



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

# Дефектоскопия



*Неразрушающий контроль*

*Техническая диагностика*

*Анализ материалов*

**№ 6**

**2023**



# ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный  
Основан в феврале 1965 года  
Екатеринбург

№ 6  
2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### Акустические методы

**А.С. Мартюгов, Е.В. Ершов, И.А. Варфоломеев, Д.В. Богачев, Л.Н. Виноградова.** Акустический контроль производства стали в агрегате ковш-печь ..... 3

### Электромагнитные методы

**А.Г. Антипов, А.А. Марков, Е.А. Максимова.** Использование магнитного метода контроля для оценки зазоров в болтовых стыках рельсового пути ..... 11

**Хун Чен, Бинтинг Чжа, Чэнцзюнь Ван, Ци Чжун.** Анализ параметров, влияющих на эффективность системы двухэлектродного электростатического обнаружения ..... 26

### Тепловые методы

**В.П. Вавилов.** Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) ..... 38

### Оптические методы

**Н.А. Маслов, С.А. Константинов, А.Г. Маликов.** Разработка подходов к оптической диагностике процесса формирования лазерного сварного шва в режиме реального времени на основе лазерной эмиссионной спектроскопии ..... 59

### Материалы XXXIV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

**Р.А. Соколов, К.Р. Муратов, В.Ф. Новиков.** Применение параметров спектральных характеристик кривой перемагничивания для определения твердости ферромагнитного материала ..... 67

**А.И. Сюрдо, Р.М. Абашев, В.С. Красноперов, И.И. Мильман, Е.В. Моисейкин, А.И. Бояринцев.** Автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля Корос-333 ..... 70

Информация ..... 73

## АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ В АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ

© 2023 г. А.С. Мартюгов<sup>1,\*</sup>, Е.В. Ершов<sup>1</sup>, И.А. Варфоломеев<sup>1</sup>, Д.В. Богачев<sup>1</sup>,  
Л.Н. Виноградова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Череповецкий государственный университет, Россия 162600 Вологодская область,  
г. Череповец, пр. Луначарского, 5  
E-mail: \*martyugov@bk.ru*

Поступила в редакцию 16.02.2023; после доработки 28.04.2023  
Принята к публикации 05.05.2023

Предложен способ реализации акустического контроля процесса производства стали в агрегате ковш-печь с применением пошаговой модели распознавания акустических событий. Использование разработанной модели делает возможным прогнозирование выбросов металла с точностью 96 %.

*Ключевые слова:* метод, контроль, прогнозирование, акустический сигнал, ковш-печь, продувка металла, производство стали.

DOI: 10.31857/S0130308223060015, EDN: ZRWGHS

### ВВЕДЕНИЕ

Черная металлургия — одна из важнейших отраслей промышленного производства, успешное развитие которой определяет промышленный потенциал и возможности каждого государства. Это комплексная отрасль, включающая в себя добычу, обогащение, выплавку металлов и производство металлопроката. Основным сырьем для черной металлургии является железная руда, из которой изготавливаются чугун и сталь.

Продукция предприятий черной металлургии наиболее активно используется в машиностроении и строительстве. Именно поэтому черная металлургия считается системообразующей отраслью и от ее развития напрямую зависит уровень формирования промышленного производства в целом.

Выплавка стали является одним из важнейших этапов в производственной цепочке изготовления металлопродукции. Одним из ключевых агрегатов в многоэтапном процессе обработки стали является агрегат ковш-печь. В агрегате ковш-печь происходит доводка металла до требуемого химического состава и температуры, этот процесс следует непосредственно за выгрузкой металла из плавильного агрегата (рис. 1).

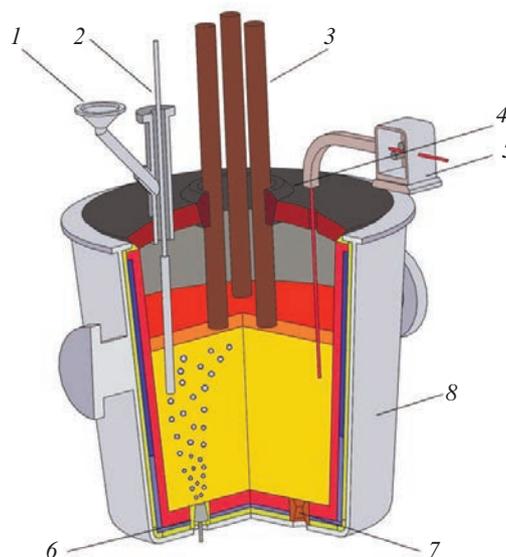


Рис. 1. Агрегат ковш-печь:

1 — воронка для подачи сыпучих добавок; 2 — аварийная фурма; 3 — графитированные электроды; 4 — свод агрегата, крышка;  
5 — трайб-аппарат; 6 — продувочное устройство; 7 — выпускное отверстие; 8 — футерованный ковш.

Доводку металла в ковш-печи начинают с его продувки, этот процесс 1-2 мин, после чего проводят измерения параметров плавки, температуры и окисления металла. С учетом содержания кислорода в металле при помощи трайб-аппарата подают расчетное количество алюминиевой проволоки для проведения первичного раскисления металла. Затем приступают к наводке восстановительного шлака, добавляя известь и плавиковый шпат. Следующий шаг — раскисление полученного шлака, при этом расходуется 0,2-0,3 кг алюминия на тонну металла. Этот процесс занимает около 5 мин.

После завершения процесса наводки шлака проводят отборы проб металла и шлака и снова измеряют температуру плавки. Затем проводят анализ собранных проб и проводят основную корректировку химического состава плавки, для чего в плавку добавляется, рассчитанное на основе анализа, количество раскисляющих и легирующих добавок. После чего металл в агрегате перемешивают не меньше чем 5 мин. После перемешивания снова берется проба металла, по результату ее анализа при необходимости осуществляют дальнейшую корректировку химического состава и температуры стали [1].

Если технологический процесс продувки металла идет нестабильно, расплав может выплескиваться из агрегата, такое явление называется выбросом. Выброс приводит к потерям годного металла в плавке, увеличению износу оборудования, а также риску получения травм для персонала.

Выброс металла из агрегата можно купировать, заблаговременно добавив в плавку алюминиевую смесь. Опытный оператор установки ковш-печь по звуку может определить надвигающийся выброс металла и принять меры по его недопущению. Однако использование органолептического метода сопряжено с рядом рисков, связанных с персональным опытом оператора и напряженностью его работы [2, 3].

В таких условиях разработка метода и алгоритмов обработки акустической информации для прогнозирования выбросов металла в ходе конвертерной плавки является актуальной научно-технической задачей.

## ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Предлагаемый к рассмотрению метод контроля состояния оборудования основан на отличиях в акустических сигнатурах агрегата ковш-печь в стабильном режиме работы и в момент перед выбросом.

В основу метода легла поэтапная обработка акустических сигналов, ниже приведено краткое описание каждого из этапов.

1. Сбор сигнала и его буферизация.
2. Предобработка — удаление шумов.
3. Извлечение признаков.
4. Классификация на основе алгоритмов машинного обучения.

Первый этап — сбор сигнала и его буферизация. Звук работы агрегата печь-ковш записывается при помощи компактного микрофона, затем аудиофайлы сохраняются на внешний носитель [4].

Второй этап — предобработка. Предобработка необходима для того чтобы сделать сигнал более устойчивым к различным шумам. Это процесс включает в себя два этапа — спектральное сглаживание путем применения КИХ-фильтра и оконного взвешивание.

Третий этап — извлечение признаков. На этом этапе происходит выделение тех параметров аудиосигнала, которые позволяют наиболее точно определить момент выброса. Различие в сигналах во время стабильной работы агрегата и в момент выброса хорошо видны на спектрограмме (рис. 2, 3).

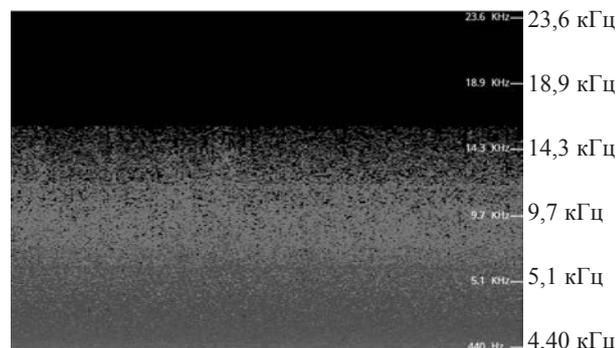


Рис. 2. Спектрограмма корректной работы агрегата ковш-печь во время продувки.

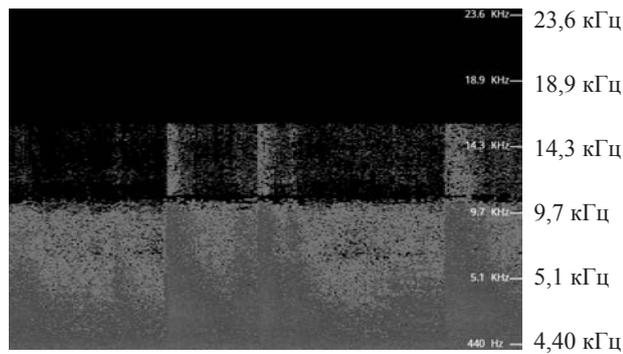


Рис. 3. Спектрограмма работы агрегата ковш-печь во время выброса металла.

Для каждой звуковой дорожки вычисляется набор мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC, от англ. mel-frequency cepstral coefficients). Сущность метода MFCC в вычисление многомерных векторов признаков на основе вычисленной высоты звука в мелах [5].

Оценка звука человеческим ухом отличается от восприятия аудиоинформации техническими средствами, линейная связь высоты звука с частотой в этом случае отсутствует. Мел отражает восприятие аудиосигналов человеком с учетом психофизических параметров. Поэтому мел наиболее подходящая единица измерения в тех случаях, когда алгоритм, заложенный в основу разрабатываемой информационной системы, основывается на анализе звука человеком. Использование мела в этих случаях позволяет облегчить составление обучающих выборок и повысить качество распознавания.

Вычисление высоты звука в мелах можно описать следующей формулой (1):

$$m = 2595 \log_{10} \left( 1 + \frac{f}{700} \right) = \ln \left( 1 + \frac{f}{700} \right), \quad (1)$$

где  $m$  — высота звука в мелах;  $f$  — частота в герцах.

Для расчета MFCC применяется преобразование Фурье, при этом неизбежно возникают сложности, связанные с необходимостью суммирования бесконечного ряда чисел. В связи с этим при реальных вычислениях применяется быстрое преобразование Фурье, для вычислений применяется следующая формула (2):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i kn}{N}}, \quad k = 0, \quad N-1, \quad (2)$$

где  $N$  — размерность дискретного отрезка сигнала;  $X_k$  — амплитуда синусоидальных сигналов, которые составляют основной сигнал.

Однако недостаточно делать вывод об информативности данных исключительно по спектру сигнала. В этих случаях используется Кепстр, т.е. спектр спектра исходного сигнала. Использование Кепстра оправдано в том случае, если обычная спектрограмма недостаточно информативна для проведения анализа [6, 7].

Сущность вычисления Кепстра в представлении существующего спектра в виде самостоятельно сигнала, а не распределения набора значений.

Вычисление MFCC происходит следующим образом. На первом шаге происходит разбиение исходного сигнала на фреймы, при этом важно чтобы разбиение происходило с перекрытием, каждый фрейм частично перекрывает соседние. Длина каждого фрейма зависит от особенностей задачи, увеличение длины фрейма повышает точность, но снижает скорость алгоритма. В предложенном алгоритме длина фрейма 35 миллисекунд [8].

Вторым шагом является вычисление спектра каждого фрейма с помощью быстрого преобразования Фурье. Вычисленные таким образом значения спектральных коэффициентов накладываются на мел-частотные окна. Эти окна сосредоточены ближе всего к низким частотам, потому что это ближе всего к механизму восприятия звука человеком: чем ниже частота, тем меньше различаются соседние частоты [10, 11].

Постобработка признаков сводится к использованию дискретного косинусного преобразования, которое генерирует многомерный вектор признаков выходного сигнала. Значения, получен-

ные в результате этого преобразования, представляют собой мел-частотные кепстральные коэффициенты [12].

Для обучения и проверки разработанной модели были подготовлены несколько обучающих выборок. Каждая обучающая выборка сформирована на основе набора из 1000 аудиозаписей. Затем каждая из этих выборок преобразуется в набор MFCC и поступает на вход классификатора.

Обучающие выборки содержат примеры стабильной работы агрегата печь-ковш. Тестовые выборки содержат аудиозаписи как стабильной работы агрегата, так и записи, сделанные в момент выброса. Доля аудиозаписей с выбросом в контрольных выборках достигает 30 %. Целевая переменная — факт выброса металла из агрегата печь-ковш.

Четвертый этап — классификация. На этом этапе используются алгоритмы машинного обучения для решения задачи бинарной классификации. В качестве обучающей выборки были использованы данные описанные выше. При выборе алгоритма машинного обучения было проведено сравнение трех алгоритмов, которые могут быть применены для бинарной классификации: метод опорных векторов (от англ. Support vector machine, SVM), Random forest, логистическая регрессия (logit model) [4]. Сравнение предложенных алгоритмов осуществлялось с применением трех основных метрик машинного обучения.

Точность — это доля объектов, названных классификатором положительными и при этом действительно являющимися положительными. В рассматриваемом случае точность характеризует какая доля выбросов металла, предсказанных системой действительно произошла в реальности.

Полнота — это то, какую долю объектов положительного класса из всех объектов положительного класса нашел алгоритм. Полнота показывает какое количество выбросов из числа произошедших система смогла прогнозировать.

F-мера — это гармоническое среднее между полнотой и точностью. Она является показателем, который учитывает обе метрики. F-мера позволяет оценить качество поисковой системы как по точности, так и по полноте и найти необходимый баланс между этими метриками.

Результаты расчета вышеуказанных метрик для предложенных алгоритмов прогнозирования выброса металла представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение алгоритмов машинного обучения

Метод	Точность	Полнота	F-мера
SVM	0,84	0,95	0,91
Random forest	0,96	0,93	0,94
Logit model	0,60	0,74	0,66

Во время практических испытаний системы прогнозирования выброса было выявлено, что более критичным для хода технологического процесса является отсутствие ложных срабатываний системы, наблюдаемое при этом снижение полноты прогнозирования было признано приемлемым. Таким образом, после первых практических испытаний и анализа приведенных метрик было установлено, что для предложенной предметной области наиболее перспективным методом является Random forest.

Алгоритм обучения для случайных лесов применяет общую технику агрегирования начальной загрузки (или пакетирования) для обучаемых деревьев. Учитывая обучающий набор  $X = x_1, \dots, x_n$  с ответами  $Y = y_1, \dots, y_n$ , многократная обработка пакетов ( $B$  раз) выбирает случайную выборку с заменой обучающего набора и подгоняет деревья к этим выборкам.

Для  $b = 1, \dots, B$ :

- 1) образец с заменой  $n$  обучающих примеров из  $X, Y$ ; назовите их  $X^b, Y^b$ ;
- 2) обучите классификационное или регрессионное дерево  $f^b$  по  $X^b, Y^b$ .

После обучения классификационного дерева прогнозы для невидимых выборок  $x'$  осуществляются путем принятия большинства голосов.

Пакетирование улучшает эффективность работы модели, так как уменьшает дисперсию, не увеличивая при этом смещение. Это означает, что несмотря на то, что прогноз конкретного дерева будет крайне чувствителен к шуму, среднее значение целого набора деревьев к шуму будет нечувствительно. Простое обучение многих деревьев на одном и том же обучающем наборе приведет к сильной корреляции деревьев (или даже к многократному повторению одного и того же дерева);

выборка начальной загрузки позволяет избежать этого эффекта.

Количество выборок/деревьев ( $B$ ) является свободным параметром. Количество используемых деревьев зависит от обучающего набора, однако обычно используются сотни или тысячи деревьев. Оптимальное количество  $B$  деревьев можно найти с помощью перекрестной проверки или путем просмотра out-of-bag ошибки.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная модель прогнозирования была реализована на языке Python. Выбор Python обусловлен сравнительной простотой синтаксиса и обширным выбором библиотек и математических пакетов. Это значительно облегчает прототипирование. Кроме того, реализованные на Python алгоритмы, показывают высокую скорость работы, что положительно сказывается на эффективности установки в целом.

Аппаратная реализация системы акустической диагностики представляет собой микрокомпьютер Raspberry Pi с подключенными к нему микрофоном и внешним носителем для хранения данных (рис. 4).

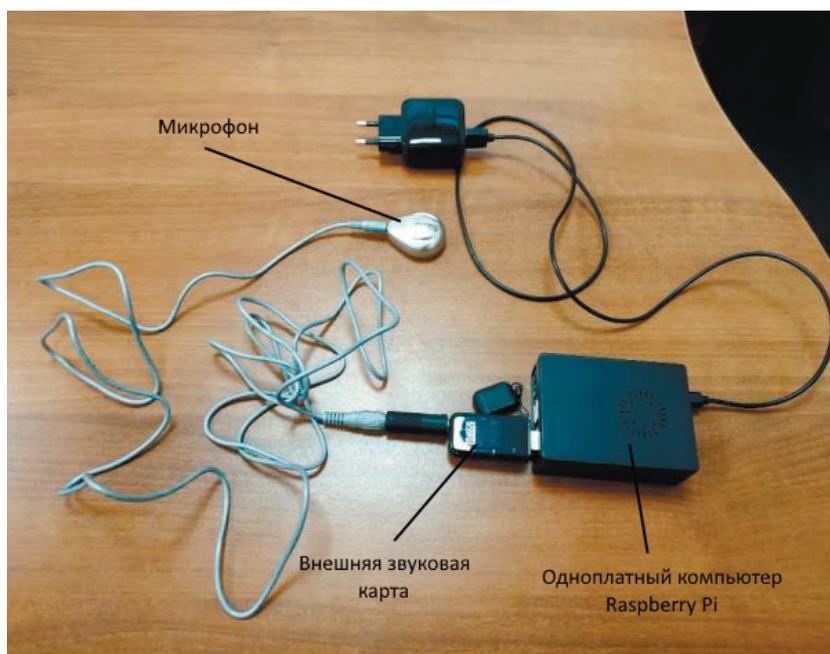


Рис. 4. Прототип устройства акустического контроля.

Установка размещается на посту управления контролируемого агрегата (рис. 5, 6) и транслирует информацию о его работе в ПО «Прогнозирование выброса» (рис. 8), установленное на рабочей машине дежурного, программа отображает информацию о текущем состоянии оборудования и подает сигнал в случае возникновения угрозы выброса металла.

Особенности агрегата печь-ковш вынудили применить некоторые нестандартные технические решения. Так, находящийся в непосредственной близости от расплавленного металла микрофон был помещен в металлическую трубу для предотвращения его повреждения и продления срока службы (рис. 7). Это, в свою очередь, повлекло за собой необходимость переобучения модели, т.к. защищающая микрофон труба искажал звук работы агрегата.

Созданный прототип прошел испытания на агрегате ковш-печь сталеплавильного производства компании Северсталь.

В течении года промышленной эксплуатации предложенная система показала высокую эффективность, ее применение позволило прогнозировать 93 % выбросов, при этом число ложноположительных срабатываний не превышало 3,7 %.

Кроме того, аппаратная составляющая проекта значительно дешевле и проще в монтаже применяемого ранее оборудования.



Рис. 5. Первоначальный вариант размещения оборудования на установке ковш-печь.



Рис. 6. Штатный вариант расположения диагностического оборудования.



Рис. 7. Металлическая труба с размещенным внутри нее микрофоном.

