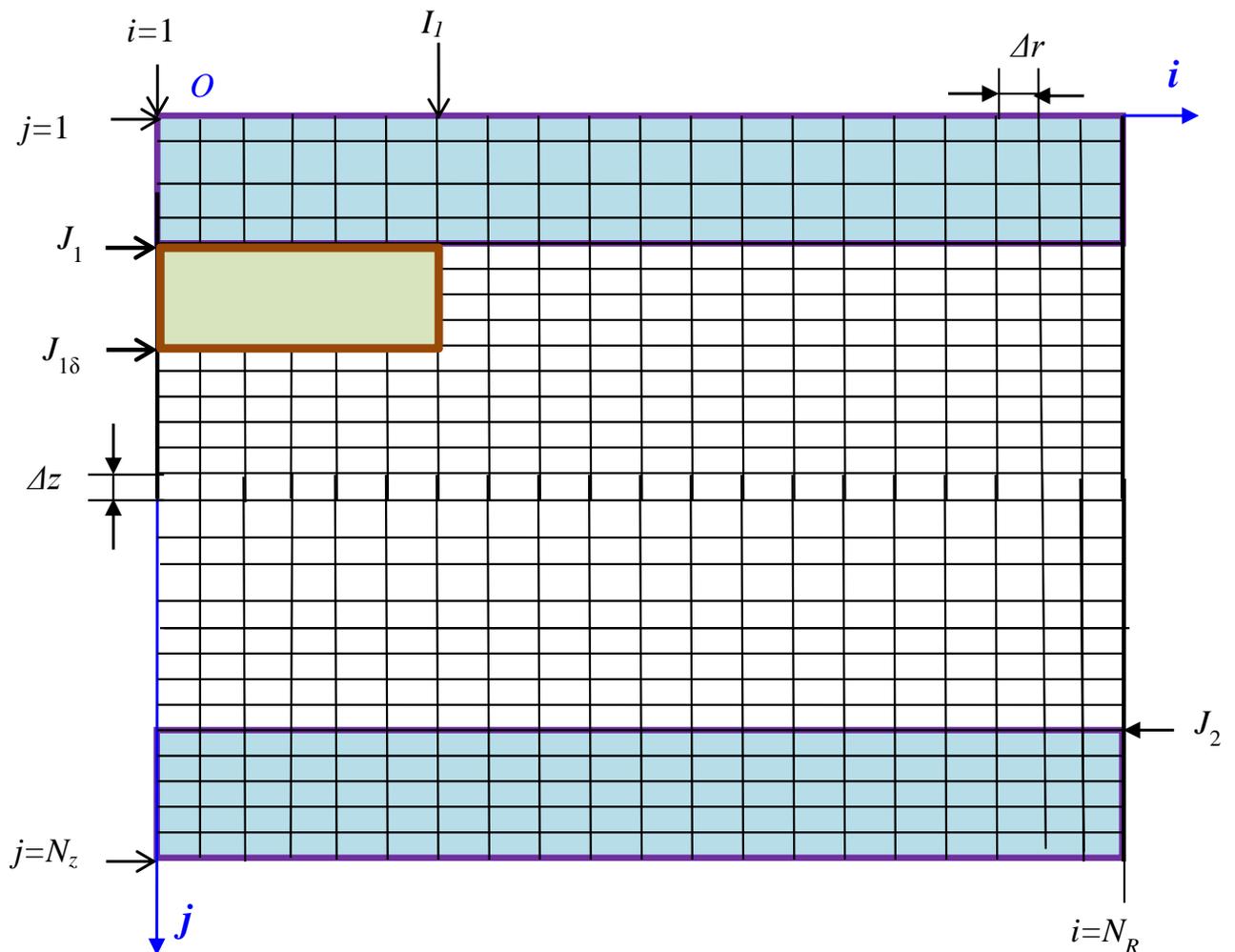


Рисунок А.1 – Схема наложения разностной сетки на рабочую область

Зададим  $N_R$  – число шагов по координате  $r$  и шаг по времени  $\Delta\tau$ . Величина шагов сетки по координатам  $r$  и  $z$  определяется по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta r &= \frac{R}{N_R - 1}, \\ \Delta z &= \frac{\delta}{4}\end{aligned}\tag{A.1}$$

