

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2024

Работа выполнена на кафедре информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** **Логиновский Олег Витальевич**  
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Официальные оппоненты** **Столбов Валерий Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики, механики и биомеханики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Щепкин Александр Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Защита состоится 18 марта 2025 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.02 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.

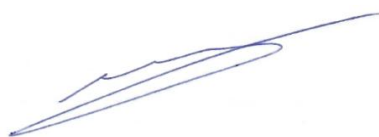
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Сведения о защите, диссертация и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ЮУрГУ <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243702-d-21229803/kostyleva-liliya-yurevna>.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, просим высылать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет, тел. (351) 267-91-23.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



А.В. Голлай

## 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, H.A. 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 Р. 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 ор-

ганизационной 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.

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.

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.

**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 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;

– 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 о государственной регистрации программы 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.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится обоснование актуальности темы исследования, цели и задачи работы, объект, предмет и методы исследования, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость результатов диссертации, а также представлены сведения об апробации работы и публикации основных научных положений и результатов в открытой печати.

В **Главе 1** диссертации выполнен анализ концептуальных подходов, методов, моделей, технологий и иных средств повышения эффективности работы промышленных предприятий, осуществляющих производство продукции и использование конструкций из биметаллических листовых материалов. Показано, что для предприятий данного профиля необходимо применять современные, обновленные подходы к совершенствованию технологий оценки качества продукции и работоспособности технологического оборудования. В их числе необходимо рассмотреть методы и технологии создания информационно-вычислительной структуры компании, в частности, специального программного обеспечения по подготовке и принятию управленческих решений руководителями промышленных предприятий; методы и механизмы сбалансированного технологического развития промышленного предприятия, а также методы и механизмы умного управления, которые формируют у работников стремление применять более эффективные средства производства, передовые технологии и инновации, что в свою очередь, способствует снижению издержек и повышению конкурентоспособности предприятия на рынке. Использование актуальных 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, а также использование актуальных цифровых технологий при проведении вычислительных экспериментов для исследования поведения цифровых двойников объектов контроля с использованием современных программных продуктов, в том числе с открытым исходным кодом.

Рассмотрены также используемые на практике различные математические модели теплового состояния многослойных материалов, аналитические и численные методы решения задач теплопередачи и современные программные средства для моделирования теплового состояния объектов.

**Таким образом**, для повышения эффективности функционирования предприятий, работающих с биметаллическими материалами, важно не только применять современные методы контроля и диагностики, но и постоянно совершенствовать технологии выявления возможных дефектов, обеспечивая тем самым высокое качество продукции и надежность эксплуатируемого оборудования. Для этого требуется разработать комплексную структуру системы выявления дефектов многослойных биметаллических листовых материалов методом теплового контроля, интегрированной с информационной системой предприятия, обосновать внедрение данной системы, разработать математический, алгоритмический и программный компоненты данной системы и методические рекомендации по их

применению на предприятиях, связанных с производством и использованием биметаллических материалов.

В главе 2 предложен современный подход к повышению эффективности управления промышленными предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы, который состоит в формировании комплексной структуры системы выявления и оценки дефектов и обосновании ее внедрения, и нацелен на совершенствование каждого этапа управленческого цикла: планирования, организации, контроля и анализа деятельности (рис. 1).



Рис.1 Направления совершенствования управления предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы посредством обоснованного внедрения системы выявления дефектов методом теплового контроля

В частности, на этапе планирования предлагается дополнить комплекс процедур планирования технического обслуживания и ремонта технологического оборудования из биметаллических листовых материалов информацией о выявленных дефектах для его заблаговременного вывода в ремонт или проведению внепланового технического обслуживания.

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.

Разработаны концептуальные положения по формированию системы выявления и оценки дефектов биметаллических листовых материалов методами теплового неразрушающего контроля (рис. 2), интегрированной с информационной системой промышленного предприятия (рис. 3).