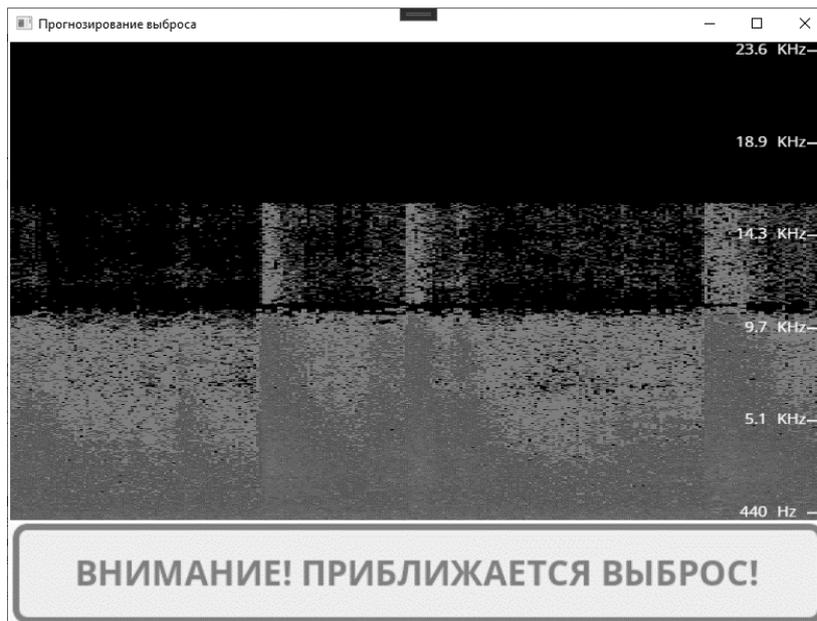


Рис. 8. Интерфейс программы прогнозирования выбросов металла.

Дальнейшее развитие программно-аппаратного комплекса ведется в направлении удешевления аппаратной составляющей и увеличения горизонта прогнозирования выброса.

### ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы была построена модель для контроля технологического процесса продувки металла в агрегате ковш-печь с целью купирования выбросов металла. Применение предложенного подхода позволит сократить текущие затраты на каждую плавку за счет предотвращения потерь металла в процессе плавки.

В качестве перспективы предложенного подхода предлагается дальнейшее совершенствование алгоритмов классификации с целью распознавания других аномалий процесса обработки металла в агрегате ковш-печь.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюдкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е., Маринцев С.Н. Производство стали на агрегате ковш-печь / Под научной редакцией д.т.н. проф. Д.А. Дюдкина. Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2003. 300 с.
2. Кошек К.Т., Кликушин Ю.Н., Кашевкин А.А., Латыпов С.И., Софьина Н.Н., Савостина Г.В., Кошек А.К. Интеллектуальная система вибродиагностики нефтегазового оборудования // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 31—41.
3. Кошек К.Т., Кликушин Ю.Н., Кобенко В.Ю., Софьина Н.Н., Савостин А.А., Кашевкин А.А. Диагностика насосного агрегата на основе идентификационных измерений вибросигналов // Дефектоскопия. 2016. № 5. С. 36—43.
4. Мартюгов А.С., Еришов Е.В., Варфоломеев И.А., Богачев Д.В., Виноградова Л.Н. Метод обработки акустической информации для контроля состояния клапанов газоочистного оборудования // Дефектоскопия. 2021. № 10. С. 16—24.
5. Козлова Л.П., Козлова О.А. Особенности задач распознавания звука / Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2020. Т. 1. С. 185—187.
6. Фотеску Н.К., Фешина Е.В. Распознавание звука и принцип работы мобильного приложения «Shazam» / Цифровизация глобализация мировой науки и техники: новые исследовательские методы и подходы. Материалы V Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 30 ноября 2020 года. Ростов-на-Дону: ООО «Издательство ВВМ», 2020. С. 59—63.
7. Комаров П.С., Квац А.И. Обработка голосовых сигналов при помощи мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC) // Аспирант и соискатель. 2020. № 6 (120). С. 25—28.

8. *Зенков В.В.* Применение аппроксимации дискриминантной функции Андерсона и метода опорных векторов для решения некоторых задач классификации // *Автоматика и телемеханика*. 2020. № 1. С. 147—160.
9. *Мишакин В.В., Гончар А.В., Ключников В.А., Курашкин К.В., Фомин А.Е., Сергеева О.А.* Контроль состояния циклически деформируемых нержавеющей сталей акустическим и вихретоковым методами // *Измерительная техника*. 2021. № 2. С. 62—67.
10. *Ремшев Е.Ю., Соболев И.А., Олехвер А.И., Лукичев В.Ю.* Разработка бортового комплекса неразрушающего контроля конструкции летательного аппарата методом акустической эмиссии // *Noise Theory and Practice*. 2021. Т. 7. № 2 (24). С. 65—82.
11. *Злобин Д.В., Волкова Л.В., Богдан О.П., Земсков Т.И., Казанцев С.В.* Универсальная экспериментальная установка для проведения акустических исследований // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 2. С. 28—36.
12. *Пьянков В.А., Пьянков И.Н.* Акустические методы контроля лопаток газотурбинных двигателей // *Технология машиностроения*. 2021. № 2. С. 34—48.
-

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАЗОРОВ В БОЛТОВЫХ СТЫКАХ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

© 2023 г. А.Г. Антипов<sup>1</sup>, А.А. Марков<sup>2,\*</sup>, Е.А. Максимова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Россия 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

<sup>2</sup> АО «Радиоавионика», Россия 190005 Санкт-Петербург, Троицкий пр., 4Б  
E-mail: \*anarmarkov@gmail.com

Поступила в редакцию 23.01.2023; после доработки 20.04.2023

Принята к публикации 05.05.2023

Периодическая оценка величин зазоров болтовых стыков рельсов позволяет прогнозировать надежность бесстыкового пути и предотвратить его температурные деформации. Цель исследований — поиск простого и надежного способа оценки стыковых зазоров, позволяющего определять искомые величины при высокоскоростном сканировании в автоматическом режиме в широком диапазоне температур. Приведен краткий обзор технических решений и методик оценки стыковых зазоров, основанных на разных физических принципах. В предлагаемом способе использован метод вытеснения магнитного потока (MFL) с размещением электромагнитов на осях колесных пар двухосной тележки. Такие системы намагничивания в настоящее время применяются на вагонах-дефектоскопах и обеспечивают стабильный магнитный поток в контролируемых рельсах.

С помощью трехмерной магнитоэлектростатической модели отрезка рельса с болтовым стыком исследованы характеристики полей рассеяния при изменении величины стыкового зазора во всем практическом диапазоне. Отобраны характеристики, наиболее чувствительные к изменению зазора и по которым можно установить его величину. При малых значениях величин зазоров в качестве информативного параметра предложено использовать амплитуду сигнала магнитного датчика, а при больших зазорах — расстояние между экстремумами сигнала. Результаты компьютерного моделирования влияния величины стыкового зазора на параметры магнитного сигнала от него качественно совпадают с результатами натурных измерений, выполненных при скоростях контроля до 60 км/ч.

*Ключевые слова:* магнитный метод, рельсовая дефектоскопия, разрыв рельса, болтовой стык, стыковой зазор, бесстыковой путь, намагничивающая система, магнитные датчики.

DOI: 10.31857/S0130308223060027, EDN: ZVSIZQ

### 1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Безопасность движения поездов как по звеньевому, так и по «бесстыковому» рельсовому пути в значительной мере зависит от состояния болтовых стыков.

Бесстыковой путь состоит из сварных рельсовых плетей, обычно — длиной 800 м, которые разделяются уравнительными пролетами (две-три пары разрядных рельсов на обеих нитках пути, скрепленных болтовыми стыками), изолирующими стыками, зонами стрелочных переводов и станционных звеньевых путей [1]. Концы сварной плети изменяют свою длину в зависимости от температуры окружающего воздуха. Кроме того, на бесстыковых путях имеются и места временного восстановления плети (при обнаружении дефекта в рельсе участок плети длиной 8—11 м вырезается и устанавливается временный рельс на два болтовых стыка).

Несмотря на укладку бесстыкового пути (более 75 % главных путей), на сети дорог ОАО «РЖД» к 2022 г. все еще имеется более 9,5 млн. болтовых стыков (рис. 1).

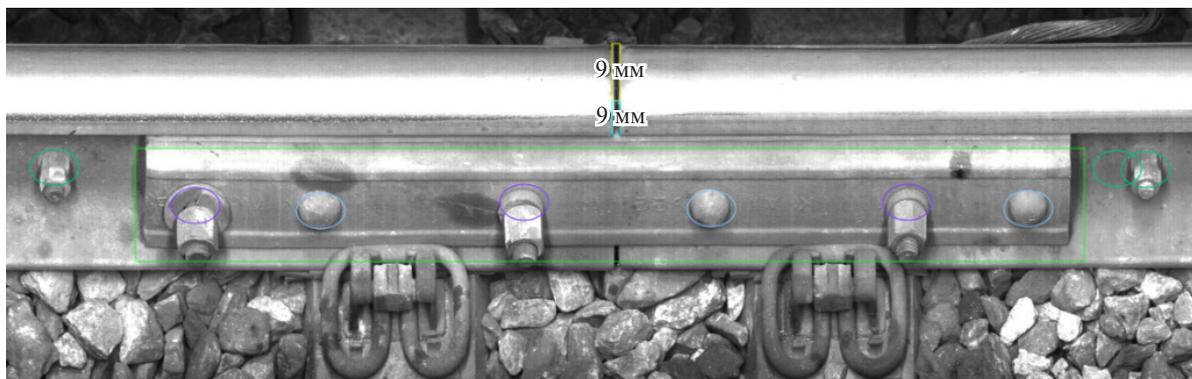


Рис. 1. Болтовой стык рельсов в стальных накладках со стыковым зазором 9 мм.

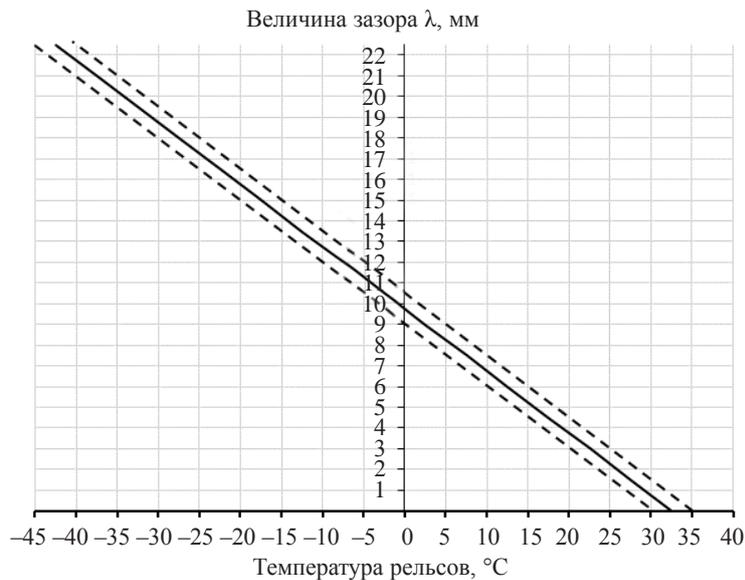


Рис. 2. Номинальные величины стыковых зазоров в болтовых стыках рельсов длиной 25 м.

В холодное время года рельсы укорачиваются, а в жаркое время — удлиняются. В болтовых стыках рельсов при их укладке оставляют стыковые зазоры с тем, чтобы при колебаниях температуры рельсы могли изменить свою длину во избежание возникновения значительных температурных напряжений в сварных рельсовых плетях (летом — напряжений сжатия, зимой — растяжения).

На рис. 2, построенном по данным [1], показаны номинальные значения конструктивных зазоров  $\lambda$  от температуры рельсов для резко континентального климата (с годовой амплитудой температуры рельсов более 100 °C).

В теплое время года неконтролируемое температурное расширение рельсовой плети может привести к так называемому внезапному «выбросу» пути и к сходу подвижного состава с рельсов. По действующим нормам [1] для боковой устойчивости звеньевое пути в летнее время не допускается наличие более двух подряд нулевых зазоров для рельсов длиной 25 м или более четырех нулевых зазоров при рельсах длиной 12,5 м. При наличии нулевых зазоров движение поездов закрывают и немедленно приступают к исправлению пути. При низких температурах, для предупреждения разрыва рельсовых стыков на концах плети (из-за среза стыковых болтов, скрепляющих стык в накладках), зазоры не должны превышать 22 мм (для рельсов длиной 25 м с диаметрами отверстий 36 мм). До производства работ по регулировке зазоров скорости движения поездов ограничивают. Изменение суммы зазоров на 52 мм при трех уравнильных рельсах требует замены одного из них [2].

Периодическая оценка величин стыковых зазоров позволяет прогнозировать надежность рельсового пути и предотвратить нежелательные последствия при наступлении экстремальных и близких к ним температур. В зависимости от времени года возникают две принципиально разные задачи при мониторинге состояния стыковых зазоров: при низких температурах нельзя допускать увеличения стыковых зазоров более конструктивной величины, а при высоких положительных температурах — уменьшения зазоров до нулевых значений. При этом для практики не столь важны точные значения измеряемых величин, а важна динамика изменения зазоров во времени, особенно в период экстремальных изменений температур воздуха.

## 2. ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЗАЗОРОВ В БОЛТОВЫХ СТЫКАХ

Учитывая важность задачи мониторинга зазоров в болтовых стыках рельсов, в мировой практике предложены множество технических решений и методик, основанных на разных физических принципах.

В работе [3] предложен акустический способ обнаружения неисправностей рельсового пути, где по параметрам акустических импульсов, возникающих в результате механического удара колес подвижной единицы о кромки болтового стыка, оценивают величину стыкового зазора.

В способе обнаружения температурных напряжений в рельсах [4] одной из основных операций является определение стыкового зазора с помощью системы видеорегистрации болтовых стыков. На современных российских диагностических вагонах-путеизмерителях [5] и вагонах-дефектоскопах [6] установленные устройства сплошной видеорегистрации рельсового пути позволяют измерять величину стыковых зазоров. Существуют также предложения размещать устройства видеорегистрации для измерения зазоров в кабинах локомотивов поездов [7] и даже на беспилотных летательных аппаратах [8]. Однако зависимость получаемых фотоизображений рельсов от климатических условий (снег, дождь, тени на рельсах от объектов инфраструктуры), грубые ошибки из-за наплывов или сколов металла на концах рельсов, а также сложность автоматического распознавания изображений стыков, обуславливают низкую достоверность и надежность данных технических решений.

Весьма распространены устройства и способы оценки стыковых зазоров с помощью вихретоковых преобразователей [9—12]. Однако они требуют создания специальной аппаратуры, результаты значительно зависят от положения датчиков относительно поверхности катания рельса (величины подвеса датчиков) и обладают недостаточной достоверностью, преимущественно оценивая значительные (выше 26 мм) величины стыковых зазоров [13].

Достаточно новые способы обнаружения разрыва рельсового пути (например, [14]) с использованием укладываемых вдоль рельсов оптоволоконных кабелей требуют значительных первоначальных вложений и не обеспечивают возможность определения величин зазоров с требуемой точностью.

Таким образом, до настоящего времени специалисты, занимающиеся текущим содержанием рельсового пути, вынуждены регулярно проводить измерение стыковых зазоров вручную с помощью металлического мерного клина с миллиметровой шкалой. Эксплуатируемые на сети ОАО «РЖД» вагоны-путеизмерители с вихретоковой системой измерения позволяют надежно фиксировать только стыковые зазоры со значительным раскрытием [13]. В результате имеет место низкая достоверность и производительность ручных измерений и ограниченные возможности автоматизированных систем контроля искомых величин.

Целью настоящих исследований является поиск простого и надежного метода оценки зазоров болтовых стыков рельсов, позволяющего оценивать зазоры с высокой достоверностью в автоматическом режиме в широком диапазоне температур.

### 3. ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На российских железных дорогах многие годы успешно эксплуатируются мобильные диагностические комплексы — вагоны-дефектоскопы, реализующие магнитный метод контроля рельсов. Метод предполагает формирование в объекте контроля магнитного потока высокой плотности (1,0—1,2 Тл в статических условиях) при помощи внешних источников постоянного магнитного поля — намагничивающей системы. Сформированный магнитный поток рассеивается на несплошностях в объекте контроля, в результате чего вблизи поверхности последнего образуется возмущения магнитного поля, фиксируемые датчиками.

Магнитный метод показал высокую эффективность обнаружения поверхностных и внутренних дефектов в головке рельсов на глубине залегания до 20 мм при скоростях контроля до 60 км/ч [15]. Выявлена высокая воспроизводимость сигналов магнитного канала от различных конструктивных элементов рельсового пути (болтовых и сварных стыков рельсов, элементов стрелочных переводов и т.п.).

Наличие эффективной системы намагничивания критически важно при реализации магнитного метода, поскольку использование только остаточной намагниченности рельса, возникающей в магнитном поле Земли при периодических нагрузках, не приводит к появлению сигналов датчиков, достаточно стабильных и несущих в себе информацию о характеристиках несплошности [16]. Высокая воспроизводимость и устойчивость сигналов магнитного метода при контроле рельсов достигается благодаря оригинальной конструкции системы намагничивания. Система основана на использовании осей колесных пар подвагонной тележки в качестве сердечников электромагнитов, колеса тележки в таком случае играют роль магнитных полюсов [19]. Колеса прокатываются по контролируемым рельсам и инжектируют магнитный поток в объект контроля непосредственно через пятна контакта колесо—рельс.

Фиксацию магнитных полей рассеяния над конструктивными элементами и дефектными сечениями рельсов осуществляют с помощью магниточувствительных датчиков (индукционных ка-

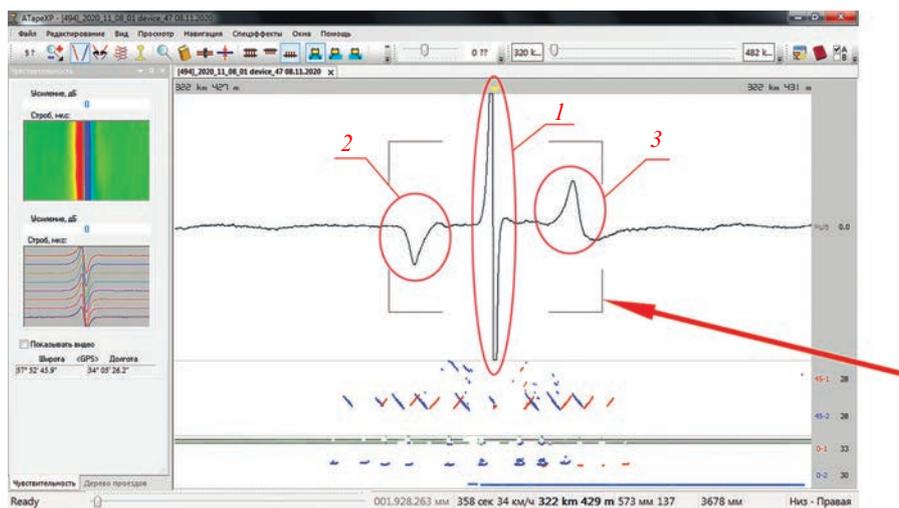


Рис. 3. Фрагмент реальной дефектограммы участка рельса длиной около 4 м (стрелкой показана автоматически распознанная программой зона болтового стыка):

1 — сигнал магнитного датчика от стыкового зазора; 2, 3 — импульсы от концов стыковых накладок (см. рис. 1).