Количество шагов сетки по координатам  $z$  и  $\tau$  определяется по формулам:

$$\begin{aligned}N_z &= \frac{h_1 + h_2 + h_3}{\Delta z}, \\ K &= \frac{\tau_1 + \tau_2}{\Delta\tau}\end{aligned}\tag{A.2}$$

Тогда координаты узлов сетки можно определить по следующим формулам:

$$\begin{aligned}r_i &= (i-1) \cdot \Delta r, \\ z_j &= (j-1) \cdot \Delta z, \\ \tau_k &= k \cdot \Delta\tau.\end{aligned}\tag{A.3}$$

где  $i=1, 2, \dots, N_R$ ,  $j=1, 2, \dots, N_z$ ;  $k=0, 1, 2, \dots, K$ .

Сеточные функции будем обозначать при помощи индексов  $i, j, k$ :

$$T(r_i, z_j, \tau_k) = T_{i,j}^k\tag{A.4}$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}I_1 &= \text{round}\left(\frac{d}{2 \cdot \Delta r} + 1\right) \\ J_1 &= \text{round}\left(\frac{h_1}{\Delta z} + 1\right) \\ J_{1\delta} &= \text{round}\left(\frac{h_1 + \delta}{\Delta z} + 1\right), \\ J_2 &= \text{round}\left(\frac{h_1 + h_2}{\Delta z} + 1\right)\end{aligned}\tag{A.5}$$

Для расчета поля температур используем схему расщепления по координатам. На каждом шаге по времени введем промежуточный этап, на котором будем записывать одномерную аппроксимацию по одному из пространственных направ-

лений. Рассматриваемая двумерная задача «расщепляется» на последовательность одномерных задач по каждой из координат, при этом погрешности аппроксимаций промежуточных слоев при суммировании уничтожаются [8, 112].

Для решения уравнения (7) используем схему расщепления, которая приводит к безусловно устойчивой локально-одномерной схеме, по оси  $r$  и по оси  $z$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Используя симметричную аппроксимацию пространственных производных, получим:

$$\frac{T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau / 2} = a \left( \frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta r^2} + \frac{1}{(i-1) \cdot \Delta r} \cdot \frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - T_{i-1,j}^{k+1/2}}{2 \cdot \Delta r} \right), \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta \tau / 2} = a \left( \frac{T_{i,j+1}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1}}{\Delta z^2} \right).$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} F_{0r} &= \frac{a \cdot \Delta \tau}{2 \cdot \Delta r^2} \\ F_{0z} &= \frac{a \cdot \Delta \tau}{2 \cdot \Delta z^2} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Преобразуем выражение (A.7) с учетом (A.8) и получим уравнения:

$$F_{0r} \left( 1 + \frac{1}{2(i-1)} \right) \cdot T_{i+1,j}^{k+1/2} - (2F_{0r} + 1) \cdot T_{i,j}^{k+1/2} + F_{0r} \left( 1 - \frac{1}{2(i-1)} \right) \cdot T_{i-1,j}^{k+1/2} = -T_{i,j}^k \quad (\text{A.9})$$

$$F_{0z} \cdot T_{i,j+1}^{k+1} - (2F_{0z} + 1) \cdot T_{i,j}^{k+1} + F_{0z} \cdot T_{i,j-1}^{k+1} = -T_{i,j}^{k+1/2} \quad (\text{A.10})$$