Рис. 2. Состав системы выявления дефектов методом теплового контроля

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

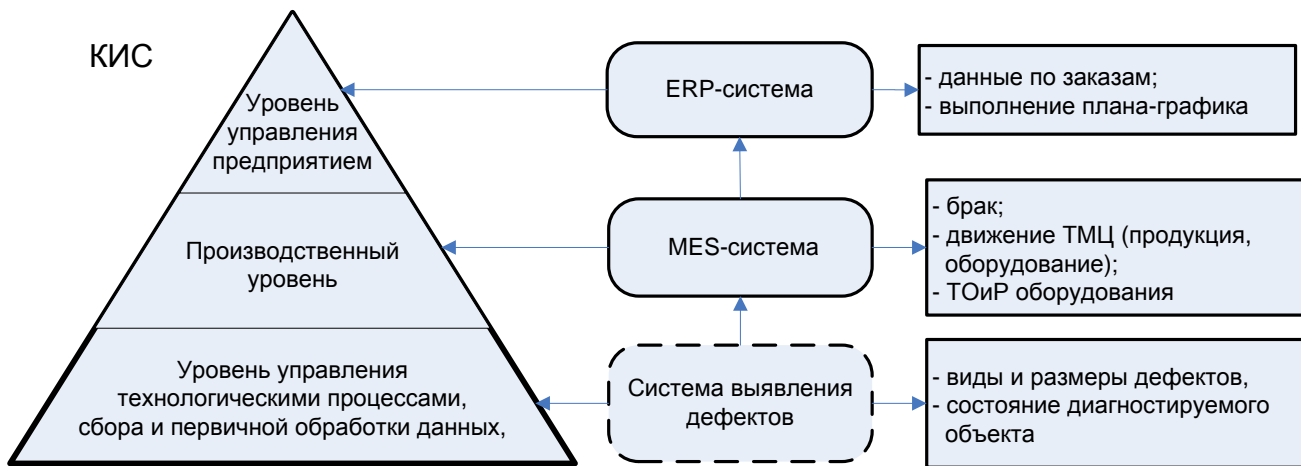


Рис. 3. Интеграция системы выявления дефектов методом теплового контроля с корпоративной информационной системой (КИС) предприятия

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

Алгоритм обоснования выбора рационального варианта системы контроля дефектов учитывает особенности деятельности и специфики организации производственного процесса конкретного промышленного предприятия, и основан на сочетании методов вербального анализа решений, принципа разделения количественных и качественных показателей, а также способов поэтапного сокращения количества признаков и альтернатив (рис. 4).

Алгоритм включает:

Шаг 1. Составляется перечень всех базовых характеристик системы. В работе приведен обширный комплекс показателей (5 групп показателей – технические, организационные, социальные, экологические, экономические), из которых руководитель предприятия или другое лицо, принимающее решение (ЛПР), имеет возможность выбрать наиболее существенные с учетом особенностей производственного процесса конкретного предприятия.

Шаг 2. Формируется множество критериев оценки. В каждой группе выделяются качественные показатели, которые будут оценены по вербальным шкалам, и количественные, оценка которых производится с использованием стандартных единиц измерения. В качестве критерия либо может быть использована одна из базовых характеристик, либо несколько признаков могут быть объединены в составной критерий известными методами. При формировании критериев качественные и количественные признаки должны быть разделены.

Шаг 3. Формируются шкалы оценок для каждого критерия. 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, пред-

ставленные в научной литературе. При этом должен сохраняться принцип разделения качественных и количественных признаков в составных критериях.