тушек или датчиков Холла), расположенных над поверхностью катания рельса между полюсами электромагнитов вблизи заднего (относительно направления движения) колеса. В зоне болтового стыка в непосредственной близости от стыкового зазора происходит выброс распространяющегося в рельсе магнитного потока в воздух. Магниточувствительный датчик реагирует на это, формируя характерный сигнал значительной амплитуды на дефектограмме (рис. 3).

Попытки использования магнитного метода для обнаружения и оценки разрыва рельсов железнодорожного пути предпринимались и ранее [17, 18]. Однако они основаны на использовании в качестве информативного параметра величины магнитного потока в цепи, включающей в себя стыковой зазор. Поскольку магнитная цепь содержит элементы с плохо контролируемым и значительным магнитным сопротивлением, такие как зазор между полюсами намагничивающей системы и рельсом, при практической реализации подобного подхода возникают проблемы либо недостаточной стабильности показаний, либо недостаточной чувствительности. Мы предлагаем использовать иной способ определения ширины зазора болтового стыка, основанный на данных рассеяния магнитного потока на разрыве рельса. Иначе говоря, извлекать информацию об искомой ширине не из величины магнитного потока, а из характеристик распределения магнитного поля в окрестности зазора. Такой способ является традиционным для магнитного метода контроля, когда речь заходит об определении параметров дефектов, таких, например, как глубина залегания поперечных трещин головки рельса [19]. Принципиальная возможность оценки параметров дефектов, исходя из характеристик магнитного поля рассеяния, была обоснована теоретически еще в 60-х годах прошлого века при использовании моделей магнитных диполей [20, 21].

Положительные качества магнитного метода (всепогодность, стабильность и воспроизводимость сигналов и др.) и возможность автоматического распознавания сигналов от элементов рельсового пути делают задачу определения величины стыкового зазора по данным магнитного контроля вполне реализуемой. Для решения поставленной задачи сигналы магнитного метода контроля в зоне стыковых зазоров предварительно изучены на трехмерной компьютерной модели. После выбора тех параметров сигналов, которые содержат в себе наибольшую информацию о величине зазора, выполнена проверка возможности использования указанных параметров для определения ширины зазоров болтовых стыков в реальных условиях контроля.

#### 4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ЗОНЕ БОЛТОВОГО СТЫКА

Для выбора параметра сигнала магнитного датчика, наиболее информативного с точки зрения определения величины зазора, выполнено компьютерное моделирование процесса рассеяния магнитного потока в зоне болтового стыка. За основу взята трехмерная магнитостатическая модель, которая применялась ранее [15] для изучения рассеяния магнитного потока на поперечной

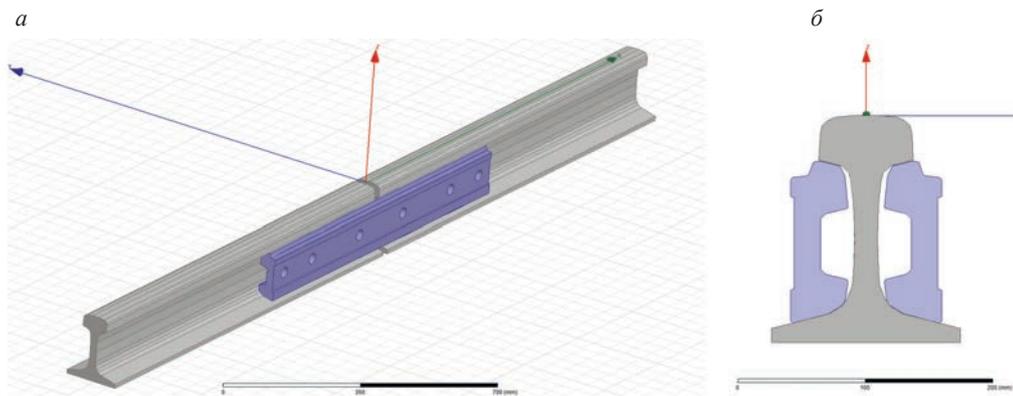


Рис. 4. Используемая при расчетах трехмерная модель:  
*a* — рельс с зазором и накладками; *б* — вид с торца рельса.

трещине головки рельса. Однако модель дополнена рельсовыми накладками длиной 1 м, а вместо поперечной трещины головки в ней фигурировал поперечный разрыв рельса переменной ширины, затрагивающий головку, шейку и подошву рельса (см. рис. 4*а*, *б*). Разрыв рельса располагался ровно по центру накладки по продольной координате.

Как и в [15], рассматриваемая расчетная область представляла собой цилиндр. Диаметр цилиндра составлял 1 м, длина — 2,5 м. Ось цилиндра была сонаправлена направляющей рельса и находилась в продольной плоскости симметрии в 10 см ниже поверхности катания. На боковой поверхности цилиндра ставилось условие наличия только продольной, сонаправленной оси цилиндра составляющей вектора магнитной индукции. Величина напряженности магнитного поля на боковой поверхности цилиндра в воздухе задавалась равной 2000 А/м, что соответствует магнитной индукции в рельсе 1,1—1,2 Тл. Подобные уровни намагненности рельса наблюдаются при использовании реальных намагничивающих систем рельсовой дефектоскопии [15, 19]. На торцевых гранях цилиндра задавалось граничное условие наличия только нормальной составляющей вектора магнитной индукции. Задание продольной намагненности рельса за счет граничных условий позволяет абстрагироваться от конкретного вида намагничивающей системы, применяемой для генерации магнитного потока в реальных условиях.

Расчет модели проводился методом конечных элементов в специализированном программном пакете Ansys Maxwell. В этом пакете тетраэдрическая сеть узлов, для которых вычисляются компоненты векторов магнитной индукции и напряженности магнитного поля, адаптируется в итерационном процессе расчета.

На рис. 5*а* показано полученное в результате моделирования распределение магнитной индукции на поверхности рельса и накладок в области стыка случая, когда стыковой зазор равен 8 мм. В находящемся между накладками отрезке рельса, наблюдается уменьшение уровня намагненности приблизительно на 40 % по сравнению с участком рельса, где накладки отсутствуют.

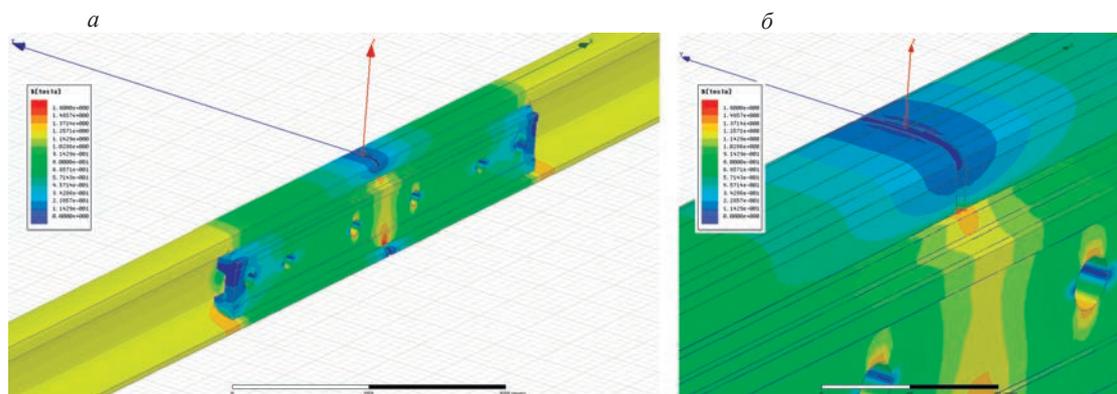


Рис. 5. Намагниченность ферромагнитных элементов модели, полученная в результате расчета, при ширине зазора 8 мм:  
*a* — распределение магнитной индукции на поверхности рельса и накладок; *б* — в непосредственной близости от зазора.

Это обусловлено перераспределением магнитного потока из рельса в рельсовые накладки, сопровождаемое снижением уровня напряженности магнитного поля по всему поперечному сечению рельса. Перераспределение магнитного потока в накладки происходит постепенно — так, концы накладок оказываются намагниченными довольно слабо. В непосредственной близости от зазора (рис. 5б) происходит еще большее уменьшение намагниченности рельса из-за перехода магнитного потока в воздух. Так, намагниченности в центре головки рельса снижается до уровня приблизительно 0,05 Тл, что равно уровню индукции непосредственно в воздушном зазоре.

Изменения намагниченности головки рельса сопровождаются изменением уровня индукции в воздухе над поверхностью катания — там, где обычно размещаются датчики при магнитном контроле состояния рельсов, уложенного в путь. Снижение намагниченности рельса в результате перераспределения потока в накладки приводит к уменьшению уровня магнитной индукции в воздухе вблизи поверхности рельса. Уменьшение намагниченности головки рельса в непосредственной близости от зазора, напротив, сопровождается увеличением уровня магнитной индукции над поверхностью катания из-за выхода части магнитного потока из рельса в воздух.

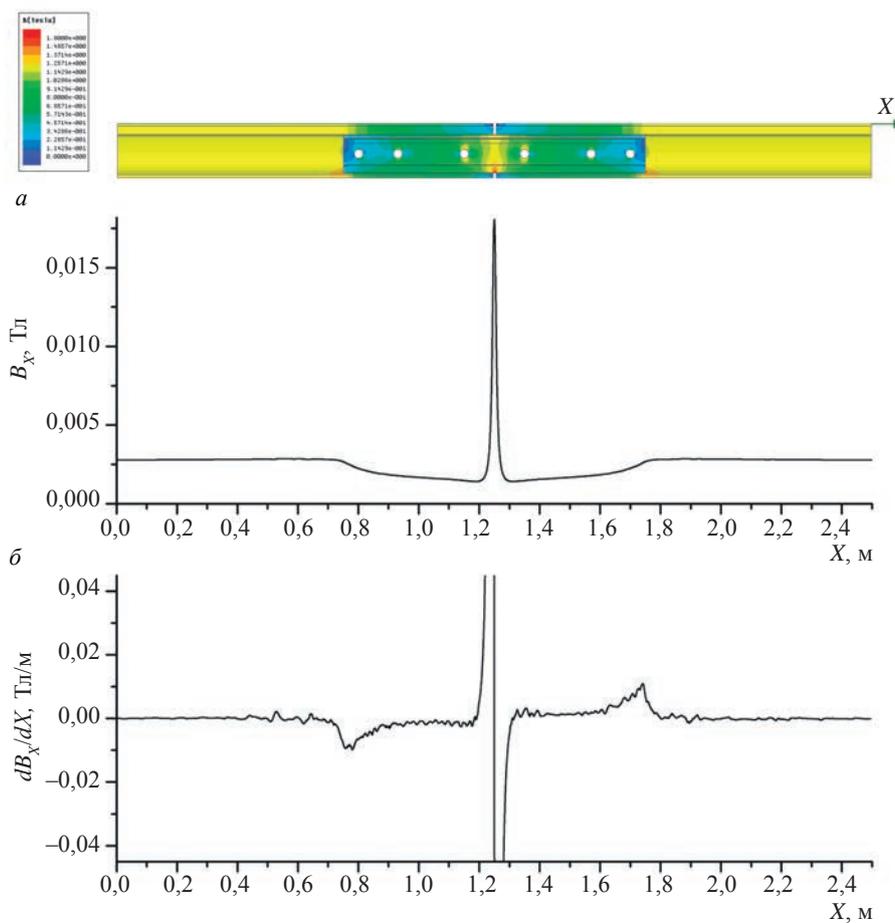


Рис. 6. Распределение магнитного поля в воздухе в 5 мм над поверхностью катания рельса, полученное в результате расчета, при ширине зазора, равной 8 мм: зависимости продольной компоненты индукции (а) и ее производной продольной (б) от продольной координаты.

На рис. 6а показано распределение продольной компоненты магнитной индукции  $B_x$  по продольной координате  $X$  в 5 мм над поверхностью катания. Фактически, именно такой сигнал должен выдать магнитный датчик, фиксирующий непосредственный уровень магнитной индукции в воздухе (например, датчик Холла), движущийся вместе с намагничивающей системой вдоль рельса. Поскольку реальный датчик измеряет уровень поля над головкой рельса по всему поперечному

сечению, изображенная на рис. 6а величина есть результат осреднения восьми отдельных величин, каждая из которых описывает распределение поля на разном удалении от центрального продольного сечения рельса, а именно  $\pm 5$  мм,  $\pm 15$  мм,  $\pm 25$  мм,  $\pm 35$  мм. Там, где присутствуют накладки — на расстоянии до 0,5 м от зазора ( $0,75 < X < 1,75$  м, сам зазор соответствует координате  $X = 1,25$  м), на рис. 6а наблюдается снижение уровня индукции в воздухе приблизительно с 2,8 до 1,5 мТл. Однако в непосредственной близости от зазора ( $1,2 < X < 1,3$  м) происходит резкое увеличение уровня индукции. Максимум достигается непосредственно над центром зазора — продольная компонента индукции в этой точке равна около 18 мТл.

При контроле рельсов для записи продольной компоненты магнитной индукции в воздухе над поверхностью катания, помимо датчиков Холла, применяются индукционные датчики. Сигнал индукционного датчика пропорционален не непосредственному уровню индукции, а изменению последнего за промежуток времени. При использовании индукционных датчиков фактически речь идет об аналоговом дифференцировании уровня индукции по времени. Если считать скорость движения датчика постоянной, то дифференцирование по времени можно заменить дифференцированием по продольной координате.

На рис. 6б показана имитация сигнала индукционного датчика, движущегося в 5 мм над поверхностью катания, — результат численного дифференцирования сигнала, представленного на рис. 6а. Когда начинаются стыковые накладки ( $0,7 < X < 0,9$  м) уровень поля над поверхностью рельса уменьшается, и индукционный датчик выдает отрицательный импульс. Когда накладка заканчивается ( $1,6 < X < 1,8$  м), уровень поля восстанавливается до значения, характерного для рельса без накладок, в этот момент индукционный датчик выдает положительный импульс. В непосредственной близости от зазора уровень поля вначале резко увеличивается, затем — резко уменьшается. Индукционный датчик реагирует на это двумя мощными разнополярными импульсами равной амплитуды — в начале идет положительный импульс, затем — отрицательный.

Именно такая картина наблюдается на рис. 6б. Амплитуда сигнала индукционного датчика непосредственно от стыкового зазора на два порядка превышает амплитуду сигналов при входе и выходе из накладок и по абсолютной величине равна приблизительно 1,2 Тл/м — при выбранном на рис. 6б масштабе по вертикальной оси большая часть импульсов от зазора не видна. Основные качественные и количественные характеристики сигнала индукционного датчика, полученного в результате моделирования, соответствуют сигналам, наблюдаемым на практике (рис. 3), что подтверждает адекватность используемой модели.

Изменение ширины стыкового зазора в компьютерной модели приводит к изменениям в распределении магнитного поля в окрестности разрыва рельса и, следовательно, может вносить коррективы в характеристики сигналов виртуальных датчиков. Действительно, на рис. 7 видно влияние величины зазора на форму сигналов датчиков, фиксирующих как непосредственно уровень поля над головкой рельса (рис. 7а), так и производную уровня поля (рис. 7б).

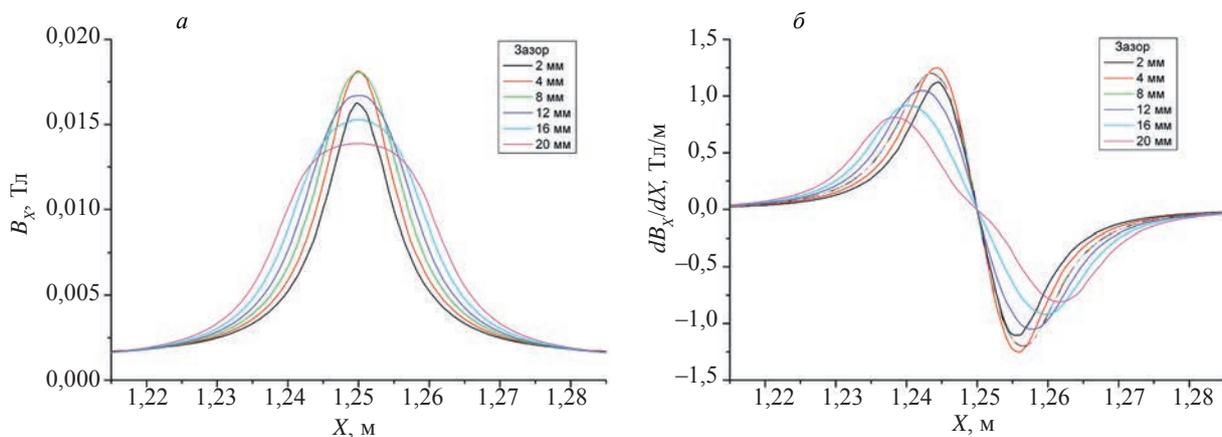


Рис. 7. Результаты расчета: распределения магнитного поля в воздухе в 5 мм над поверхностью катания рельса при различных значениях ширины зазора:

а — сигнал виртуального датчика Холла — распределение продольной компоненты индукции по продольной координате; б — сигнал виртуального индукционного датчика — распределение производной продольной компоненты индукции по продольной координате.

Если перемены в некоторой характеристике сигнала с изменением зазора действительно имеют место, то такая характеристика оказывается полезной с точки зрения решения обратной задачи, а именно — определению величины зазора по значению характеристики сигнала.

Более полезными при определении величины зазора являются те характеристики, которые в наибольшей степени чувствительны к изменению последнего — быстро монотонно растут (либо убывают) при его увеличении. Кроме того, стоит обращать внимание на инъективность отображения зазора в характеристику: если окажется, что одному и тому же значению характеристики соответствует несколько значений зазора, то однозначное решение обратной задачи оказывается невозможным. В этом случае приходится сужать диапазон рассматриваемых величин зазора, что не всегда приемлемо.

Характеристики сигнала можно отнести к трем различным группам. Первая группа включает в себя амплитудные характеристики сигнала — собственно амплитуду, размах, дисперсию по амплитуде и др. Амплитудные характеристики пропорционально растут с увеличением коэффициента усиления и не меняются при растяжении сигнала по продольной координате. Ко второй группе относятся пространственные характеристики — такие как ширина импульса на полувысоте амплитуды, расстояние по продольной координате между экстремальными значениями сигнала, дисперсия по продольной координате. Пространственные характеристики, в отличие от амплитудных, не зависят от коэффициента усиления, но чувствительны к растяжению сигнала по координате.

Наконец, третья группа включает в себя смешанные, интегральные характеристики, которые сочетают в себе как пространственные, так и амплитудные компоненты, например, площадь импульса. Интегральные характеристики реагируют как на изменения коэффициента усиления, так и на продольное растяжение сигнала.

Как амплитудные, так и пространственные, а также интегральные характеристики могут содержать информацию о стыковом зазоре. Однако можно предположить, что связь величины зазора и значения характеристики могут существенно отличаться в зависимости от принадлежности к той или иной группе характеристик. При этом связи зазора и характеристики внутри каждой группы будут иметь схожий вид.

На рис. 8 показаны зависимости амплитудных характеристик, а именно — размаха и дисперсии амплитуды сигнала индукционного датчика от величины зазора.