При решении уравнения (А.9) для цилиндрической стенки, получим уравнение в виде трехдиагональной матрицы:

$$\begin{aligned}
 T_{i-1,j}^{k+1/2} \cdot A_i - T_{i,j}^{k+1/2} \cdot B_i + T_{i+1,j}^{k+1/2} \cdot C_i &= D_i, \\
 A_i &= F_{0r} \left( 1 - \frac{1}{2(i-1)} \right), \\
 B_i &= 1 + 2F_{0r}, \\
 C_i &= F_{0r} \left( 1 + \frac{1}{2(i-1)} \right), \\
 D_i &= -T_{i,j}^k.
 \end{aligned} \tag{A.11}$$

Аналогично, при решении уравнения (А.10) для плоской стенки, получаем уравнение:

$$\begin{aligned}
 T_{i,j-1}^{k+1} A_j - T_{i,j}^{k+1} B_j + T_{i,j+1}^{k+1} C_j &= D_j \\
 A_j &= F_{0z}, \\
 B_j &= 1 + 2F_{0z}, \\
 C_j &= F_{0z}, \\
 D_j &= -T_{ij}^{k+1/2}.
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

Решая последовательно задачи (А.11) и (А.12), получим значение функции  $T_{i,j}^{k+1}$ , которое отличается от истинного значения  $T(r, z, \tau)$  решения задачи (7)–(25) на величину  $O(\Delta\tau^2)$ . При этом процесс решения двумерной задачи заменяется процессом последовательного решения двух одномерных задач. Описанная разностная схема расщепления (А.11)–(А.12) имеет преимущества в смысле простоты и наглядности решаемой задачи и относительно небольшого объема вычислений.

Каждое из соотношений (А.11) и (А.12) образует систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые решаются известным методом алгоритма прогонки [8, 53].

При прямой прогонке для всех  $i=2, 3, \dots, N-1$  определяем коэффициенты:

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}; \quad (A.13)$$

$$\beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - D_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}},$$

при этом  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  считаем известными из левого граничного условия.

При обратной прогонке для всех  $i=(N-1), \dots, 2, 1$  определяем температуры:

$$T_i = \alpha_i \cdot T_{i+1} + \beta_i, \quad (A.14)$$

при этом считаем известным  $T_N$  из правого граничного условия.

Далее рассмотрим алгоритм дискретизации начальных и граничных условий. Для  $i=1 \dots N_R, j=1, 2, \dots, N_z$  определяем начальное распределение температур:

$$T_{i,j} = t_{\text{опр}}. \quad (A.15)$$

Для реализации алгоритма прогонки (A.13)–(A.14) проведем дискретизацию граничных условий (9)–(25) с погрешностью  $O(h)$  задавая недостающие коэффициенты СЛАУ (A.13)–(A.14) [53].

Прогонка по  $r$  на левой границе сечения. На оси симметрии выполняется граничное условие (9), а на боковой стенке воздушного зазора – условие теплоизоляции (22). Из выражения (A.14) и условия (9):

$$T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1,$$

$$T_1 = T_2.$$

Решая совместно эти уравнения, при  $i=1, j=1 \dots J_1$  и  $j=J_{1\delta} \dots N_z$  получим:

$$\alpha_1 = 1, \beta_1 = 0. \quad (A.16)$$

Аналогично, подставив условие (21) при  $i=I_1, j=J_1+1 \dots J_{1\delta}-1$ , получим:

$$\alpha_{I_1} = 1, \beta_{I_1} = 0. \quad (A.17)$$

Прогонка по  $r$  на правой границе ( $i=N_R, j=1 \dots N_z$ ). Учитывая граничное условие на боковой стенке цилиндрических пластин (9) и вычисляя температуру на основе (A.14):

$$T_{N_R} = T_{N_R-1}.$$

$$T_{N_R-1} = \alpha_{N_R-1} T_{N_R} + \beta_{N_R-1},$$

получим температуру на правой границе сечения пластины:

$$T_{N_R} = \frac{\beta_{N_R-1}}{1 - \alpha_{N_R-1}}. \quad (\text{A.18})$$

Прогонка по  $z$  на левой границе для слоя  $l$  пластины при нагреве (граничные условия 2 рода). Из выражений (A.14) и (11):

$$T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1$$

$$\lambda_1 \frac{T_1 - T_2}{\Delta z} = q_{\text{изл}},$$

решая совместно эти уравнения при  $i=1 \dots N_R, j=1$ , получим коэффициенты:

$$\alpha_1 = 1$$

$$\beta_1 = \frac{\Delta z \cdot q_{\text{изл}}}{\lambda_1}, \quad (\text{A.19})$$