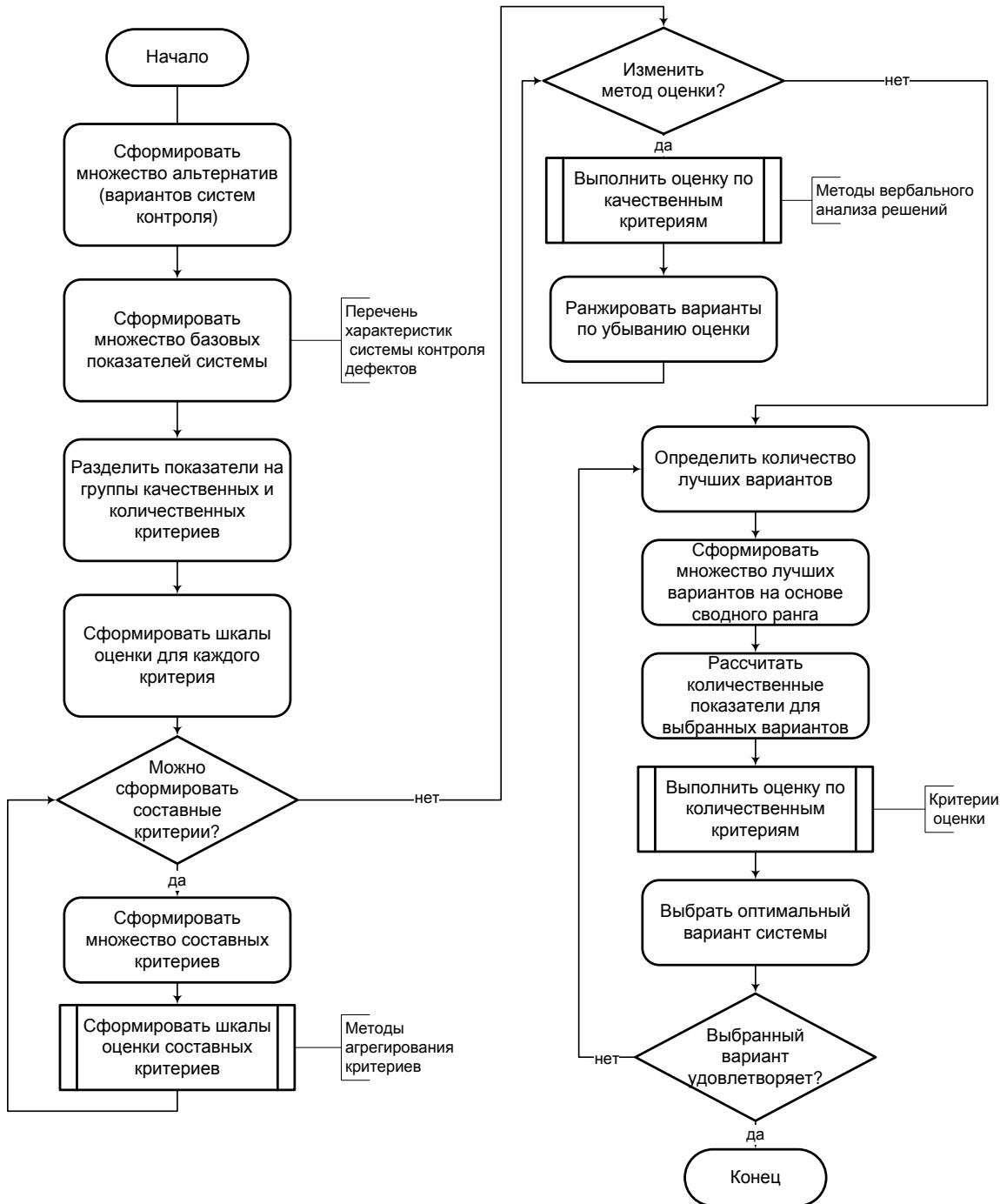


Рис. 4. Алгоритм многокритериального выбора варианта системы выявления дефектов

Шаг 4. Производится оценка вариантов по критериям, базирующимся на качественных показателях. На основе полученных оценок производится ранжирование альтернатив с использованием нескольких существующих подходов.

Например, может быть произведено ранжирование по каждому критерию, а затем для каждого варианта рассчитан сводный ранг  $R_n$  :

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

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

Результатом данного шага является получение подмножества допустимых альтернатив  $X'_1, X'_2 \dots X'_p$ ,  $p < n, p \geq 2$ , сформированное пересечением подмножеств наилучших вариантов, отобранных различными способами ранжирования. Количество наилучших вариантов определяется на основе предпочтений ЛПР и может быть изменено на последующих итерациях отбора.