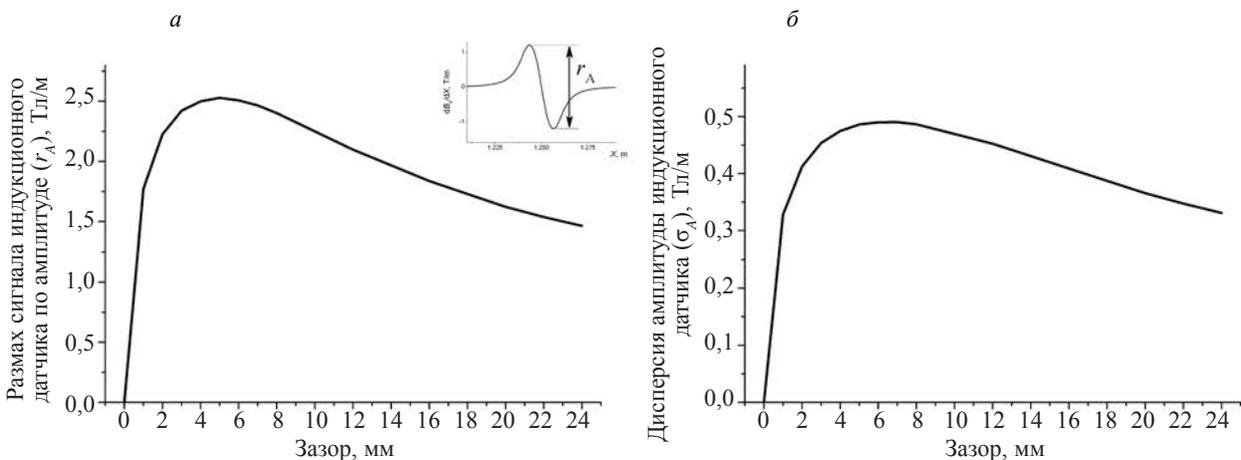


Рис. 8. Зависимости амплитудных характеристик сигнала от величины зазора:

*a* — размах сигнала индукционного датчика по амплитуде; *б* — дисперсия амплитуды индукционного датчика.

Размах  $r_A$  представляет собой разность между максимальным и минимальным значениями сигнала, а амплитудная дисперсия вычислялась по формуле:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\int_{x_s}^{x_e} (s(x))^2 dx}{x_e - x_s}}$$

на промежутке длиной 10 см вокруг центра зазора ( $x_s = 1,2$  м,  $x_e = 1,3$  м). Обе зависимости имеют почти одинаковый вид. При малых зазорах обе амплитудные характеристики резко возрастают; постепенно, с увеличением зазора, рост замедляется. При зазоре около 5-7 мм наблюдается максимальное значение характеристик, после чего начинается медленное монотонное снижение обоих показателей. Амплитудные зависимости не удовлетворяют требованию инъективности: например, значению размаха  $r_A = 2$  Тл/м соответствуют два различных значения зазора — 2 и 13 мм. Однозначный ответ возможен лишь при малых зазорах — шириной до 1,5 мм.

Если априорно полагать, что зазор малый, то амплитудные характеристики оказываются пригодными для измерения зазоров в диапазоне от 0 до 5 мм. Если изначально известно, что зазор имеет не малое значение (превышает 5 мм), то амплитудные характеристики не слишком подходят для его оценки, поскольку наклон кривой в области средних и больших зазоров невелик и точность измерения может оказаться невысокой. Из двух представленных характеристик более предпочтительной выглядит размах сигнала по амплитуде, поскольку его значение для реального сигнала вычислять проще.

Зависимости пространственных характеристик от величины зазора на рис. 9 имеют вид, принципиально отличный от вида амплитудных зависимостей.

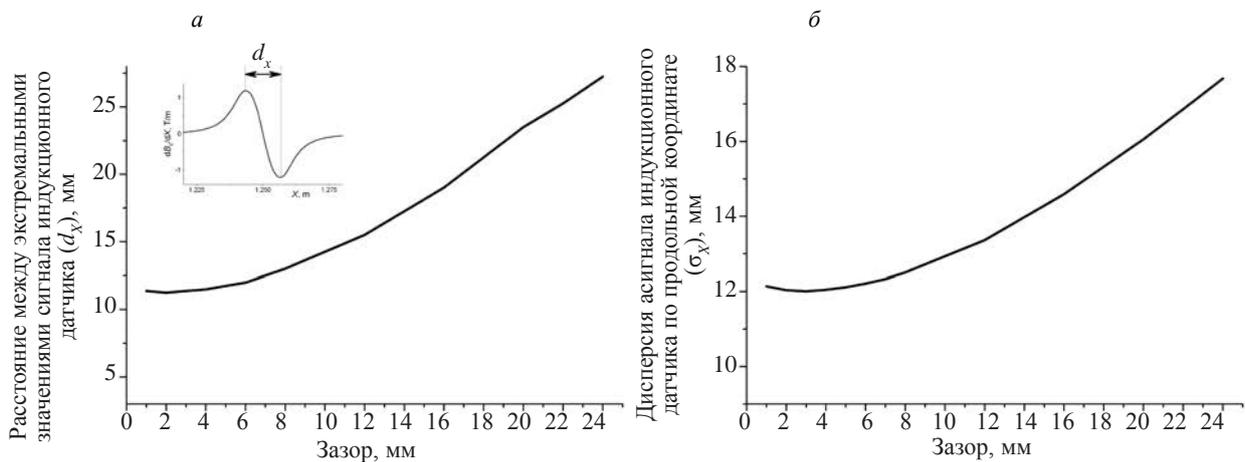


Рис. 9. Зависимости пространственных характеристик сигнала индукционного датчика от величины зазора: а — расстояние между экстремальными значениями; б — дисперсия сигнала по продольной координате.

Как расстояние между экстремумами  $d_x$  (рис. 9а), так и дисперсия сигнала индукционного датчика по продольной координате (рис. 9б), вычисляемая по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\int_{x_s}^{x_e} |s(x)|(x - \bar{x})^2 dx}{\int_{x_s}^{x_e} |s(x)| dx}}, \quad \bar{x} = \frac{\int_{x_s}^{x_e} |s(x)| x dx}{\int_{x_s}^{x_e} |s(x)| dx},$$

при малых зазорах (до 5-6 мм) практически не зависят от величины зазора. Лишь при средних значениях зазоров начинается рост показателей, переходящий при больших зазорах в почти линейную зависимость. Исходя из вида зависимостей пространственных характеристик сигнала, видно, что они позволяют измерять зазор лишь при средних и больших величинах зазора — не менее 5-6 мм. Из двух представленных характеристик более предпочтительной с точки зрения измерения зазора выглядит расстояние между экстремумами. Оно более чувствительно к изменению зазора: при увеличении зазора с 6 до 24 мм величина  $d_x$  возрастает более чем в 2 раза, в то время как дисперсия по продольной координате увеличивается лишь в 1,5 раза.

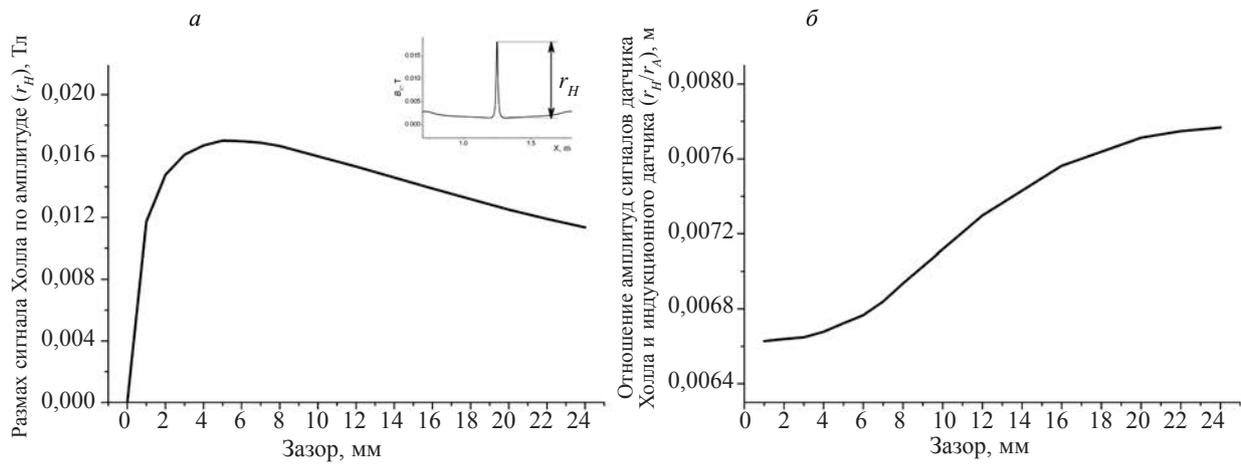


Рис. 10. Зависимости смешанных характеристик сигнала от величины зазора: *а* — размах сигнала датчика Холла; *б* — отношение размахов сигналов датчика Холла и индукционного датчика.

На рис. 10 показаны зависимости от зазора тех характеристик, которые одновременно отражают информацию и об амплитуде, и о пространственной протяженности сигнала. Размах сигнала датчика Холла по амплитуде (рис. 10*а*) по своему определению и по внешнему виду зависимости, на первый взгляд, относится к чисто амплитудным характеристикам. Однако если речь идет об анализе сигнала индукционного датчика, то данная характеристика является смешанной — интегральной.

Действительно, сигнал индукционного датчика есть производная сигнала датчика Холла, поэтому размах по амплитуде последнего есть площадь импульса первого, т. е. учитывает не только амплитуду, но и протяженность сигнала индукционного датчика по продольной координате. Тот факт, что внешний вид зависимости оказался весьма похожим на вид зависимости для амплитудных характеристик (см. рис. 8), свидетельствует о слабой корреляции между шириной импульса индукционного датчика и величиной зазора. Последнее не противоречит наблюдаемому на рис. 9 уверенному росту пространственных характеристик сигнала индукционного датчика от стыкового зазора в целом, а картина на рис. 10*а* описывает отдельный импульс — положительный или отрицательный. Т.е. с ростом зазора импульсы расходятся, увеличивая расстояние между экстремумами и дисперсию сигнала по продольной координате, но ширина самих импульсов при этом изменяется незначительно. Об этом же свидетельствует рис. 10*б*, на котором показана зависимость отношения амплитуд сигналов датчика Холла и индукционного датчика.

Фактически, представленное отношение есть результат очистки интегральной характеристики импульса индукционного датчика от амплитудной компоненты. На то, что в данном случае мы имеем дело с преимущественно пространственной характеристикой, указывает размерность отношения амплитуд (м). Внешне вид зависимости отношения от зазора похож на вид зависимости пространственных характеристик (см. рис. 9), но рост отношения с увеличением зазора оказывается не столь значительным. Так, при увеличении зазора с 6 до 24 мм отношение амплитуд вырастает лишь на 15 %, в то время как пространственные характеристики сигнала индукционного датчика, как отмечалось выше, увеличиваются в аналогичной ситуации в 1,5-2 раза. Из-за слабой чувствительности к изменению величины, которую требуется оценить, отношение амплитуд датчика Холла и индукционного датчика выглядит не слишком перспективным с точки зрения оценки значения зазора.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что ни одна из представленных выше характеристик сигнала, рассматриваемая изолированно от других, не пригодна для оценки стыкового зазора во всем практическом диапазоне значений от 0 до 25 мм. Пространственные характеристики сигнала не годятся для оценки малых зазоров, а амплитудные — непригодны для измерения средних и больших зазоров.

Однако если рассматривать как пространственные, так и амплитудные характеристики сигнала в совокупности, то ситуация меняется, поскольку они хорошо дополняют друг друга. Так, для оценки больших и средних зазоров можно воспользоваться какой-либо пространственной харак-

теристикой, например, расстоянием между экстремумами сигнала индукционного датчика по продольной координате  $d_x$ . Для малых зазоров целесообразно использовать амплитудную характеристику, например, размах сигнала индукционного датчика по амплитуде  $r_A$ .

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ЗАЗОРОВ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Для проверки возможности оценки величины зазора в реальных условиях проведены исследования, в ходе которого регистрировались сигналы магнитных датчиков от болтовых скреплений с известным значением зазора. Исследования позволили уточнить вид зависимостей между характеристиками сигналов и шириной зазора болтового стыка.

В ходе планового проезда мобильного дефектоскопического средства — вагона-дефектоскопа, оснащенного намагничивающей системой на осях колесных пар [19], проводилась регистрация распределения продольной компоненты магнитной индукции над поверхностью катания рельса посредством набора линейных биполярных датчиков Холла с чувствительностью 30 мВ/мТл. Дефектоскопическое средство также было оборудовано одомером — прибором для измерения расстояний по продольной координате. Скорость движения намагничивающей системы и датчиков составляла от 30 до 60 км/ч.

Набор из 8 датчиков располагался в 5 мм над поверхностью катания так, что расстояние между датчиками по поперечной координате составляло 1 см. Таким образом, линейка датчиков, ориентированная перпендикулярно направляющей рельса, позволяла записывать распределение поля, как над центром головки, так и со стороны рабочей и нерабочей граней. Показания всех 8 датчиков оцифровывались с шагом по продольной координате 2 мм, далее производилось осреднение и дифференцирование цифрового сигнала. В полученных данных в автоматическом режиме выявлялись участки сигнала, соответствующие зонам болтовых стыков, и для каждого участка вычислялись две характеристики импульсов от стыкового зазора: размах по амплитуде и расстояние между экстремумами по продольной координате.

В ходе проезда производилась видеозапись линейной камерой, фиксирующей состояние исследуемого рельса, которая синхронизировалась с записью сигналов магнитных датчиков. В результате появилась возможность оценивать реальные величины стыковых зазоров, которые имели место непосредственно в момент регистрации магнитных данных. Значения стыковых зазоров измерялись по полученным качественным изображениям на координате, соответствующей области, выделенной по записям магнитных датчиков как зона болтового стыка.

В ходе эксперимента проанализированы сигналы от 609 болтовых стыков с зазорами от 1 до 26 мм. В рассмотренном наборе в достаточной степени представлены стыки как с малым зазором (менее 5 мм), так и с большим — более 20 мм.

На рис. 11 показана зависимость между параметром  $d_x$  и измеренными по видеоизображению величинами зазоров рассмотренных болтовых стыков. Поскольку ширина зазора по видеоизображению измерялась с точностью до 1 мм, а дискретность оцифрованного сигнала составляла 2 мм, поле графика разбито на прямоугольные области размером  $1 \times 2$ . Градация яркости прямоугольников показывает количество обнаруженных стыков с соответствующей парой значений параметров (монохромная цветовая шкала справа на рис. 11). Большое количество стыков с зазором 8–9 мм объясняется наличием т. н. изолирующих стыков с вкладками из немагнитного материала, делающих невозможным уменьшение зазора ниже толщины вкладки. Черная линия на рис. 11 есть результат осреднения значений расстояния между экстремумами, полученными для стыков с диапазоном зазоров 3 мм.

Из рис. 11 следует, что экстремумы сигнала индукционного датчика наблюдаются дальше от центра зазора, нежели торцы рельсов. Однако при большой ширине зазора разница между положением экстремумов и торцов рельсов сходит на нет. При малой ширине зазора, напротив, эта разница возрастает, поскольку расстояние между экстремумами перестает зависеть от реального значения зазора, стабилизируясь на уровне около 13 мм. В целом зависимость между параметром  $d_x$  и величиной зазора, полученная в ходе эксперимента, хорошо согласуется с зависимостью, введенной ранее по результатам компьютерного моделирования (см. рис. 9а). Некоторые отличия можно объяснить имеющими несоответствием между использованной моделью и реальными условиями, в которых производилось намагничивание записи сигналов датчиков. В задействованной модели не учитывались магнитодинамические эффекты, такие, как влияние возникающих в рельсе вихревых токов. Учет этих факторов возможен в более сложной магнитодинамической модели, рассмотренной, например, в [22].

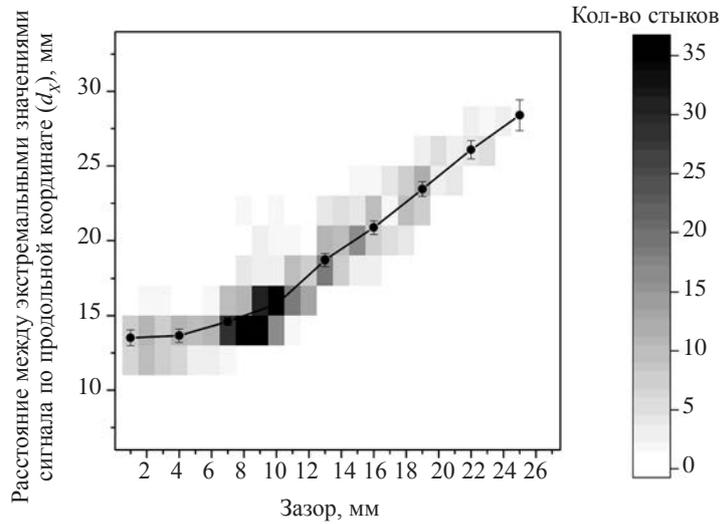


Рис. 11. Зависимость расстояния между экстремумами сигнала по продольной координате от величины зазора по данным эксперимента.

Для оценки малых зазоров, как показывают результаты компьютерного моделирования, следует использовать амплитудные характеристики сигналов. На рис. 12 приведена зависимость между размахом сигнала по амплитуде  $r_A$  и измеренной по видеоизображению величиной зазоров в рассмотренных болтовых стыках. Черной линией показано среднее значение размаха по амплитуде, полученное при каждом значении измеренного зазора. Отклонение размаха от среднего значения может быть весьма большим, однако среднее значение размаха при увеличении зазора от 0 до 4 мм демонстрирует вполне уверенный рост. Аналогичную тенденцию мы видим и на зависимости, полученной по результатам компьютерного моделирования (см. рис. 8а). Наблюдаемый рост характеристики дает возможность оценивать величины критически малых (до 4 мм) зазоров по размаху сигналов по амплитуде  $r_A$ .

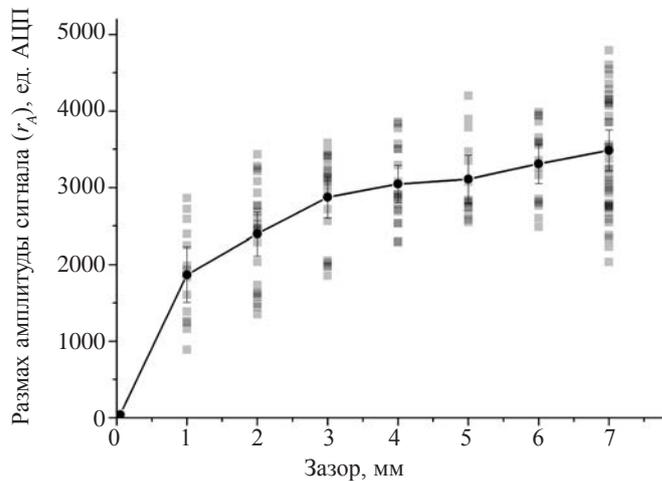


Рис. 12. Зависимость размаха сигнала по амплитуде от величины зазора по данным эксперимента.

На рис. 13 обе рассматриваемые в эксперименте характеристики сигнала сведены воедино (результат двумерной интерполяции множества из всех 609 точек, полученных в процессе эксперимента). По горизонтальной шкале отложено расстояние между экстремумами сигнала  $d_x$ , по вертикальной — размах сигнала  $r_A$ . Каждому полученному в ходе эксперимента сигналу от зазора

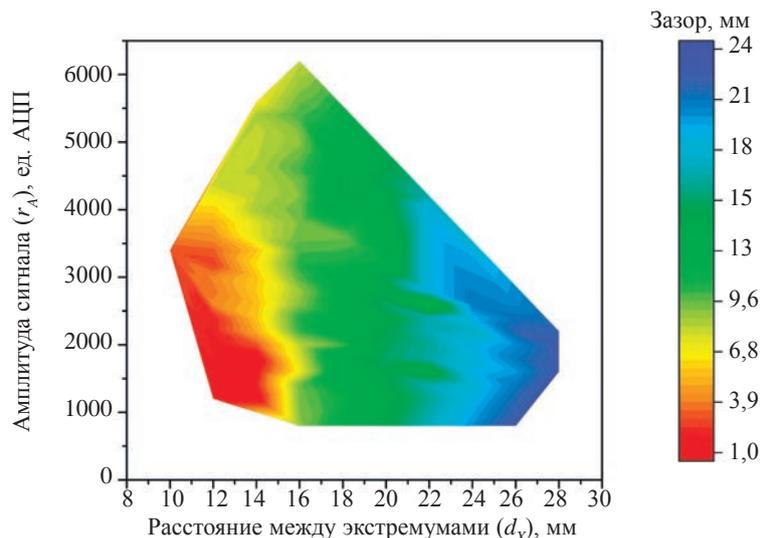


Рис. 13. Зависимость величины зазора болтового стыка от характеристик сигнала — расстояния между экстремумами и размаха по амплитуде.