Аналогично при граничных условиях 3 рода из выражений (A.14) и (12):

$$T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1,$$

$$\lambda_1 \frac{T_2 - T_1}{\Delta z} = \alpha_{\text{окр}} (T_1 - t_{\text{окр}}).$$

Решая совместно эти уравнения при  $i=1 \dots N_R, j=1$ , получим выражения для расчета коэффициентов:

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \varphi},$$

$$\beta_1 = \frac{\varphi}{1 + \varphi} t_{\text{окр}}, \quad (\text{A.20})$$

$$\varphi = \Delta z \cdot \alpha_{\text{окр}} / \lambda_1.$$

Прогонка по  $z$  на правой границе для слоя  $1$  пластины при нагреве (граничные условия 2 рода). Для верхней стороны воздушного зазора из выражения (20) с учетом выражения (A.14) при  $i=1 \dots I_1-1, j=J_1$ :

$$\begin{aligned} T_{J_1} &= T_{J_1-1} \\ T_{J_1-1} &= \alpha_{J_1-1} T_{J_1} + \beta_{J_1-1}, \end{aligned}$$

получим выражение для расчета температуры:

$$T_{J_1} = \frac{\beta_{J_1-1}}{1 - \alpha_{J_1-1}}. \quad (\text{A.21})$$

Граничное условие 4 рода при переходе через границу слоев  $1$  и  $2$  при  $i = I_1 \dots N_R, j=J_1$ . Из выражения (18) с учетом выражения (A.14)

$$\begin{aligned} \lambda_1(T_{J_1} - T_{J_1-1}) &= \lambda_2(T_{J_1+1} - T_{J_1}), \\ T_{J_1-1} &= \alpha_{J_1-1} T_{J_1} + \beta_{J_1-1}, \end{aligned}$$

получим выражение для определения температуры на границе слоев:

$$T_{J_1} = \frac{\lambda_1 \cdot \beta_{J_1-1} + \lambda_2 \cdot T_{J_1+1}}{\lambda_1 \cdot (1 - \alpha_{J_1-1}) + \lambda_2}. \quad (\text{A.22})$$

Прогонка по  $z$  на левой границе для слоя  $2$  пластины. Для нижней стороны воздушного зазора при  $i=1 \dots I_1-1, j=J_{1\delta}$  из выражения (21)

$$T_{J_{1\delta}} = T_{J_{1\delta}+1},$$

получим значения коэффициентов:

$$\alpha_{J_{1\delta}} = 1, \beta_{J_{1\delta}} = 0. \quad (\text{A.23})$$

На границе слоев  $1$  и  $2$  пластины при  $i = I_1 \dots N_R, j=J_1$  из выражения (18) с учетом выражения (A.14):

$$\begin{aligned} \lambda_1(T_{J_1} - T_{J_1-1}) &= \lambda_2(T_{J_1+1} - T_{J_1}), \\ T_{J_1} &= \alpha_{J_1} T_{J_1+1} + \beta_{J_1}, \end{aligned}$$

получим выражения для расчета коэффициентов:

$$\alpha_{j_1} = \frac{1}{1 + \lambda_2/\lambda_1},$$

$$\beta_{j_1} = \frac{T_{j_1-1}}{1 + \lambda_1/\lambda_2}.$$
(A.24)