Шаг 5. Производится расчет количественных критериев для отобранных альтернатив и осуществляется их оценка по количественным критериям. При относительно большом числе количественных показателей также может проводиться их объединение в составные критерии.

Шаг 6. Производится выбор оптимального варианта системы.

Таким образом, данный алгоритм позволяет сократить число оцениваемых альтернатив и достичь существенной экономии времени при проведении сложных и трудозатратных экономических расчетов.

В **Главе 3** разработаны математический, алгоритмический и программный компоненты созданной системы.

**Математическая модель процесса активного теплового контроля многослойного биметаллического материала при наличии дефектов соединения слоев.** Объектом контроля является трехслойная пластина (рис. 5) с наружными слоями (1) и (3) толщиной  $h_1$  и  $h_3$  соответственно, между которыми расположен теплораспределительный слой (2), толщиной  $h_2$ . 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.

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.

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.

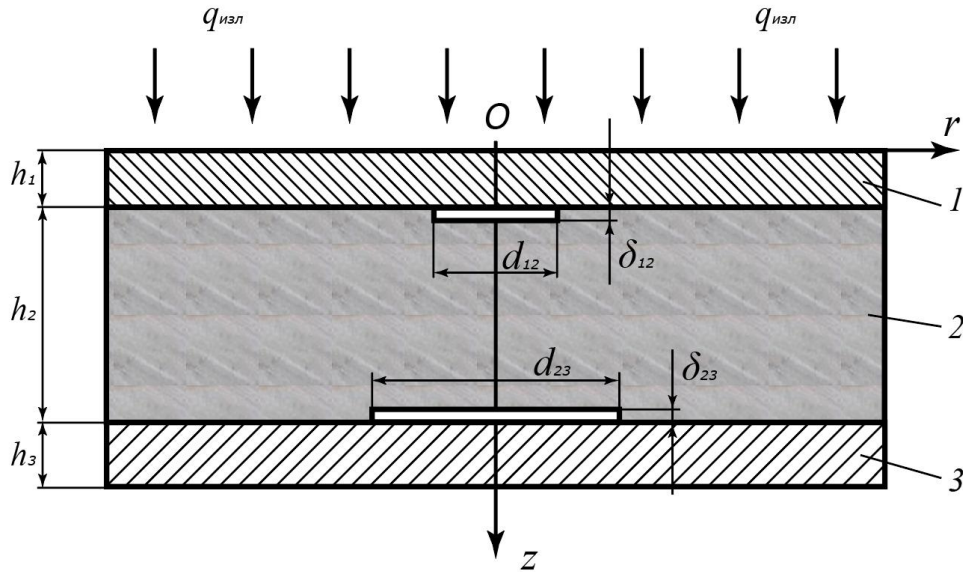


Рис. 5. Расчетная схема трехслойной пластины с дефектами в местах контакта слоев

Процесс нагрева соответствует условиям проведения импульсного активно-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 пластин 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

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

где  $i = 1, 2, 3$  – номер слоя (см. рис. 3);  $\tau$  – 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.

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

Для решения дифференциального уравнения (2) дополним его 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:

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0. \quad (5)$$

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:

$$q_{\text{изл}} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (6)$$

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

$$\alpha_{\text{окр}}(T_1 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (7)$$

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:

$$\alpha_{\text{окр}} = 9,74 + 0,07 \cdot (T_1 - t_{\text{окр}}). \quad (8)$$

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:

$$\alpha_{\text{окр}}(T_1 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}. \quad (9)$$

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:

$$\alpha_{\text{окр}}(T_3 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}. \quad (10)$$

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:

$$q_{\text{изл}} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}, \quad (11)$$

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

$$\alpha_{\text{окр}}(T_3 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}. \quad (12)$$