болтового стыка соответствует определенная точка на плоскости. Цвет этой точки определяется величиной зазора, измеренного по видеоизображению (цветовая шкала справа на рис. 13). Если в непосредственной близости от некоторой точки отсутствуют экспериментальные данные (иначе говоря, сигналов от зазоров с похожим соотношением  $d_x$  и  $r_A$  в эксперименте обнаружено не было), то такая точка остается белого цвета.

По изображенному на рис. 13 образу можно решить обратную задачу: по заданным характеристикам сигнала оценить величину зазора. Так, если расстояние между экстремумами  $d_x$  велико ( $23 < d_x < 28$  мм), то это однозначно указывает на критически большую величину зазора (синяя область). Причем, сигналы от больших зазоров не имеют большого размаха по амплитуде (ни одного сигнала с большим значением расстояния между экстремумами и большой амплитудой в эксперименте не зафиксировано). Если расстояние между экстремумами сигнала имеет среднее значение ( $16 < d_x < 23$  мм), то и зазор будет средним (зеленая область). Но в отличие от больших зазоров, амплитуды сигналов от зазоров средней величины могут быть и весьма большими. Однако в ситуации, когда расстояние между экстремумами имеет среднее значение, большая амплитуда сигнала не свидетельствует об увеличенной ширине зазора.

Когда расстояние между экстремумами сигнала мало ( $11 < d_x < 16$  мм), амплитуда сигнала уже играет важную роль: если она велика, то ширина зазора оказывается несколько меньше среднего значения, но не является критически малой (желтая область). Но если малое расстояние между экстремумами сочетается с малой амплитудой сигнала, то мы попадаем в красную область с критически низкими значениями стыкового зазора. Последнее может свидетельствовать о возможности появления значительных температурных напряжений в рельсовой плети, представляющих угрозу безопасности движения поездов.

## 6. К ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Таким образом, в процессе движения скоростного диагностического средства, оснащенного системой намагничивания и магниточувствительными датчиками, из потока регистрируемых сигналов автоматически выделяются сигналы от зон болтовых стыков, определяются параметры сигналов от стыковых зазоров (параметры  $d_x$  и  $r_A$ ) и по измеренным параметрам оценивают величины стыковых зазоров болтовых соединений рельсового пути. В условиях значительных отрицательных температур (ниже  $-20$  °С), из процедуры анализа можно исключить этап измерения амплитуд сигналов, дополнительно упрощая реализацию метода.

Сигналы от болтовых стыков могут быть выделены из потока поступающих сигналов по их характерным признакам (см. рис. 3): наличию сигналов от концов стыковых накладок и двухполярного сигнала значительной амплитуды от стыкового зазора между накладок. Амплитуды сигналов от стыковых зазоров имеют значительно большие значения, чем от сварных стыков и потенциальных дефектов рельсов.

Вопросы определения амплитуд  $r_A$  сигналов от стыкового зазора и расстояния  $d_x$  между экстремумами (при известной скорости движения диагностического средства) не представляют трудностей и выполняются методами цифровой обработки сигналов.

Введение предлагаемого способа оценки зазора в практику периодического осмотра состояния пути позволяет дополнительно автоматизировать ряд измерительных процессов, выполняемых в настоящее время в основном вручную:

- определение наличия двух и более стыков с нулевыми зазорами;
- фиксацию изменения суммы зазоров более чем на 52 мм при трехзвеньевых уравнильных пролетах;
- мониторинг состояния стыковых зазоров в процессе скоростного сканирования диагностическими средствами.

Важно отметить, что предлагаемую методику можно реализовать без прерывания основной функции скоростного дефектоскопического средства: выявление опасных дефектов в головке рельсов. Предложенные подходы реализуются путем введения дополнительной автоматической обработки сигналов контроля, получаемых в процессе проезда диагностического средства. В дополнение к выявлению дефектов, реализация предлагаемой методики позволяет оценивать с достаточной для практики точностью величину зазоров в болтовых стыках рельсового пути.

## 7. ВЫВОДЫ

1. Показана принципиальная возможность измерения зазоров болтовых стыков рельсового пути в автоматическом режиме на скоростях до 60 км/ч магнитным методом. Магнитный метод потенциально менее подвержен воздействию мешающих факторов (загрязненность поверхности, сколы и наплывы металла на торцах рельсов и др.) по сравнению с применяющимися сейчас методами.

2. В качестве источника информации о величине зазора можно использовать параметры поля рассеяния магнитного потока, регистрируемые магнитными датчиками вблизи разрыва рельса. В настоящее время данные о распределении продольной компоненты магнитной индукции над поверхностью катания рельса собираются в ходе плановых проверок рельсового пути дефектоскопическими средствами.

3. В результате исследований не удалось определить единственный параметр сигнала магнитного датчика, позволяющий оценивать стыковые зазоры во всем диапазоне возможных значений. Предложено при малых значениях зазоров в качестве информативного параметра использовать амплитуду сигнала датчика, регистрирующего продольную компоненту магнитной индукции, а при больших зазорах — расстояние между экстремумами сигнала.

4. Результаты компьютерного моделирования влияния величины стыкового зазора на параметры магнитного сигнала от него качественно совпадают с результатами натуральных измерений, выполненных при скоростях контроля до 60 км/ч.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. № 2288р.

2. *Стоянкович Г.М., Пупатенко В.В.* Температурные деформации в зоне уравнильных пролетов бесстыкового пути // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 6. С. 34—37.

3. *Черепанов А.Н., Сергеев В.И., Масягутов Р.К., Огарко А.В.* Акустический способ обнаружения неисправности рельсового пути / Патент RU 2511644. Оpubл. 10.04.2014. Бюл. № 10.

4. *Snead E. de S.* Rail stress detection system and method / Патент US 8934007B2. 2012.

5. *Архангельский С.В., Розенбаум Л.Б., Козин М.П., Шиханов А.А., Мавроди П.Б., Розенбаум Г.Л.* Устройство видеоконтроля состояния поверхности рельсов и рельсовых креплений / Патент RU 101851. Оpubл. 27.01.2011. Бюл. № 3.

6. *Шилов М.Н., Третьяков А.А., Алексеев Д.В.* Средства и технологии автоматизированной системы видеоконтроля объектов железнодорожной инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 9. С. 11—12.

7. *Goda W., Itoi K., Nagamine N., Tsubokawa Y.* Rail Joint Gap Measurement Method using Train Frontal Images Captured by a Handy Video Camcorder // IEEE Transactions on Industry Applications 2023. V. 143. Iss. 1. P. 46—55.

8. *Yilmazer M., Karakose M., Aydin I.* Detection and Measurement of Railway Expansion Gap with Image Processing / 2021 International Conference on Data Analytics for Business and Industry. 2021. P. 515—519.

9. Mizuno T., Mochizuki D., Kawasaki S., Watanabe S., Enoki S., Yamada H. Measurement of singular joint gap of the rails by means of rail joint gap sensor with detecting coil which is crossed to the exciting coil / IEEE International Magnetism Conference. 2002. P. FV2.
10. Архангельский С.В., Козин М.П., Розенбаум Л.Б., Шиханов А.А. Устройство для величины стыковых зазоров и вертикальных ступенек железнодорожного пути / Патент RU 55716. Оpubл. 27.08.2006. Бюл. № 24.
11. Запужалов В.Г., Егизарян А.В., Редькин В.И., Рябцев В.К., Туробов Б.В. Устройство для многопараметрового контроля объектов путей сообщения / Патент RU 2082640. Заявка: 96 96108055. 05.05.1996.
12. Туробов Б.В., Дрындрожик Д.Э., Дегтярев О.Ю. Устройство для измерения тепловых зазоров в стыках рельсов железнодорожного пути / Патент RU 2192982. Оpubл. 20.11.2002. Бюл. № 32.
13. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436р.
14. Machado M., Ricci E.L.B. System and method for detecting a break in a railway track / Патент US 11130509B2. 2018.
15. Антипов А.Г., Марков А.А. Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 21—29.
16. Антипов А.Г., Марков А.А. Сравнительный анализ методов активного и остаточного намагничивания в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 2016. № 3. С. 35—42.
17. Park J.M., Beak Y.S., Choi J.H. Inductive sensor for the measurement of the rail joint gap // Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference. 2010. P. 733—734.
18. Blair S. Method and System for Detecting a Material Discontinuity in a Magnetisable Article / Патент US 11249047B2. 2022.
19. Антипов А.Г., Марков А.А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 57—68.
20. Зацепин Н.Н., Щербинин В.Е. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов. Ч. 1. Топография полей моделей дефектов // Дефектоскопия. 1966. № 5. С. 50—59.
21. Щербинин В.Е., Пашагин А.И. Влияние протяженности дефекта на величину его магнитного поля // Дефектоскопия. 1972. № 4. С. 74—82.
22. Antipov A.G., Markov A.A. Using a Tail Field in High-Speed Magnetic Flux Leakage Testing // Journal of Nondestructive Evaluation. 2022. V. 41. Art. No. 2

# АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ДВУХЭЛЕКТРОДНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

© 2023 г. Хун Чен<sup>1,\*</sup>, Бинтинг Чжа<sup>1,\*\*</sup>, Чэнцзюнь Ван<sup>1</sup>, Ци Чжун<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северный университет науки и технологий, Нанкин, 210094 Китай  
E-mail: \*cz\_chenhong@126.com; \*\*zhabingting@163.com

Поступила в редакцию 30.03.2023; после доработки 24.04.2023

Принята к публикации 26.04.2023

Данное исследование нацелено на изучение влияния различных параметров системы электростатической индукции на измеряемые характеристики объекта при двухэлектродном электростатическом обнаружении. Основываясь на принципе электростатической индукции, впервые была установлена модель системы и математическая модель для одноэлектродного электростатического обнаружения. Проанализировано влияние различных факторов на ключевые данные, получаемые при одноэлектродном электростатическом обнаружении. На его основе разработана новая модель двухэлектродного электростатического обнаружения, обоснование такого метода подробно описано. Проводилось сравнительное исследование с использованием теоретического и компьютерного моделирования. Результаты показывают, что новая система двухэлектродного электростатического обнаружения показывает себя значительно лучше, чем ее одноэлектродный аналог. Также отмечается, что расстояние до заряженного объекта по вертикали оказывает большее влияние на эффективность обнаружения по сравнению с интервалом между двумя электродами. Более того, было обнаружено, что расстояние по вертикали и интервал между двумя электродами оказывают гораздо более существенное влияние на эффективность электростатического обнаружения, чем какие-либо другие факторы.

*Ключевые слова:* электростатическое обнаружение, система электростатической индукции, влияющие факторы, компьютерное моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308223060039, EDN: AADJCB

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Статическое электричество возникает, когда различные вещества вступают в контакт, разделяются или трутся друг о друга. Такие производственные процессы, как экструзия, резка, перемешивание и фильтрация, могут генерировать статическое электричество. Учитывая, что оно может стать причиной серьезных угроз безопасности на производстве, следует тщательно следить за возможностью возникновения статического электричества. Последствия воздействия накопленного статического электричества могут быть серьезными и привести к выходу из строя, взрывам и пожарам дорогостоящих электронных устройств [1].

По мере развития науки и техники самолеты, высокоскоростные поезда и ракеты стали широко использоваться в обществе. Во время полета летающие объекты в воздухе неизбежно заряжаются статическим электричеством в результате различных процессов, таких как электризация трением, индукционная электризация и плазменная электризация вследствие работы двигателя [2]. Установлено, что заряд реактивного самолета может достигать  $10^{-3}$  С, в то время как заряд вертолета может достигать  $10^{-6}$ — $10^{-4}$  С [3]. Это приводит к образованию детектируемого электростатического поля в диапазоне тысяч метров вокруг летающего объекта. Это поле обычно имеет потенциал в десятки тысяч вольт и даже может достигать 500 кВ. Это значение может быть измерено на расстоянии тысяч метров [4]. Распространение движущихся объектов может быть обнаружено с помощью их статических характеристик, а также получены соответствующие изменения параметров в различных заряженных объектах, различных фоновых атмосферных электрических полях и различных режимах при наличии шумов [5].

Электростатическое обнаружение — это метод получения необходимой информации об объекте путем регистрации электростатического поля в окружающем пространстве [6]. Пассивная бесконтактная технология электростатического обнаружения, в частности, определяет расстояние до объекта, полагаясь на индуцированные заряды, возникающие на измерительном электроде под воздействием электростатического поля объекта [7]. А. Kimoto и др. [8] использовали электростатические датчики для контакта с материалами и добились эффективной идентификации конкретных материалов и их твердости по разнице в амплитуде индуцированного напряжения. Однако на эффективность этого подхода влияют различные факторы, присущие системе электростатической индукции. В данном исследовании рассматривается влияние этих факторов на эффективность двухэлектродного электростатического обнаружения на основе модели электростатической систе-

мы обнаружения и математической модели в соответствии с принципом электростатической индукции. Также проводится сравнительное исследование между теорией и компьютерным моделированием.

## 2. ПРИНЦИП ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Фундаментальный принцип, лежащий в основе электростатического обнаружения, связан с явлением электростатической индукции. Согласно теории, когда металлический проводник находится вблизи с заряженным объектом, на ближайшем к заряженному объекту конце проводника индуцируется заряд, знак которого противоположен знаку заряда объекта, в то время как на другом конце проводника индуцируется ровно такой же по модулю заряд, но противоположного знака. В то же время поле системы заряженный объект—индуцированные заряды формирует полевое взаимодействие, которое перераспределяет заряды внутри проводника, пока они не придут в состояние электростатического равновесия. Такое перераспределение, как правило, происходит стремительно.

Согласно теореме Гаусса, легко рассчитать плотность заряда  $\rho$  в произвольной точке на поверхности металлического проводника вблизи заряженного объекта [12]:

$$\rho = \varepsilon_0 E, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — проницаемость вакуума;  $E$  — напряженность электрического поля.

Затем суммарное количество  $q$  индуцированных зарядов противоположного знака на ближней к заряженному объекту стороне металлического проводника рассчитывается таким образом:

$$q = \int_S \varepsilon_0 E dS, \quad (2)$$

где  $S$  — площадь, на которой металлический проводник и заряженный объект обладают зарядами противоположного знака.

Когда заряженный объект и металлический проводник движутся относительно друг друга, относительное изменение электрического поля между ними вызывает изменение индуцированного заряда в металлическом проводник. Такой заряд, в свою очередь, приводит к изменению электрического тока. Уравнение для такого изменения тока выглядит как

$$i = \frac{dq}{dt} = \varepsilon_0 \int_S \frac{dE}{dt} dS. \quad (3)$$

Как можно видеть из формулы, электрический ток пропорционален изменению электрического поля объекта. Следовательно, детектируя изменения электрического тока, возможно получать информацию о движении заряженных объектов относительно металлического проводника.

## 3. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ОБНАРУЖЕНИИ

Метод электростатического обнаружения связан с обнаружением изменений в электростатическом поле объекта контроля для получения достоверных данных. Чтобы облегчить этот процесс, необходимо создать математическую модель, связанную с информацией об электрическом поле объекта контроля [3]. Вышеупомянутый металлический проводник можно заменить бесконечно тонкой индукционной электродной пластиной, которая по-прежнему удовлетворяет принципу электростатической индукции.

### 3.1. Создание математической модели электрического тока при одноэлектродном электростатическом обнаружении

В первую очередь была разработана математическая модель электрического тока при одноэлектродном электростатическом обнаружении. При условии, что измерительная пластина сталкивается с заряженным объектом, идеальным маленьким шариком с зарядом  $Q$ , площадь индукционной электродной пластины для электростатического обнаружения  $J_1$  равна  $S$ . Начальное положение шарика  $x_0$ , он движется горизонтально с относительной скоростью  $v$ ;  $x$  — проекция перемещения заряженного шарика относительно центральной точки электродной пластины;  $y$  — расстояние до

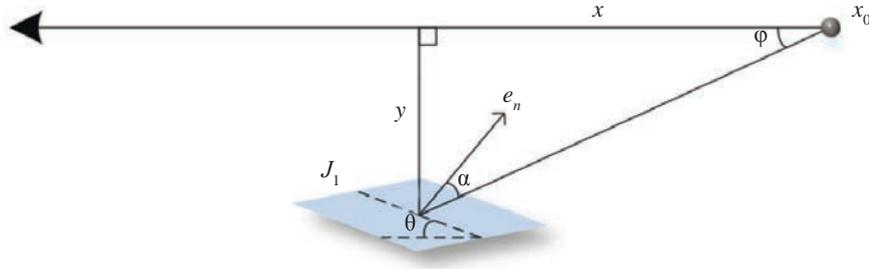


Рис. 1. Схема расположения заряженного объекта и электродной пластины  $J_1$ .

объекта;  $e_n$  — направление нормали к электродной пластине  $J_1$ ;  $\theta$  — угол между поверхностью электродной пластины и траекторией шарика, изменяющийся в диапазоне  $0—90^\circ$ . Схема расположения заряженного объекта и электродной пластины  $J_1$  показана на рис. 1 [13].

Когда заряженный объект и чувствительная пластина движутся относительно друг друга, изменение относительного электрического поля индуцирует изменение индуцируемого в электроде заряда, что приводит к изменению тока. Таким образом, формула (3) может быть преобразована в [14]:

$$i_1 = \varepsilon_0 S \frac{dE_n}{dt}, \quad (4)$$

где  $E_n$  — нормальная компонента напряженности поля в точке  $P$ .

Согласно закону Кулона, напряженность электростатического поля  $E$  вокруг заряженного объекта определяется:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0(x^2 + y^2)}; \quad (5)$$

$$E_n = E \cos \alpha. \quad (6)$$

Из рис. 1 следует:

$$\alpha = 90^\circ - (\varphi + \theta); \quad (7)$$

$$\cos \alpha = \sin \varphi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta, \quad (8)$$

$$\text{где } \sin \varphi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Легко показать, что формулы (5) и (8) преобразуются в формулу (6):

$$E_n = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0(x^2 + y^2)^{3/2}}(x \sin \theta + y \cos \theta); \quad (9)$$

$$\frac{dE_n}{dt} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\sin \theta (y^2 - 2x^2) - 3xy \cos \theta}{(x^2 + y^2)^{5/2}} \frac{dx}{dt}, \quad (10)$$

где  $x = x_0 + vt$ , затем подставляем  $\frac{dx}{dt} = v$  в формулу (10):

$$\frac{dE_n}{dt} = \frac{Qv}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\sin \theta (y^2 - 2x^2) - 3xy \cos \theta}{(x^2 + y^2)^{5/2}}. \quad (11)$$

Наконец, если это подставить в формулу (4), получаем:

$$i_1 = \frac{QvS \sin \theta (y^2 - 2x^2) - 3xy \cos \theta}{4\pi (x^2 + y^2)^{5/2}}. \quad (12)$$

Данные о положении заряженного объекта могут быть получены по изменению тока обнаружения.