Прогонка по  $z$  на правой границе для слоя 2 пластины при  $i=1 \dots N_R, j=J_2$ . На границе слоев 2 и 3 из выражения (19) для граничных условий 4 рода с учетом выражения (A.14)

$$\lambda_2(T_{J_2} - T_{J_2-1}) = \lambda_3(T_{J_2+1} - T_{J_2}),$$

$$T_{J_2-1} = \alpha_{J_2-1}T_{J_2} + \beta_{J_2-1},$$

получим выражение для определения температуры:

$$T_{J_2} = \frac{\lambda_2 \cdot \beta_{J_2-1} + \lambda_3 \cdot T_{J_2+1}}{\lambda_2 \cdot (1 - \alpha_{J_2-1}) + \lambda_3}.$$
(A.25)

Прогонка по  $z$  на левой границе для слоя 3 пластины. На границе слоев 2 и 3 ( $i=1 \dots N_R, j=J_2$ ) при граничных условиях 4 рода из выражения (19) с учетом выражения (A.14):

$$\lambda_2(T_{J_2} - T_{J_2-1}) = \lambda_3(T_{J_2+1} - T_{J_2}),$$

$$T_{J_2} = \alpha_{J_2}T_{J_2+1} + \beta_{J_2},$$

получим выражения для вычисления коэффициентов:

$$\alpha_{j_2} = \frac{1}{1 + \lambda_2/\lambda_3},$$

$$\beta_{j_2} = \frac{T_{j_2-1}}{1 + \lambda_3/\lambda_2}.$$
(A.26)

Прогонка по  $z$  на правой границе для слоя 3 пластины. При нагреве со стороны слоя 3 выполняются граничные условия 2 рода. Из выражения (11) с учетом выражения (A.14):

$$\lambda_3 \frac{T_{Nz} - T_{Nz-1}}{\Delta z} = q_{\text{изл}},$$

$$T_{Nz-1} = \alpha_{Nz-1}T_{Nz} + \beta_{Nz-1},$$

решая совместно эти уравнения при  $i=1 \dots N_R, j=N_z$ , получим выражение для определения температуры на нижней границе слоя 3:

$$T_{N_z} = \frac{q_{изл} \cdot \Delta z}{\lambda_3 (1 - \alpha_{N_z-1})} + \frac{\beta_{N_z-1}}{(1 - \alpha_{N_z-1})}. \quad (\text{A.27})$$

При охлаждении на воздухе выполняются граничные условия 3 рода (12), с учетом выражения (A.14):

$$\lambda_3 \frac{T_{N_z-1} - T_{N_z}}{\Delta z} = \alpha_{окр} (T_{N_z} - t_{окр})$$

$$T_{N_z-1} = \alpha_{N_z-1} T_{N_z} + \beta_{N_z-1}.$$

Решая совместно эти уравнения, получим при  $i=1 \dots N_R, j=N_z$  выражение для определения температуры:

$$T_{N_z} = \frac{\varphi \cdot t_{окр} + \beta_{N_z-1}}{1 - \alpha_{N_z-1} + \varphi}. \quad (\text{A.28})$$

$$\varphi = \alpha_{окр} \cdot \frac{\Delta z}{\lambda_3}$$

Таким образом, получен алгоритм для решения нестационарной краевой задачи теплопроводности методом конечных разностей [75].

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Свидетельство о регистрации программы ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024619943

**Тепловое состояние трехслойной биметаллической  
пластины при диагностике дефектов расслоения  
методом теплового контроля**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования «Южно-  
Уральский государственный университет (национальный  
исследовательский университет)» (RU)*

Авторы: *Ячиков Игорь Михайлович (RU), Костылева Лилия  
Юрьевна (RU), Логиновский Олег Витальевич (RU), Голлай  
Александр Владимирович (RU)*

Заявка № 2024618152

Дата поступления 17 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 мая 2024 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 429b6a0fe3853164baf96f83b73b4aa7  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 18.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2024619943**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):  
2024619943  
Дата регистрации: 02.05.2024  
Номер и дата поступления заявки:  
2024618152 17.04.2024  
Дата публикации и номер бюллетеня:  
02.05.2024 Бюл. № 5