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

$$\frac{\partial T_1}{\partial z} \lambda_1 = \frac{\partial T_2}{\partial z} \lambda_2; T_1 = T_2. \quad (13)$$

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

$$\frac{\partial T_3}{\partial z} \lambda_3 = \frac{\partial T_2}{\partial z} \lambda_2; T_3 = T_2. \quad (14)$$

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = 0, \quad (15)$$

при  $z = h_1 + \delta_{12}$ :

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0. \quad (16)$$

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

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0. \quad (17)$$

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

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = 0, \quad (18)$$

при  $z = h_1 + h_2 - \delta_{23}$ :

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0. \quad (19)$$

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:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0. \quad (20)$$

Таким образом, разработана математическая модель (2)–(20), 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 дифференциальный температурный сигнал  $\Delta T$ , равный разности температур в исследуемой точке Т и в зоне, принятой за бездефектную,  $T_{\text{бд}}$ :

$$\Delta T(r, z, \tau) = T(r, z, \tau) - T_{\text{бд}}(r, z, \tau) \quad (21)$$

Для вычисления распределения температуры в пластине без дефектов используется та же модель, но без учета граничных условий (15)–(20).

Разработан алгоритм решения представленной краевой задачи методом конечных разностей, а также комплекс входных данных препроцессора вычислительного пакета и алгоритм решения задачи методом конечных элементов.

Разработана программа на языке Matlab для моделирования процесса активного теплового контроля трехслойной биметаллической пластины при наличии дефекта расслоения. Приведена схема программных модулей, требования к представлению исходных данных, а также результаты работы программы в виде наборов выходных данных и графических изображений. 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.

В главе 4 представлены методические рекомендации по применению разработанных в диссертации моделей, алгоритмов, методов и программных средств для определения оптимальных условий процесса измерения и интерпретации результатов проведения теплового контроля для многослойных биметаллических листовых материалов при наличии дефектов расслоения.

При исследовании влияния мощности теплового потока и времени нагрева на величину температурного сигнала на поверхности пластины с дефектом 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. 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 (рис. 6, а). 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 (рис. 6, б).

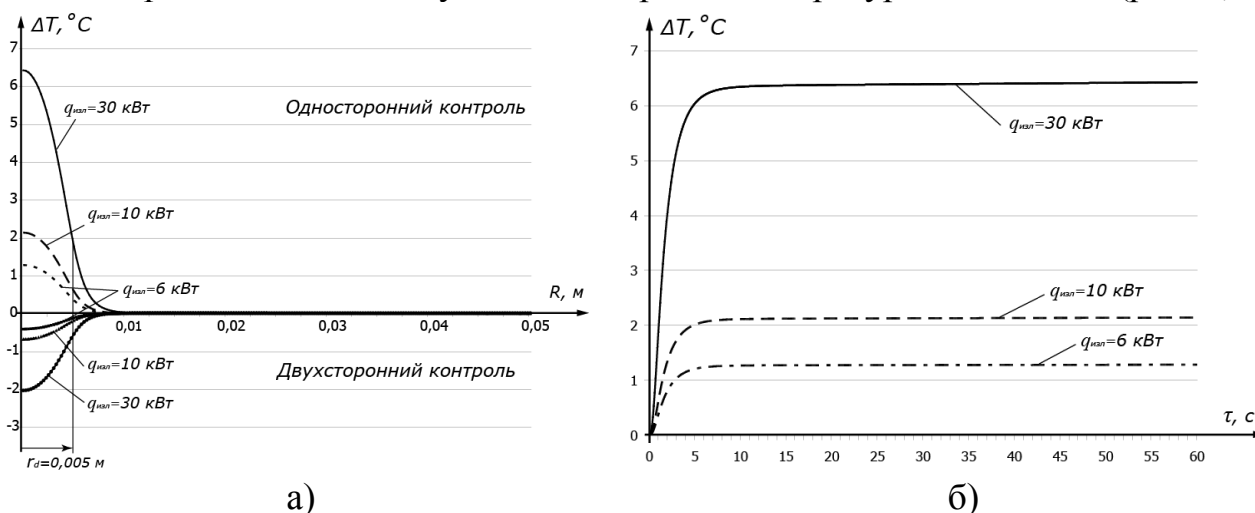


Рис. 6. Влияние мощности теплового потока (а) и времени нагрева (б) на величину дифференциального температурного сигнала на поверхности пластины