### 3.2. Создание математической модели электрического тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении

Принцип двухэлектродного электростатического обнаружения показан на рис. 2. Измерительный электрод состоит из 2 измерительных пластин (электрод  $J_1$  и электрод  $J_2$ ), разделенных средой. Для обнаружения индуцированных токов электрическая цепь спроектирована таким образом, что каждый электрод соединен с резистором  $R$ . Когда электрическое поле заряженного объекта изменяется, то изменяется и индуцированный на электродах  $J_1$  и  $J_2$  заряд. При определении незначительной разности токов может быть получена информация о расположении заряженного объекта [15].

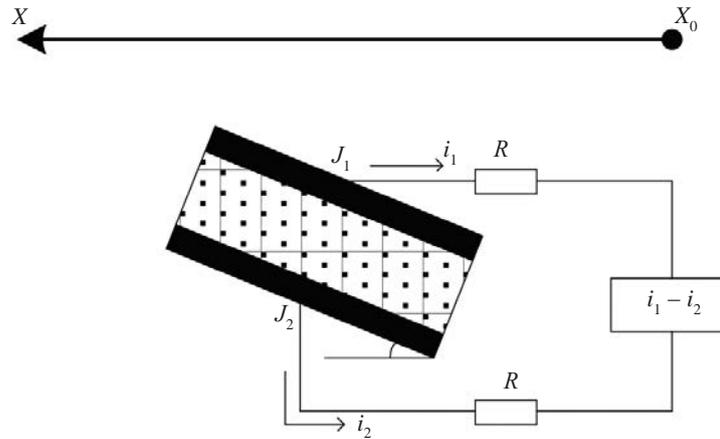


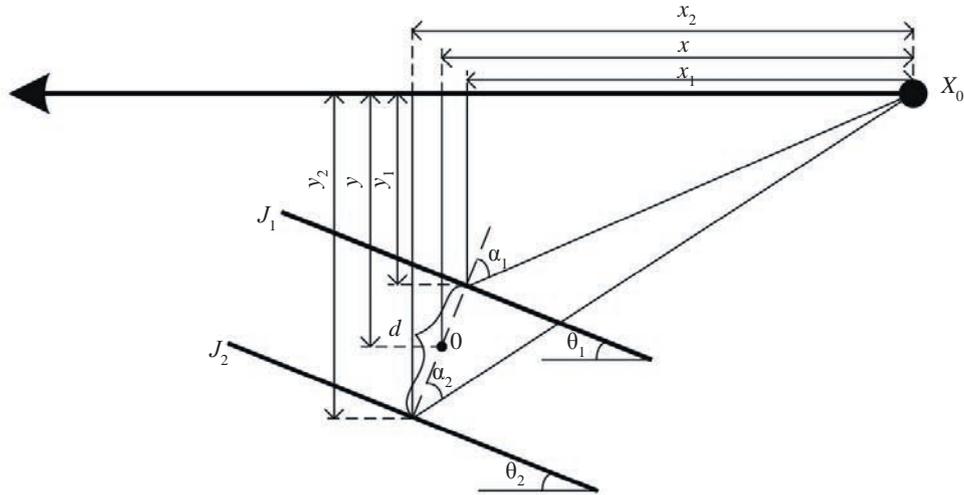
Рис. 2. Структурная схема системы двухэлектродного электростатического обнаружения.

Аналогично предполагая, что заряженный объект является идеальным маленьким шариком, обозначим его заряд как  $Q$ ; электростатическая индукция обнаружения электродных пластин  $J_1$  и  $J_2$  —  $S$ ; начальное положение шарика —  $x_0$ ; он движется горизонтально с относительной скоростью  $v$ ; начало координат — центр  $0$  двух электродных пластин;  $x$  и  $y$  — расстояние горизонтального перемещения и расстояние до заряженного шарика от центральной точки  $0$  двух электродных пластин соответственно; расстояние между пластинами —  $d$ ;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — углы между поверхностями электродов траекторией относительного движения; их диапазон —  $0$ — $90^\circ$ ; углы между напряженностью электрического поля заряженного объекта и нормальными к поверхностям  $J_1$  и  $J_2$  —  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Для облегчения понимания принципа двухэлектродного электростатического обнаружения и упрощения модели системы на рис. 3 представлена упрощенная схема.

Из формулы (12), в соответствии с рис. 3, нетрудно понять, что токи  $i_1$  и  $i_2$ , регистрируемые на электродных пластинах  $J_1$  и  $J_2$ , определяются так:

$$i_1 = \frac{QvS \sin \theta_1 (y_1^2 - 2x_1^2) - 3x_1 y_1 \cos \theta_1}{4\pi (x_1^2 + y_1^2)^{5/2}}, \quad (13)$$

Рис. 3. Схема расположения заряженного объекта и электродных пластин  $J_1$  и  $J_2$ .

$$i_2 = \frac{QvS \sin \theta_2 (y_2^2 - 2x_2^2) - 3x_2 y_2 \cos \theta_2}{4\pi (x_2^2 + y_2^2)^{5/2}}, \quad (14)$$

где  $x_1$  и  $y_1$  — расстояние горизонтального перемещения и расстояние до заряженного шарика от центра электродной пластины  $J_1$  соответственно;  $x_2$  и  $y_2$  могут быть получены таким же образом.  $x_1, x_2, y_1$  и  $y_2$  определяются по  $x$  и  $y$  в соответствии с рис. 3:

$$x_1 = x - \frac{d}{2} \sin \theta_1; \quad (15)$$

$$y_1 = y - \frac{d}{2} \cos \theta_1; \quad (16)$$

$$x_2 = x + \frac{d}{2} \sin \theta_2; \quad (17)$$

$$y_2 = y + \frac{d}{2} \cos \theta_2. \quad (18)$$

Подставляя формулы (15) и (16) в формулу (14) и формулы (17) и (18) в формулу (15), в итоге получаем выражение разности токов  $i = i_1 - i_2$ , наводимых в электродных пластина  $J_1$  и  $J_2$ :

$$i = \frac{QvS}{4\pi} \left\{ \frac{\sin \theta_1 \left[ \left( y - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right)^2 - 2 \left( x - \frac{d}{2} \sin \theta_1 \right)^2 \right] - 3 \cos \theta_1 \left( x - \frac{d}{2} \sin \theta_1 \right) \left( y - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right)}{\left[ \left( x - \frac{d}{2} \sin \theta_1 \right)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right)^2 \right]^{5/2}} - \frac{\sin \theta_2 \left[ \left( y + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right)^2 - 2 \left( x + \frac{d}{2} \sin \theta_2 \right)^2 \right] - 3 \cos \theta_2 \left( x + \frac{d}{2} \sin \theta_2 \right) \left( y + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right)}{\left[ \left( x + \frac{d}{2} \sin \theta_2 \right)^2 + \left( y + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right)^2 \right]^{5/2}} \right\}. \quad (19)$$

Приведенная выше формула представляет собой выражение разности токов при двухэлектродном электростатическом обнаружении.

Как показано на рис. 3, соответствующие потенциалы на электродных пластинах  $J_1$  и  $J_2$  могут быть выражены:

$$u_1 = \varphi_{J_1} = \frac{dE_1}{2}; \quad (20)$$

$$u_2 = \varphi_{J_2} = \frac{dE_2}{2}, \quad (21)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  могут быть получены из формулы (9):

$$E_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(x_1^2 + y_1^2)^{3/2}}(x_1 \sin \theta_1 + y_1 \cos \theta_1); \quad (22)$$

$$E_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(x_2^2 + y_2^2)^{3/2}}(x_2 \sin \theta_2 + y_2 \cos \theta_2). \quad (23)$$

Затем (22) подставляется в формулу (20), а (23) подставляется в формулу (21). Выражение для разности потенциалов, генерируемой на электродных пластинах представляется как

$$u = \frac{Qd}{8\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{x \sin \theta_1 + y \cos \theta_1 - d/2}{[(x - d \sin \theta_1/2)^2 + (y - d \cos \theta_1/2)^2]^{3/2}} - \frac{x \sin \theta_1 + y \cos \theta_1 + d/2}{[(x + d \sin \theta_1/2)^2 + (y + d \cos \theta_1/2)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (24)$$

Обозначенная выше формула представляет собой выражение разности потенциалов при двухэлектродном электростатическом обнаружении.

## 4. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

### 4.1. Сравнительный анализ одноэлектродного и двухэлектродного электростатического обнаружения

#### а) Влияние угла $\theta$ на эффективность одноэлектродного электростатического обнаружения

Было исследовано влияние угла  $\theta$  на эффективность одноэлектродного электростатического обнаружения. Предположим, что заряд шарика  $Q = 1 \times 10^{-5}$  С, интервал его перемещения  $x = -10 \sim 10$  м, а расстояние до шарика  $y = 5$  м, на таком расстоянии шарик может рассматриваться как точечный заряд. Относительная скорость движения снаряда  $v = 1000$  м/с, чувствительный участок пластины  $S = 0,02$  м<sup>2</sup>, центр электродной пластины  $x = 0$  м. Полагая, что  $\theta$  равен 0, 45 и 90°, формула (12) использовалась в Matlab для математического моделирования. Форма сигнала тока при одноэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 4.

Во время движения заряженного объекта (по мере его приближения) на свободный заряд электрода действует большая сила электрического поля, что приводит к большему изменению индуцированного заряда и большему индуцированному току. Из формулы (4) получается, что индуцированный ток не связан с напряженностью электрического поля, но пропорционален скорости изменения электрического поля. Из формы сигнала  $\theta = 0^\circ$  видно, что при моделировании заряженный объект движется прямо над чувствительным электродом, и расстояние между ними наименьшее. В этой точке напряженность электрического поля, перпендикулярная направлению электрода, наибольшая, в результате чего в  $x = 0$  м образуется полюс. Следовательно, изменение напряженности электрического поля равно 0, а ток  $i_1$  тоже равен 0 [16]. Анализируя движение нулевой точки индуцированного тока формы сигнала  $\theta = 45^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , можно заключить, что при относительном движении объекта и электрода, как только электрическое поле становится перпендикулярным электроду, относительное положение заряженного объекта и электрода изменяется, что приводит к изменению полюса электрического поля. Следовательно, точка нуля  $i_1$  изменяется.

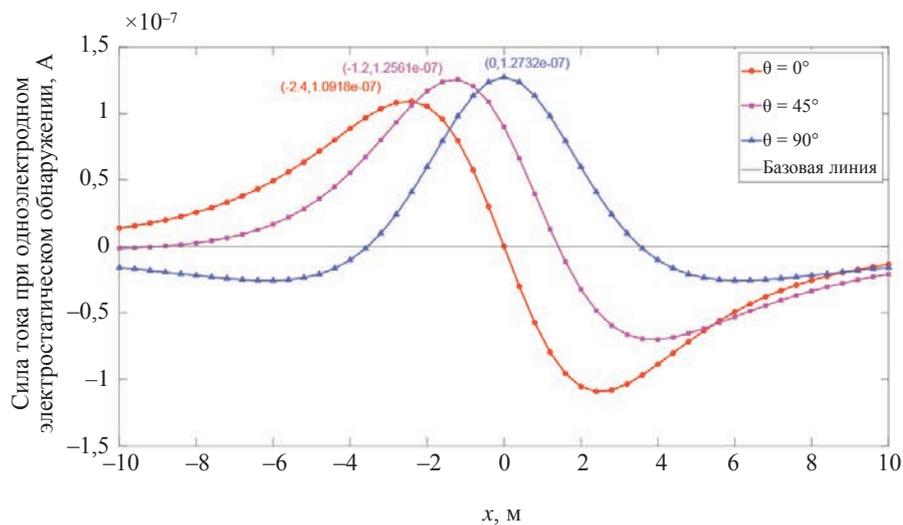


Рис. 4. Форма сигнала тока при одноэлектродном электростатическом обнаружении.

Сравнивая формы сигналов тока при контроле одним электродом при  $\theta = 45^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , можно прийти к выводу, что при увеличении угла  $\theta$  (диапазон  $\theta$  в пределах  $0 \sim 90^\circ$ ) максимальное значение тока  $i_1$  соответственно увеличивается. Когда  $\theta = 90^\circ$ ,  $i_1$  принимает максимальное значение в  $x = 0$  м, и результаты расчета показывают, что  $i_{1\max} = 1,2732 \times 10^{-7}$  А.

#### б) Влияние угла $\theta$ на эффективность двухэлектродного электростатического обнаружения

Используя выражения для параметров объекта разности токов и разности потенциалов при двухэлектродном электростатическом обнаружении, проводится математическое моделирование тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении. Было предположено, что интервал между пластинами  $d = 5$  м, а центр пластин находится в  $x = 0$  м, принимая во внимание все предположения, обозначенные выше. Также предположено, что  $\theta = \theta_1 = \theta_2$  принимают три значения:  $0$ ,  $45$  и  $90^\circ$ , которые в сочетании в формулами (19) и (24) подставляются в Matlab для расчетов.

Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 5.

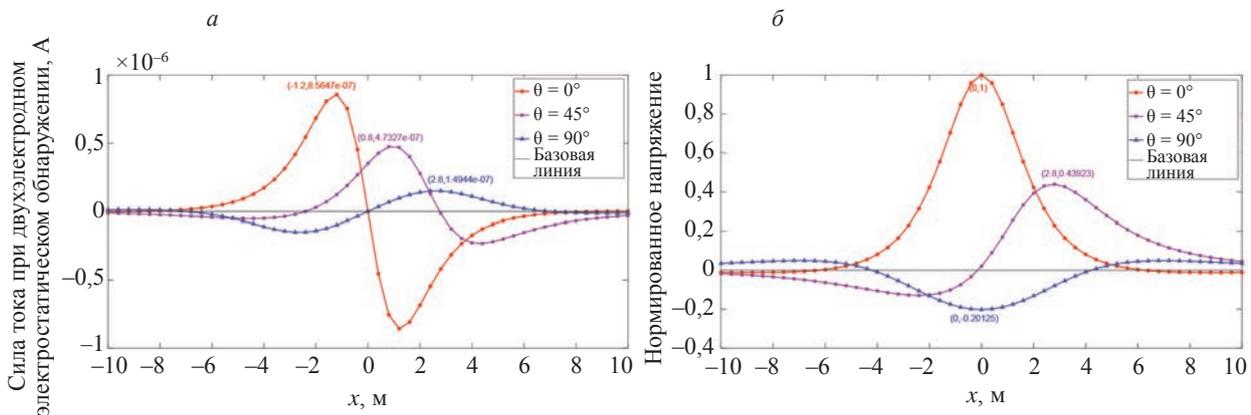


Рис. 5. Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении: форма сигнала тока (а); форма сигнала нормированного напряжения (б).

Сравнивая формы сигналов тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении и нормированного напряжения при  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , был сделан вывод, что при увеличении угла  $\theta$  (диапазон изменения  $\theta$  составляет  $0^\circ \sim 90^\circ$ ) максимальные значения тока  $i$  и разности потенциалов  $u$  уменьшаются. Когда  $\theta = 0^\circ$ ,  $i$  и  $u$  принимают наибольшие значения при  $x = \pm 1,2$  м и  $x = 0$  м соответственно, а по результатам моделирования  $i_{\max} = \pm 8,5647 \times 10^{-7}$  А.

**в) Анализ результатов математического моделирования**

При сравнительном анализе было обнаружено, что с увеличением угла  $\theta$  динамика максимумов тока при одноэлектродном и двухэлектродном электростатическом обнаружении противоположна. При одинаковых условиях эффективность использования тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении значительно выше, чем при одноэлектродном. Таким образом, обнаружение заряженных объектов с помощью двойного электрода дает лучшие результаты, при этом оптимальный угол составляет  $\theta = 0^\circ$ .

В следующем расчете (для достижения наилучших результатов)  $\theta = \theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$  подставляются в формулы (19) и (24), а математическая модель может быть упрощено до вида:

$$i = \frac{Qvs}{4\pi} \left\{ \frac{3x \left( y + \frac{d}{2} \right)}{\left[ x^2 + \left( y + \frac{d}{2} \right)^2 \right]^{5/2}} - \frac{3x \left( y - \frac{d}{2} \right)}{\left[ x^2 + \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right]^{5/2}} \right\}; \tag{25}$$

$$u = \frac{Qd}{8\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{y - d/2}{\left[ x^2 + (y - d/2)^2 \right]^{3/2}} - \frac{y + d/2}{\left[ x^2 + (y + d/2)^2 \right]^{3/2}} \right\}. \tag{26}$$

**4.2. Математическое моделирование двухэлектродного электростатического обнаружения**

Две чувствительных электродных пластины в системе двухэлектродного электростатического обнаружения и обнаруживаемый заряженный объект образуют полную систему электростатической индукции. Формулы (25) и (26) показывают, что амплитуда тока обнаружения  $i$  и разность потенциалов  $u$  прямо пропорциональны величине заряда  $Q$  объекта, относительной скорости движения  $v$  и площади электродов  $S$ . При математическом моделировании двухэлектродного электростатического обнаружения главной целью было исследовать влияние расстояние до объекта  $y$  и интервала  $d$  между двумя электродами на ток обнаружения  $i$  и разность потенциалов  $u$ .

**а) Влияние расстояние до объекта  $y$  на эффективность контроля**

Расстояние до объекта прямо влияет на ток обнаружения, разность потенциалов, расстояние обнаружения и форму сигналов. Для анализа расстояния до объекта  $y$  предполагается, что расстояние до объекта бесконечное, т.е. расстояние между электродами и заряженным объектом бесконечно, а в электродах не наводится сигнал. При постепенном уменьшении расстояние до объекта  $y$ , в электроде постепенно наводится сигнал. Устанавливая  $d = 1$  м и оставшиеся предположения неизменными, предполагается, что  $y$  принимает три значения: 5, 4 и 3 м, которые в сочетании с формулами (25) и (26) подставляются в Matlab для расчетов.

Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 6.

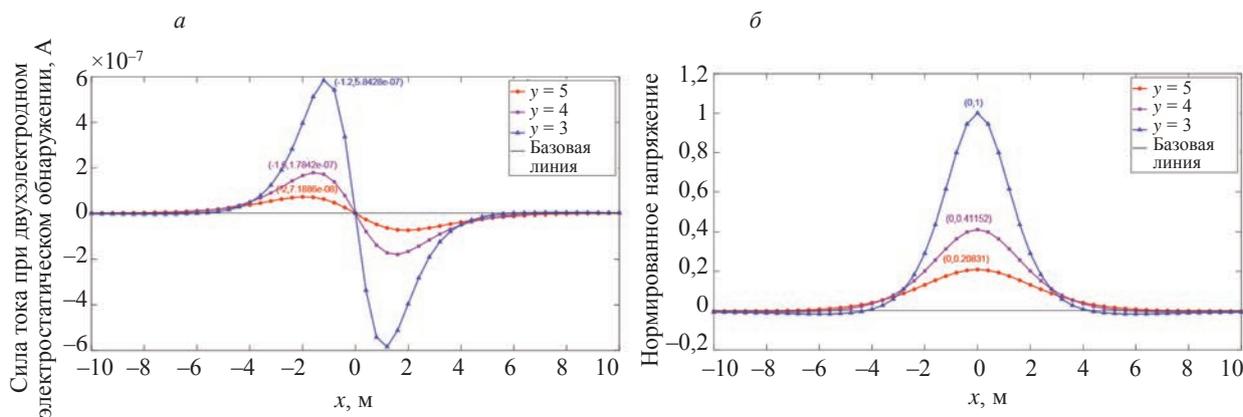


Рис. 6. Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении: форма сигнала тока (а); форма сигнала нормированного напряжения (б).

Исходя из рис. 6, можно сделать вывод, что максимальное значение тока и разности потенциалов увеличивается с уменьшением расстояния до объекта, поэтому увеличение расстояния до объекта приводит к уменьшению расстояния до объекта.