Автор(ы):  
Ячиков Игорь Михайлович (RU),  
Костылева Лилия Юрьевна (RU),  
Логиновский Олег Витальевич (RU),  
Голлай Александр Владимирович (RU)  
Правообладатель(и):  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Южно-Уральский  
государственный университет (национальный  
исследовательский университет)» (RU)

Название программы для ЭВМ:

**Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля**

**Реферат:**

Программа служит для компьютерного моделирования теплового состояния трехслойной пластины при наличии дефекта в виде воздушной прослойки между металлами при тепловом неразрушающем контроле (нагреве и последующем охлаждении биметаллической пластины). Исходными данными для расчета являются геометрические размеры пластины и дефекта, теплофизические характеристики материалов слоев, мощность теплового потока, условия нагрева и последующего охлаждения. В программе реализованы: ввод данных из файла, выполнение расчета температурного поля методом конечных разностей, графическое представление изотермических линий в сечении пластины, распределения абсолютных значений температуры и дифференциального температурного сигнала по поверхности пластины в моменты окончания времени нагрева и охлаждения. Программа предназначена для специалистов в области теплотехники и теплового неразрушающего контроля. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows XP/7/10, Unix.

**Язык программирования:** MATLAB

**Объем программы для ЭВМ:** 37 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Акт внедрения результатов диссертационной работы на предприятии АО «Рифар»

	
<p>462635, Оренбургская обл., г. Гай, Технологический проезд 18 Тел.: +7 (35362) 45-113 Тел./Факс: +7 (35362) 45-130 E-mail: info@rifar.ru www.rifar.ru</p>	
<p>АО «РИФАР»</p>	
<p>УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор АО «Рифар»</p>	
<p> А.С. Пеньков 6.12. 2024 г.</p>	
<p>АКТ внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Костылевой Лилии Юрьевны на тему «Модели и алгоритмы совершенствования управления предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, посредством системы выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля»</p>	
<p>Комиссия в составе:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Генеральный директор Пеньков Александр Сергеевич;</li><li>2. Старший инженер – электроник Кочедыков Федор Сергеевич;</li><li>3. Инженер – энергетик Каргина Ксения Александровна;</li><li>4. Заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника» Новотроицкого филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кандидат педагогических наук, доцент Мажирина Раиса Евгеньевна (по согласованию);</li><li>5. Профессор ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», доктор технических наук, профессор Панферов Владимир Иванович (по согласованию)</li></ol>	
<p>рассмотрела результаты диссертационного исследования Костылевой Л.Ю. на тему «Модели и алгоритмы совершенствования управления предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, посредством системы выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля» (специальность 2.3.4 – Управление в организационных системах).</p>	
<p>Комиссия отмечает:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Представленные в диссертационной работе Л.Ю. Костылевой научные разработки, аналитические исследования, обобщения и выводы, а также программы для ЭВМ и методические рекомендации по использованию положений и разработок диссертации имеют существенную практическую значимость и могут найти применение на</li></ol>	

предприятиях, которые связаны с производством и использованием биметаллических материалов.

Важное практическое значение представляет и то, что в работе Костылевой Л.Ю. на основе анализа современных методов определения дефектов соединения слоев биметаллических листовых материалов, выявления достоинств и недостатков этих методов показано, что повышение эффективности указанного процесса может быть произведено за счет применения методов теплового неразрушающего контроля, которые позволяют дополнить используемые в настоящее время на практике методы оценки качества продукции и работоспособности технологического оборудования из многослойных биметаллических материалов.

В диссертационной работе Костылевой Л.Ю. определены состав и структура системы контроля качества изделий и конструкций из многослойных биметаллических материалов, базирующейся на использовании методов теплового неразрушающего контроля, приведены элементы математического и алгоритмического компонентов данной системы и их связь с корпоративной информационной системой. Все это имеет практическое значение для предприятий, выпускающих продукцию из биметаллических материалов.