При оценке влияния размера дефекта на величину дифференциального температурного сигнала на поверхности пластины результаты проведенного моделирования 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. Результаты вычислительного эксперимента проиллюстрированы значительным количеством графиков, представленных в п. 4.1 и 4.2 диссертационной работы.

При определении размера дефекта по данным температурного поля различными методами можно сделать вывод, что оценка радиуса дефекта по проекции экстремума производной температуры и дифференциального температурного сигнала обеспечивает точное определение размера дефекта на используемой мо-

дели при различных параметрах режима нагрева. 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. Результаты моделирования в табличном и графическом виде приведены в п. 4.3 диссертации.

При исследовании влияния сочетания дефектов на величину температурного сигнала на поверхности пластины полученные данные 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. 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. Соответствующие графические зависимости представлены в п. 4.4 диссертации. Сопоставив параметры температурного сигнала для разных сторон пластины, можно определить, с какой стороны относительно теплораспределительного слоя может быть расположен дефект.

По результатам практического применения моделей, методов и программных средств, представленных в работе, можно утверждать, что данный комплекс целесообразно использовать для повышения эффективности функционирования промышленных предприятий, выпускающих и эксплуатирующих биметаллические листовые материалы.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

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 качества управления промышленными предприятиями, выпускающими и использующими биметаллические листовые материалы,

– предложены концептуальные положения по формированию системы выявления и оценки дефектов биметаллических листовых материалов методами теп-

лового 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 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.

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;

– 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 пластины, 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.

**Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих печатных изданиях:**

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:*

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:*

8. 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.

*Статьи в сборниках научных трудов:*

9. Костылева, Л. Ю. Современные цифровые технологии для оценки качества бытовых изделий из биметаллических материалов методом теплового контроля / Л. Ю. Костылева // Умные технологии в современном мире: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Челябинск, 24–25 ноября 2021 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет; Высшая школа экономики и управления. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – Т. 1. – С. 243–249.

10. Костылева, Л. Ю. Структура системы для активного контроля многослойных биметаллических пластин / Л. Ю. Костылева // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 74-й научной конференции, Челябинск, 19 апреля 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – С. 260–266.

11. Костылева, Л. Ю. Моделирование процессов активного теплового контроля многослойных биметаллических пластин при помощи современных программных средств / Л. Ю. Костылева // Научный поиск: Материалы четырнадцатой научной конференции аспирантов и докторантов, Челябинск, 19–20 апреля 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – С. 148–157.

12. Костылева, Л. Ю. Моделирование процессов активного теплового контроля многослойных биметаллических пластин / Л. Ю. Костылева, О. В. Логиновский // Управление большими системами: труды XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых, Челябинск, 05–08 сентября 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет; Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – С. 70–77.

13. 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.

14. 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.

15. Костылева, Л. Ю. Обоснование целесообразности применения системы выявления дефектов многослойных биметаллических материалов методом теплового неразрушающего контроля / Л.Ю. Костылева, О.В. Логиновский // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: Материалы 76-й научной конференции / Ми-

нистерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2024. – С. 156–160.

16. Костылева, Л.Ю. Мониторинг дефектов расслоения в многослойной биметаллической пластине методом теплового контроля / Л.Ю. Костылева, О.В. Логиновский, И.М. Ячиков // Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2023 (ЦИСП'2023): Сборник научных статей, Челябинск, 21–23 ноября 2023 года. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2024. – С. 287–295.

*Учебное пособие:*

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

**Костылева** Лилия Юрьевна

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

Специальность 2.3.4. – Управление в организационных системах

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 25.12.2024. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 377/500.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.