Чтобы лучше проиллюстрировать влияние расстояния до объекта на выходной сигнал, на рис. 7 показано изменение тока обнаружения и разности потенциалов индукционного электрода при изменении расстояния между заряженным объектом и электродом в пределах  $-10 \sim 10$  м и расстояние до объекта —  $3 \sim 5$  м.

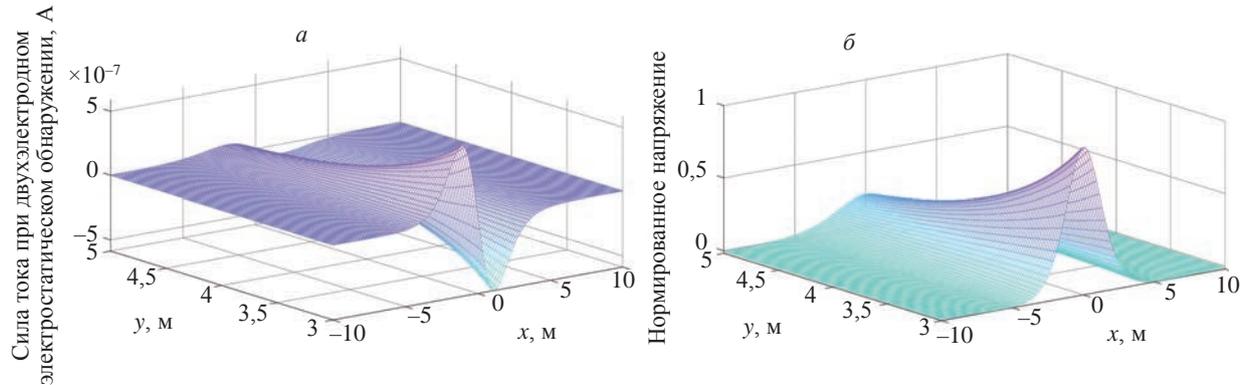


Рис. 7. Кривая влияния расстояние до объекта  $y$  на контроль с двумя электродами: кривая влияния тока (а); кривая влияния нормированного напряжения (б).

#### б) Влияние интервала $d$ между двумя электродами на эффективность обнаружения

Интервал между двумя электродами влияет на амплитуду тока обнаружения, разности потенциалов, расстояние обнаружения и форму сигнала. При анализе интервала  $d$  между двумя электродами было задано  $y = 5$  м, а оставшиеся предположения остались неизменными. Было предложено, что  $d$  имеет три значения: 1, 2 и 3 м, которые подставляются в Matlab для расчета вместе с формулами (25) и (26).

Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 8.

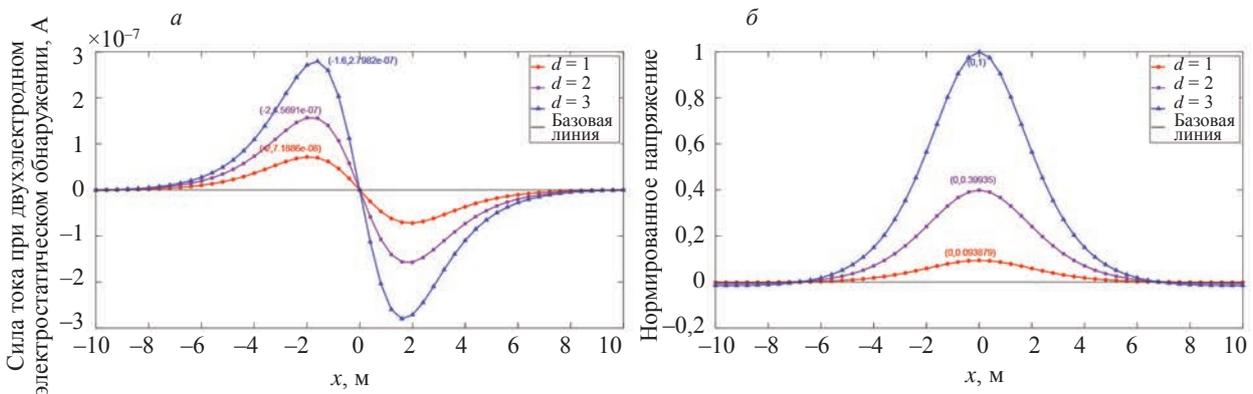


Рис. 8. Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении: форма сигнала тока (а); форма сигнала нормированного напряжения (б).

Из рис. 8 видно, что пиковое значение тока и разности потенциалов увеличивается с увеличением интервала между двумя электродами, поэтому увеличение интервала между двумя электродами приводит к увеличению расстояния обнаружения.

На рис. 9 показано влияние интервала между двумя электродами на ток обнаружения и разность потенциалов индукционного электрода соответственно, когда горизонтальное расстояние между заряженной мишенью и детектирующим электродом составляет от  $-10 \sim 10$  м и интервал между двумя электродами —  $1 \sim 3$  м.

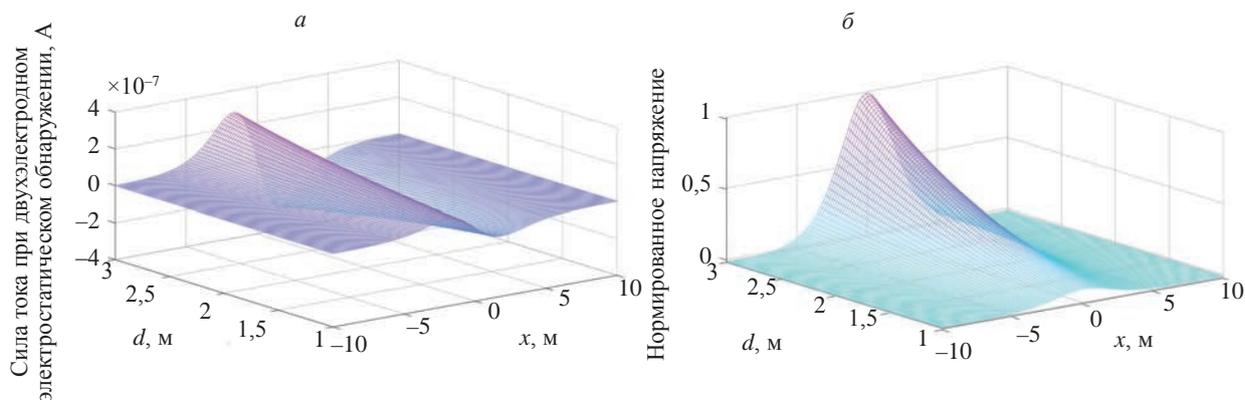


Рис. 9. Кривая влияния интервала  $d$  при двухэлектродном электростатическом обнаружении: кривая влияния тока (а); кривая влияния нормированного напряжения (б).

**в) Влияние  $Q, v, S$  на эффективность обнаружения**

Если предположить, что исходный график показан на рис. 5, то при увеличении  $S$  в 10 раз ( $S = 0,2 \text{ м}^2$ ), результирующая форма сигнала при двухэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 10.

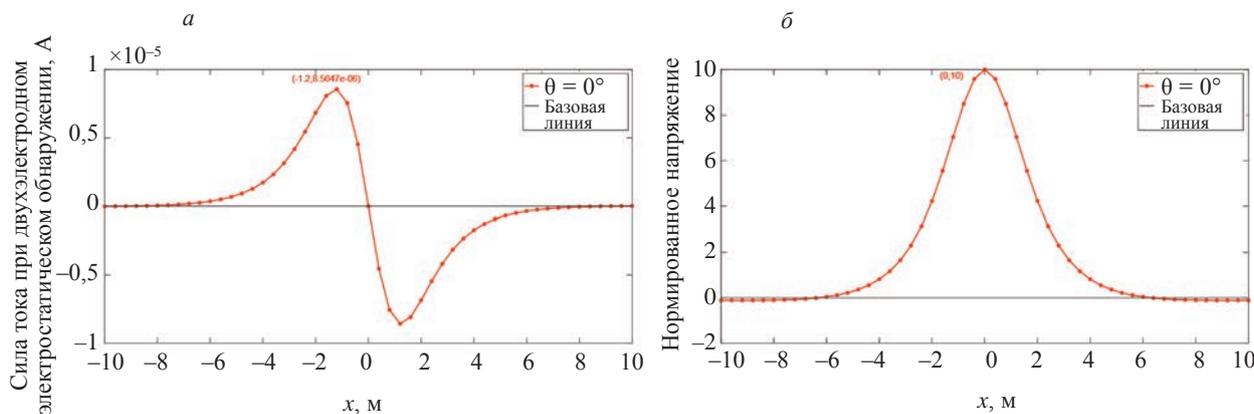


Рис. 10. Форма сигнала при двухэлектродном электростатическом обнаружении, когда  $S = 0,2 \text{ м}^2$ : форма сигнала тока (а); форма сигнала нормированного напряжения (б).

Сравнивая рис. 5 и 10, можно заметить значительное изменение в максимальных значениях величин. Объединяя формулы (25) и (26), несложно увидеть, что когда что-либо из  $Q, v, S$  увеличивается в  $n$  раз, амплитуда тока обнаружения и разности потенциалов также увеличивается в  $n$  раз. Следовательно, можно сделать вывод, что изменение  $Q, v$  и  $S$  пропорционально изменению тока обнаружения и разности потенциалов.

**г) Результаты математического моделирования**

На основе анализа моделирования можно сделать вывод, что расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения уменьшается с увеличением расстояния до объекта, в то время как оно увеличивается с увеличением интервала между двумя электродами.

Сравнивая влияние расстояния до объекта и интервала между двумя электродами на эффективность обнаружения двух электродов на рис. 7 и рис. 9, можно сделать вывод, что расстояние до объекта оказывает большее влияние на эффективность обнаружения, чем интервал между двумя электродами.

При сравнении рис. 5 и 10 и объединении формул (25) и (26) для анализа влияния  $Q, v, S$  и  $d$  на эффективность двухэлектродного электростатического обнаружения видно, что  $Q, v, S$  пропорциональны амплитуде тока обнаружения, а возрастание всех трех величин приводит к увеличению тока обнаружения,  $Q$  и  $d$  пропорциональны амплитуде разности потенциалов и их увеличение приводит к увеличению разности потенциалов.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее проверяется точность разработанной системы и математических моделей. В работах [11] и [12] тестировались одноэлектродный и двухэлектродный модули электростатического обнаружения соответственно. Исследовательская система включает в себя модуль электростатического обнаружения, блок имитатора заряженного объекта и систему сбора данных [11]. Сравнивая теоретическую форму сигнала при моделировании и экспериментальную форму сигнала в данном исследовании, можно проверить точность созданной математической модели (рис. 11).

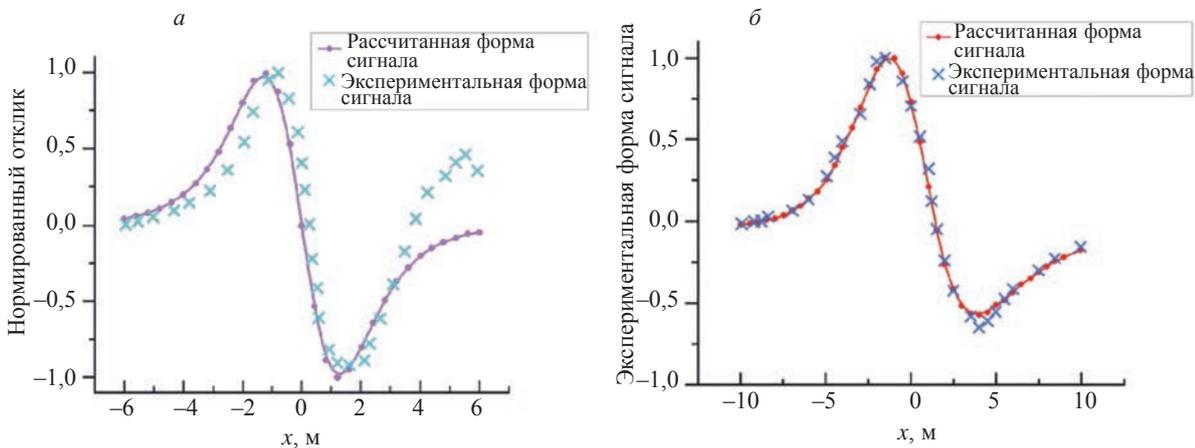


Рис. 11. Сравнение формы выходного сигнала модуля электростатического обнаружения: сравнение формы волны выходного сигнала при использовании одного электрода (а); сравнение формы волны выходного сигнала при использовании двух электродов (б).

После того, как нормируется выходной сигнал, из рис. 11 можно увидеть, что форма контролируемого выходного сигнала модулей электростатического обнаружения при использовании одного и двух электродов находится в хорошем согласии с теоретической рассчитываемой формой сигнала. Модель системы электростатической индукции и математическая модель, предложенные в данной статье, являются достаточно приемлемыми и могут быть использованы для дальнейших исследований.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается комплексная система электростатической индукции, разрабатывается модель системы и математическая модель тока и разности потенциалов при двухэлектродном электростатическом обнаружении. Влияние различных факторов в системах электростатической индукции на эффективность обнаружения получено с помощью компьютерного моделирования.

1. Создав математические модели для одноэлектродного и двухэлектродного электростатического обнаружения и проведя компьютерный модельный анализ, было установлено, что эффективность двухэлектродного электростатического обнаружения значительно выше, чем эффективность одноэлектродного электростатического обнаружения. Дальнейший анализ привел к упрощению и определению оптимальной модели системы двухэлектродного электростатического обнаружения и математической модели

2. Анализируя упрощенную математическую модель, становится ясно, что расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения тесно связано с факторами, присущими системе электростатической индукции. Дальнейший анализ результатов моделирования показал, что по мере увеличения интервала между двумя электродами и площади электродной пластины (т.е. заряда объекта и относительной скорости движения) расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения, очевидно, увеличивается. И наоборот, при увеличении расстояния до объекта расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения заметно уменьшается.

3. Путем анализа результатов моделирования было установлено, что расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения связано с расстоянием до объекта, интервалом

между двумя электродами и площадью электродной пластины (зарядом объекта и относительной скоростью движения). В результате сравнительного анализа ряда условий было установлено, что расстояние до объекта оказывает большее влияние на эффективность электростатического обнаружения двухэлектродной системы, чем интервал между двумя электродами на эффективность обнаружения, а эти два фактора оказывают гораздо большее влияние, чем площадь электродной пластины (заряд объекта и относительная скорость движения). Поэтому на практике следует уделять особое внимание разработке и оптимизации расстояния до объекта и интервала между двумя электродами.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы хотели бы поблагодарить Научный Фонд для Постдоков Китая (№ гранта 2021M701713), Цзянсускую Программу Финансирования Выдающихся Талантов Постдокторантуры (№ гранта 2022ZB245), Национальный Фонд Естественных Наук Китая (№ гранта 52201399) и 2021 Открытый проект Фонда науки и технологий по проекту лаборатории электромеханического динамического управления (№ гранта 212-C-J-F-QT-2022-0020) за обеспечение финансирования для проведения экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorlov M.I., Strogonov A.V., Vinokurov A.A. Benchmarking the Reliability of the Consignments of Semiconductor Articles Using Electrostatic Discharges // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 455—461.
2. Song C.L., Teongsan Y. Effective Electrostatic Discharge detection in equipment via EMI // Proceedings of the IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. 2008. V. 1. P. 1—4.
3. Dong Wang, Bo Xiong. Simulation Analysis of Electrostatic Field Detection of Moving Target // Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University. 2017. V. 32. No. 4. P. 411—415.
4. Fisher J., Hoole P.R., Pirapaharan K. et al. Pre-Lightning Strikes and Aircraft Electrostatics // Matec Web of Conferences. 2017. V. 87.
5. Kobayashi T., Oyama S., Makimoto N. et al. An electrostatic field sensor operated by self-excited vibration of MEMS-based self-sensitive piezoelectric microcantilevers // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. V. 198. P. 87—90.
6. Noras M.A., Ramsey S.P., Rhoades B.B. Projectile detection using quasi-electrostatic field sensor array // Journal of Electrostatics. 2013. V. 71 (3). P. 220—223.
7. Trinks H. Electric field detection and ranging of aircraft // IEEE on Aerospace and Electric System. 1982. V. 3. P. 268—273.
8. Kimoto A., Ichinose Y., Shida K. A new sensing method using contact voltage for material discrimination // Sensors and Actuators A: Physical. 2009. V. 149. No. 1. P. 1—6.
9. Kurita K., Morinaga S. Noncontact Detection of Movements of Standing Up From and Sitting Down on a Chair Using Electrostatic Induction // IEEE Sensors Journal. 2019. V. 19 (19). P. 8934—8939.
10. Yinlin Li, Zhanzhong Cui, Yuxian Bai, Jusheng Shi. Charge-Inducing Electrostatic Fuze Detecting Technology // Journal of Beijing Institute of Technology. 1999. (S1). P. 3—5.
11. Weixin Li, Haidong Wu, Yuelong Liu, Haitao Wang. Research on Energy Loss of Fuze Setting System Based on Magnetic Resonant Coupling in Complex Environment // Journal of Test and Measurement Technology. 2016. V. 30 (04). P. 341—346.
12. Liqing Fang, Kai Chen, Hongkai Wang, Lei Zhang. Application of Passive Non-Contact Electrostatic Detection in Composite Fuze // Ordnance Industry Automation. 2012. V. 31 (12). P. 85—87.
13. Bo Xiong, Yunlong Dong, Dong Wang Weixin, Li. Analysis of Main Influence Factors on Electrostatic Fuse Detection // Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University. 2019. V. 34 (06). P. 465—469.
14. Yanxu Li, Lixin Xu. Study of a Novel Electrostatic Detection Sensor // Applied Mechanics & Materials. 2012. V. 110—116. P. 5476—5482.
15. Shiryayeva S.O., Grigor'ev A.I. On the stability of a bending mode of a charged jet of viscous dielectric liquid with the ultimate electroconductivity in a collinear electric field // Surface Engineering & Applied Electrochemistry. 2011.
16. Dong Wang, Bo Xiong, Weixin Li. Simulation Analysis of Influencing Factors of Electrostatic Detection // Journal of Ordnance Equipment Engineering. 2017. No. 12. P. 272—277.

## ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ: РАЗВИТИЕ ТРАДИЦИОННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ И НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ (ОБЗОР)

© 2023 г. В.П. Вавилов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 623050 Томск,  
пр-т Ленина, 30  
E-mail: \*vavilov@tpu.ru*

Поступила в редакцию 28.04.2023; после доработки 05.05.2023

Принята к публикации 05.05.2023

В последние годы тепловой контроль является быстро развивающейся областью неразрушающих испытаний, что обусловлено разработкой композиционных материалов, испытания которых традиционными методами затруднительны. Несомненный прогресс произошел в разработке и коммерциализации тепловизоров, которые составляют основу тепловых дефектоскопов. Отталкиваясь от более ранних обзоров, автор попытался суммировать достижения последних лет как в методологии испытаний и обработки температурной информации, так и в области разработки современных тепловых дефектоскопов и сфер их применения. Обзор включает отечественные достижения в области теплового контроля и многочисленные зарубежные исследования, благодаря которым тепловой контроль рассматривается как один из основных методов неразрушающих испытаний отдельных классов материалов и конструкций.

Ключевые слова: тепловой контроль, инфракрасный тепловизор, теория теплопроводности, дефект, тепловой дефектоскоп, анализ инфракрасных изображений, композиционные материалы, обработка данных.