Внедрение инновационных методов контроля, таких как система выявления дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового неразрушающего контроля, играет значительную роль в повышении эффективности и качества промышленных процессов.

На основе анализа методов многокритериального выбора в работе Костылевой Л.Ю. сформирован алгоритм, который позволяет применять наиболее подходящие из них для обоснования выбора рационального варианта системы с учетом особенностей деятельности и специфики организации производственного процесса конкретного промышленного предприятия. Применение подхода, основанного на сочетании методов вербального анализа решений, принципа разделения количественных и качественных показателей, а также способов поэтапного сокращения количества признаков и альтернатив, позволяет объективно оценить преимущества выбранного варианта системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов и сделать обоснованное решение о внедрении.

В диссертационной работе Костылевой Л.Ю. предложена оригинальная математическая модель многослойной биметаллической пластины с дефектом соединения слоев, показаны примеры применения численных методов для интерпретации результатов теплового контроля биметаллических листовых материалов. Полученные результаты могут быть использованы для формирования системы мониторинга многослойных биметаллических изделий методом теплового контроля, а также в ходе дальнейших экспериментальных исследований

Комиссия считает, что совокупность научных положений и разработок диссертации Костылевой Л.Ю. способствует повышению эффективности управления промышленными предприятиями, выпускающими продукцию и использующими технологическое оборудование из многослойных биметаллических материалов за счет обоснованного применения системы выявления дефектов, основанной на методах теплового контроля.

Генеральный директор

А.С. Пеньков

Старший инженер – электроник

Ф.С. Кочедыков

Инженер – энергетик

К.А. Каргина

Кандидат педагогических наук, доцент

Р.Е. Мажирина

Доктор технических наук, профессор

В.И. Панферов



ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Заключение об использовании результатов диссертации  
АУ ЮНИИИТ

УТВЕРЖДАЮ  
Директор АУ «Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий»,  
доктор технических наук

А.В. Мельников

24 марта 2024 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

об использовании результатов диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
Костылевой Лилии Юрьевны

на тему «Модели и алгоритмы совершенствования управления предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, посредством системы выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля»

Комиссия в составе:

1. первого заместителя директора Царегородцева Александра Леонидовича;
2. руководителя центра информационно-аналитических систем Русанова Михаила Александровича;
3. руководителя центра космических услуг Кочергина Глеба Александровича

рассмотрела результаты диссертационного исследования Костылевой Л.Ю. на тему «Модели и алгоритмы совершенствования управления предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, посредством системы выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля» (специальность 2.3.4 – Управление в организационных системах) и сформулировала следующее заключение:

1. Диссертационная работа Л.Ю. Костылевой представляет собой целостное завершённое научное исследование, позволившее решить важную научную задачу повышения эффективности управления промышленными предприятиями, осуществляющими производство изделий и эксплуатацию технологического оборудования из многослойных биметаллических материалов, за счёт формирования системы управления предприятием, включающей подсистему выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля, а также рекомендаций по обоснованию внедрения данной системы.

2. В работе Костылевой Л.Ю. предложены состав и структура системы контроля качества изделий и конструкций, основанной на методах неразрушающего контроля. Разработаны математические и алгоритмические компоненты этой системы, а также способы их взаимодействия с комплексом информационных систем промышленного предприятия.

3. Перечисленные разработки реализованы в виде программы «Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике дефектов расслоения методом теплового контроля» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619943, Приложение 3), которая может быть использована на ряде промышленных предприятий подобного профиля.

4. На основе анализа методов многокритериального выбора в диссертационной работе Костылевой Л.Ю. был разработан алгоритм, который позволяет применять наиболее подходящие из указанных методов для обоснования рационального варианта системы с учетом особенностей деятельности и специфики производственного процесса конкретного промышленного предприятия. Использование подхода, который сочетает методы вербального анализа решений, принцип разделения количественных и качественных показателей, а также поэтапное сокращение числа признаков и альтернатив, позволяет объективно оценить преимущества выбранной системы выявления дефектов и принять обоснованное решение о ее внедрении. Указанный алгоритм может быть применен на промышленных предприятиях при формировании системы выявления дефектов материалов и конструкций.

5. Отдельную и самостоятельную ценность представляют приведенные в работе Костылевой Л.Ю. материалы анализа концептуальных подходов, методов и технологий повышения эффективности работы промышленных предприятий, в том числе связанных с производством продукции и использованием технологического оборудования из биметаллических листовых материалов.

Таким образом, выводы и результаты диссертационного исследования Костылевой Л.Ю. являются актуальными, весьма полезными для использования, что показал уже имеющийся опыт внедрения на предприятиях, осуществляющих производство изделий и эксплуатацию технологического оборудования из многослойных биметаллических материалов.

Члены комиссии:

Первый заместитель директора

А.Л. Царегородцев

Руководитель центра  
информационно-аналитических систем

М.А. Русанов

Руководитель центра космических услуг

Г.А. Кочергин

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Заключение об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе ВШЭЖН ЮУрГУ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК

УТВЕРЖДАЮ



Директор Высшей школы электроники и компьютерных наук Южно-Уральского государственного университета,  
доктор технических наук

А.В. Голлай  
29.11 2024 г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

об использовании результатов диссертационной работы  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
Костылевой Лилии Юрьевны

на тему «Модели и алгоритмы совершенствования управления предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, посредством системы выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля»

Комиссия в составе:

Председатель комиссии, заместитель директора по учебной работе Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук, доцент Плотникова Наталья Валерьевна;

Заместитель директора по научной работе Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Захаров Вадим Владимирович;

Заведующий кафедрой «Электронные вычислительные машины» Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук, доцент Топольский Дмитрий Валерианович;

Доцент кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук, доцент Любицын Владимир Николаевич

рассмотрела материалы диссертационного исследования Костылевой Л.Ю. на тему «Модели и алгоритмы совершенствования управления предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, посредством системы выявления дефектов методами теплового неразрушающего контроля», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.4 – Управление в организационных системах, и подготовила следующее заключение:

1. Научные положения и разработки диссертационного исследования Костылевой Л.Ю., включая программу «Тепловое состояние трехслойной биметаллической пластины при диагностике

дефектов расслоения методом теплового контроля» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619943, Приложение 3), использованы в учебном процессе кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» при проведении следующих учебных курсов:

Моделирование систем (бакалавриат, направление 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», профиль «Автоматизированное управление бизнес-процессами и финансами»);

Теоретические основы управления (бакалавриат, направление 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», профиль «Автоматизированное управление бизнес-процессами и финансами»);

Автоматизированные системы корпоративного управления (бакалавриат, направление 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», профиль «Автоматизированное управление бизнес-процессами и финансами»);

Цифровые двойники (магистратура, направление 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», профиль «Технологии цифровой трансформации»);

Интеллектуальные системы (магистратура, направление 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», профиль «Технологии цифровой трансформации»).

2. Аналитические материалы, научные положения, разработки, а также обобщения и выводы, полученные в диссертации Костылевой Л.Ю., использованы в научной монографии «Управление промышленными предприятиями как фактор эффективного развития региона» (авторы О.В. Логиновский, А.В. Голлай, Л.Ю. Костылева, А.А. Шинкарев, И.М. Ячиков, М.В. Ядрышникова) и учебном пособии «Методы и модели исследования теплового состояния многослойных материалов» (авторы О.В. Логиновский, А.В. Голлай, Л.Ю. Костылева, И.М. Ячиков).

3. Разработки, реализованные в ходе выполнения диссертационной работы Костылевой Л.Ю., могут быть предложены для использования на отдельных промышленных предприятиях Челябинской и Оренбургской областей.

Председатель комиссии



Н.В. Плотникова

Члены комиссии



В.В. Захаров



Д.В. Топольский



В.Н. Любицын