DOI: 10.31857/S0130308223060040, EDN: ААНВМ1

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Написанию настоящего обзора способствовал неоспоримый факт взрывного интереса к активному тепловому контролю (ТК), наблюдаемого с начала нынешнего столетия. Быстрое развитие данного вида неразрушающих испытаний требует периодического осмысления сложившегося состояния и тенденций развития методов исследования структуры твердых тел с использованием инфракрасной (тепловизионной) техники.

Для нового поколения исследователей представляет интерес вспомнить основные вехи развития ТК. Как известно, спрос на разработку методов и аппаратуры неразрушающего контроля (НК) материалов и изделий появился с утверждением массового промышленного производства, потребовавшего внедрения системы проверки качества продукции. В основе каждого вида (метода) НК лежат определенные физические принципы, включающие использование полей и частиц различной природы. Тепловой контроль использует феномены, сопровождающие распространение в твердых телах нестационарных тепловых потоков, возбуждаемых различными способами/средствами. При этом, согласно ГОСТ 27.002—2015 «Надежность в технике. Термины и определения», дефектом называется каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией. При тепловой стимуляции различной природы условно «бездефектное» тело характеризуется регулярной текстурой теплового потока, выражающейся в эталонной структуре возникающего в объекте контроля нестационарного температурного поля. Структурные дефекты вызывают локальные возмущения этого поля, регистрируемые температурными датчиками, из которых практически интересны тепловизоры. Таким образом, история ТК связана с развитием теории теплопроводности и оптики инфракрасного (ИК) диапазона.

Как известно, техническую диагностику и НК можно рассматривать как аналог медицинской диагностики применительно к объектам неживой природы. Это утверждение более чем справедливо в отношении ТК. Показатели здоровья живого организма связаны с метаболическими процессами, которые протекают в весьма узком температурном интервале, выход за пределы которого отражает появление определенных дисфункций, то есть «поломок» организма. Фактически, температуру как показатель здоровья человека применяли в медицине с древних времен с использованием контактных средств. Принято считать, что тепловое (ИК) излучение было открыто W. Herschel в 1800 г. В области математической теории теплопередачи фундаментальные работы были опубликованы J. Fourier [1] и М.А.Ж. Ångström [2]. Ранние идеи по анализу изменения температуры в частотной и/или временной областях с использованием преобразований Фурье и Лапласа впоследствии были широко использованы в ТК для целей шумоподавления и дефектотрии. Описание истории развития тепловидения как метода и аппаратных средств визуализации и измерения

температуры выходит за рамки настоящего обзора (см. монографии [3—5]), поэтому ограничимся замечанием, что современное тепловидение берет начало в военных разработках 1950-х годов на Западе и в бывшем СССР, причем сам термин «теповидение» восходит к торговой марке «Thermovision» шведской фирмы AGA, приборы которой стали пределом мечтаний отечественных пользователей в 1970—1980-е годы. В последние годы опубликован ряд учебных книг и монографий, отражающих современное состояние различных аспектов ИК термографии и ТК [6—23].

Возвращаясь к собственно НК, можно констатировать, что исторически в конце XX-го века сложились три фундаментальные системы НК, а именно: американская, немецкая и советская (российская). В бывшем СССР была создана отечественная школа активного ТК работами П.К. Ощепкова, Н.А. Бекешко, А.Б. Упадышева, Ю.А. Попова, А.Е. Карпельсона, В.П. Вавилова, Д.А. Рапопорта, Е.В. Абрамовой, А.И. Потапова, Ю.В. Гавинского и других. В конце прошлого века сформировались группы ТК в НИИ интроскопии (г. Москва), Томском политехническом университете (г. Томск), ЦНИИ специального машиностроения (г. Хотьково), в то время как множество смежных исследований проводили исследователи в аэрокосмической, машиностроительной, электронной, строительной отраслях. Анализ этих работ привел бы к существенному расширению настоящего обзора.

На рубеже двух веков произошли фундаментальные изменения в материальной базе ТК. Если во времена бывшего СССР автор этих строк знал чуть ли не все экземпляры зарубежных тепловизоров в стране (!), а номенклатура массовых отечественных тепловизоров ограничивалась приборами «Радуга», ТВ-03, затем — «ИРТИС», то произошедшая революция в области аппаратурной базы тепловидения привела к улучшению технических параметров, взрывоподобному росту номенклатуры и снижению стоимости тепловизоров. Не рассматривая причины сохраняющегося отставания отечественных разработок в области тепловидения от лучшего мирового уровня, что связано с технологическим отставанием в области матричных (особенно неохлаждаемых) ИК-детекторов, тем не менее можно констатировать, что тепловизоры перестали быть предметом роскоши, а стали средством измерения температуры. Более того, с началом специальной военной операции в Украине, термин «теповизор» стал применяться широкой публикой, хотя одновременно, вследствие санкций, возникли проблемы с поставкой в Россию тепловизоров элитного уровня. Можно предположить, что в сложившейся политической и технологической ситуации работы по развитию отечественной базы ИК-техники будут интенсифицированы, как показала последняя Международная научно-техническая конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, г. Москва, 25—27 мая 2022 г.

Второе фундаментальное изменение в отношении к ТК связано с повсеместным внедрением композиционных материалов в передовые технические отрасли, прежде всего авиацию, ракетно-космическую и военную технику, транспорт и т.д. По «счастливному» совпадению ТК оказался весьма пригодным для НК дефектов в таких материалах, что, в сочетании с высокой производительностью ТК, позволило включить этот метод в список наиболее востребованных видов НК наряду с визуально-измерительным, ультразвуковым, радиационным, проникающих веществ. По ряду направлений, прежде всего в авиационной и ракетно-космической промышленности, ТК рассматривают в качестве важнейшего (например, данный метод был основным при расследовании причин катастрофы космического челнока Columbia в 2003 г. [21]).

Вышеописанные факторы привели к созданию рынка устройств для активного ТК (тепловых дефектоскопов), показанных на рис. 1. Термин «теповой дефектоскоп» (ТД) появился во времена бывшего СССР и обозначал законченные устройства для обнаружения скрытых дефектов с использованием принципов активного теплового контроля (ТК). Примерами таких устройств были околоповерхностные термоэлектрические дефектоскопы Ю.В. Гавинского и др., применявшиеся для контроля ракетной теплозащиты [16], линейно-сканирующие ИК устройства, созданные Д.А. Рапопортом, С.С. Денисовым, В.А. Стороженко и др. [16], система контроля горячего металлопроката, разработанная О.Н. Будадиным, Е.В. Абрамовой и др. [18], фоторегистрирующий ИК-дефектоскоп паяных изделий ФИД-1 Томского политехнического университета [16] и др. Будучи передовыми для своего времени, указанные устройства использовали аналоговую обработку температурной информации и применялись, в основном, для целей дефектоскопии, а разработанные в то время алгоритмы дефектометрии требовали громоздких вычислений на больших ЭВМ [16].

Новое поколение ТД появилось в последнее десятилетие, будучи связанным с разработкой экономичных тепловизионных модулей высокого качества (на базе неохлаждаемых микроболометрических матриц), а также ростом эффективности компьютерной техники. На мировом рынке появились ТД стандартного состава, включающие малогабаритный тепловизор, оптический источник нагрева и

а



б



в



г



д



е



ж



з





Рис. 1. Тепловые дефектоскопы:

*a* — VoyageIR (Thermal Wave Imaging, США, [www.thermalwave.com/products](http://www.thermalwave.com/products)); *б* — ThermoSpector (DCG Systems, Германия, [www.xpertgate.de/produktfamilie/Infrarot\\_Pruefzelle](http://www.xpertgate.de/produktfamilie/Infrarot_Pruefzelle)); *в* — C-CheckIR (Automation Technology, Германия, <https://www.automationtechnology.de/cms/en/mobile-ndt-systems-for-maintenance>); *г* — OTvis (EDEVIS, Германия, [www.edevis.com/content/en/optical\\_lockin\\_thermography](http://www.edevis.com/content/en/optical_lockin_thermography)); *д* — WELD-CHECK (InfraTec, Германия, [www.infrotec.eu/thermography/non-destructive-testing](http://www.infrotec.eu/thermography/non-destructive-testing)); *е* — лабораторная установка (MoviTHERM, U.S.A., [www.movitherm.com](http://www.movitherm.com)); *ж* — NDTherm (Opgal, Израиль, [www.opgal.com/thermography-ndt-testing](http://www.opgal.com/thermography-ndt-testing)); *з* — роботизированная установка ИК-термографического контроля фюзеляжей самолетов (NASA, США, <https://www.nextech.sk/a/NASA>); *и* — тепловой дефектоскоп с ультразвуковой стимуляцией для испытаний лопаток турбин (ТПУ, Россия, [web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk](http://web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk)); *к* — самоходный тепловой дефектоскоп для контроля крупногабаритных плоских объектов (ТПУ, Россия, [web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk](http://web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk)); *л* — роботизированный тепловой дефектоскоп для контроля крупногабаритных цилиндрических объектов (ТПУ, Россия, [web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk](http://web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk)); *м* — портативный тепловой дефектоскоп (ТПУ, Россия, [web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk](http://web.tpu.ru/webcenter/portal/npltk)); *н* — установка DEFECTOVISION для индукционного ИК термографического контроля изделий сложной формы (Förster, Германия, [www.foerstergroup.ru/rus/produkcija/defectovision-ct/termografija/](http://www.foerstergroup.ru/rus/produkcija/defectovision-ct/termografija/)); *о* — компактный модуль для онлайн контроля композитов (Automation Technology, Германия, <https://www.automationtechnology.de/cms/en/compact-ndt-systeme-fuer-produktionsanlagen>).

компьютер. Первыми коммерческими приборами теплового контроля (ТК), получившими широкую известность, явилась аппаратура фирмы Thermal Wave Imaging (США), в которой, помимо современного «железа» (hardware), был использован запатентованный принцип так называемой термографической обработки сигналов (TSR-Thermographic Signal Reconstruction) [24]. Фактически, данный метод включает полиномиальную аппроксимацию экспериментальных температурных откликов объектов, подверженных импульсному нагреву, с последующим анализом первой и второй производных от температуры по времени. В последние годы на мировом рынке активны фирмы из Германии Automation Technology, InfraTec, DCG Systems (бывшая Thermosensorik) и израильская фирма Orgal. В России интенсивные исследования в этом направлении проводятся в Томском политехническом университете (ТПУ), в частности, для конкретного промышленного заказчика создан роботизированный комплекс активного теплового контроля теплозащиты крупногабаритных цилиндрических изделий, в котором достигнута весьма высокая производительность непрерывного контроля (до 25 м<sup>2</sup> в час при полном объеме температурной информации около 80 Гб на изделие) [25].

## 2. СОСТОЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ АКТИВНОГО ТК

Обзоры зарубежных и отечественных исследований в области активного ИК термографического контроля содержатся в ряде монографий и обзорных статей [12, 15, 16, 18, 19]. Группы исследователей и организации, которые активны в последнее десятилетие, приведены в табл. 1. В области аппаратурной базы ТК радикальные изменения связаны с появлением широкой номенклатуры коммерческих тепловизоров и тепловизионных модулей, на основе которых разработаны мелкосерийные и единичные ТД (см. рис. 1). Практическая востребованность ТК будет возрастать по мере растущей автоматизации и роботизации экспериментальных установок, что обеспечивает повторяемость результатов, высокую производительность метода, возможность непрерывного контроля крупногабаритных изделий сложной формы и т.д. В методическом плане продолжают эксплуатироваться как хорошо известные подходы, так и новые способы и средства тепловой стимуляции объектов контроля, а также внедряются принципы комбинирования и синтеза нескольких методов НК. Тепловой контроль остается удачной областью для внедрения новых математических алгоритмов обработки температурной информации, направленных на повышение отношения сигнал/шум и разработку методик тепловой дефектометрии и томографии.

Таблица 1

Современные группы исследователей в области активного ТК\*

Исследователи (организация, страна)	Направления исследований	Источник**
X. Maldague (University Laval, Канада)	Общие вопросы и популяризация ТК, новые методы обработки данных	[10, 12]
Xioyan Han (Wayne State University, США)	Акустическая ИК-термография	[26, 27]
S.D. Holland, Iowa State University, США	Общие вопросы и популяризация ТК	[28, 29]
J.N. Zalameda, W. Winfree, E. Cramer (NASA Langley Research Center, США)	Аэрокосмические применения ТК, развитые методы обработки данных	[30, 31]
S. Shepard (Thermal Wave Imaging, Inc., США)	Аппаратура и метод термографической реконструкции сигнала	[24]
J. G. Sun (Argonna National Laboratory, США)	Тепловая томография, основанная на измерении тепловой инерции	[32]
J.-M. Roche, D.L. Balageas (ONERA, Франция)	Теплофизические основы ТК, тепловая дефектометрия	[33]
N. Rajic (Defence Science and Technology Group, Australia)	Метод анализа главных компонент в ТК	[34]
S.D. Pickering (University of Bath, Великобритания)	Общие вопросы ТК, термоакустика	[35]
C. Maierhofer (BAM, Германия)	Общие вопросы ТК	[36]
B. Oswald-Tranta (University of Leoben, Австрия)	Индукционная ИК-термография	[37]
G. Mayr (University of Applied Sciences, Австрия)	Теплофизические свойства композитов	[38]
U. Netzelmann	Индукционная ИК-термография	[39]

Продолжение табл. 1

J.-P. Batsale, C. Pradere	Теплофизические аспекты ТК; комбинирование с терагерцовым контролем	[40]
N.P. Avdelidis (University of Cranfield, Великобритания)	Общие вопросы ТК, композиционные материалы	[41]
A. Nowakowski, M. Kaczmarek (Gdansk University of Technology, Польша)	Биомедицинские аспекты тепловидения, включая активную ИК-термографию	[42]
W. Minkina (Czestochowa University of Technology, Польша)	Общие вопросы и метрология ТК	[43]
W. Świdorski (Military Institute of Armament Technology, Польша)	Композиционные материалы военного и авиакосмического назначения	[44]
B. Więcek (University of Lodz, Польша)	Общие вопросы ТК	[45]
G. Steenackers (University of Antwerpen, Бельгия)	ИК термографический контроль объектов искусства	[46]
M. Omar (Khalifa University, OAE)	Общие вопросы ТК, нейронные сети	[47]
R. Usamentiaga (University of Oviedo, Испания)	Развитая обработка данных в ТК	[48]
P. Bison (ITC-CNR, Италия)	Общие вопросы ТК, определение ТФХ, ТК объектов искусства	[49]
C. Meola, G.-M. Carlomagno (Università di Napoli Federico II, Италия)	Термоволновой ТК (синхронная ИК-термография)	[50]
U. Galietti (University of Bari, Италия)	Развитая обработка данных в ТК	[51]
M. Švantner (University of West Bohemia, Чехия)	ТК композитов и тепловая дефектометрия	[52]
R. Mulaveesala (Institute of Technology Delhi, Индия)	Тепловые волны, в особенности, частотно-модулированные, и их применение в различных отраслях	[53]
H.-S. Park, M.-Y. Choe (Korea Institute of Machinery and Materials, Korea)	Термоакустика, нормативно-методическое обеспечение ТК	[54]
T. Sakagami (Osaka University, Япония)	ИК-термография для анализа термоупругих напряжений (метод TSA)	[55]
Guo Xingwang (Beihang University, Китай)	Общие вопросы ТК, авиакосмические применения	[56]
Hai Zhang (Harbin Institute of Technology, Китай)	Теория ТК, тепловая дефектометрия и томография	[57]
J.R. Tarpani, (University of Sao Paulo, Бразилия)	ИК-термография и механические испытания	[58]
F.W. Panella (University of Salento, Италия)	ТК композитов	[59]
В.П. Вавилов, А.О. Чулков, Д.А. Дерусова (Томский политехнический университет, Россия)	Общие вопросы ТК, моделирование и обработка данных, роботизированная аппаратура ТК, лазерная виброметрия	[16, 25]
О.Н. Будадин, С.О. Козельская (ЦНИИ специального машиностроения, Россия)	Тепловая дефектометрия, композиционные материалы, комбинирование методов НК, контроль крупногабаритных изделий	[60]
Е.В. Абрамова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия)	Нормативно-методические аспекты и обучение в области ТК	[61]
Потапов А.И. (Северо-Западный государственный заочный технический университет, Россия)	НК композиционных материалов, комбинированные методы НК	[18]
В.Н. Чернышев (Тамбовский технический государственный университет, Россия)	Теплофизические аспекты ТК	[62]
В.А. Захаренко (Омский государственный технический университет, Россия)	Пирометрия и метрология	[63]
И.О. Котовщиков («Локус», Россия)	Активный ТК авиационных композитов	[64]

Примечание. \*Данные приведены в произвольном порядке и отражают субъективное мнение автора. Приведена ссылка на фактического руководителя работ (principal investigator) или лидера по числу публикаций. Ряд групп прекратили активную деятельность на момент данной публикации, данные приведены для полноты картины. Не включены исследователи, специализирующиеся на пассивном ИК-термографическом контроле.

\*По возможности приведены публикации последних лет.

### 3. ТЕОРИЯ ТК

Любую процедуру ИК-термографического контроля можно рассматривать как совокупность методов и средств анализа оптических и тепловых (температурных) феноменов, поэтому, как отмечено выше, теоретическую основу ТК составляет теория теплопередачи, в особенности, теория теплопроводности твердых тел, а также элементы оптоэлектроники, включая теорию теплового излучения.

Принципы моделирования прямых теплофизических задач ТК хорошо разработаны на основе как специализированных (ThermoCalc-3D, Томский политехнический университет), так и универсальных компьютерных программ (ANSYS, Comsol Multiphysics). Соответствующие решения позволяют получать зависимости между размерами и глубиной скрытых дефектов, теплофизическими характеристиками (ТФХ) материалов и параметрами тепловой стимуляции. Фактически рассчитывают величину температурного сигнала над дефектом  $\Delta T$ , сравнивая которую с температурным разрешением тепловизора  $\Delta T_{res}$ , оценивают предельные возможности ТК. На практике такие расчеты следует выполнять с введением шумов, сопровождающих экспериментальные процедуры ТК, что позволяет определить реальные возможности метода. Реалистичные решения, как правило, являются численными, поскольку они должны учитывать диффузию тепла по всем координатам. Одномерные решения теплопроводности многослойных структур весьма громоздки и также требуют использовать численные методы решения сопутствующих трансцендентных уравнений. Для приближенного представления о закономерностях нагрева твердых тел с дефектами используют классические решения теории теплопроводности, которые в настоящем обзоре не рассматриваются (см. их детальный анализ в [16, 18—20]).

В академическом плане более интересны решения обратных задач ТК, которые позволяют путем анализа так называемого куба данных (data cube), т.е. экспериментальной последовательности ИК термограмм  $T(x, y, \tau)$ , оценить параметры скрытых дефектов  $\{h, l, d\}$  (здесь  $h$  — поперечные размеры дефекта;  $l$  — глубина залегания дефекта;  $d$  — толщина дефекта). Математически куб данных представлен функцией  $T(i, j, k)$ , где  $(i, j)$  являются координатами, а  $k$  — номер термограммы, связанный с реальным временем. Результаты ранее выполненных исследований сводятся к следующему. Форму и поперечные размеры дефектов  $h$  достаточно надежно оценивают визуальным способом непосредственно по термограммам, даже несмотря на диффузию тепла, на которую часто ссылаются для оправдания феномена «расплывания» температурных отпечатков в зонах дефектов. Глубина дефектов является решающим фактором обнаружения в одностороннем ТК, тогда как в двухсторонней процедуре величина  $l$  является сравнительно слабым фактором эффективности ТК. Что касается толщины дефектов, то в диапазоне воздушных дефектов с  $d < 300$  мкм можно принять, что  $\Delta T \sim d$  как в одно-, так и двухсторонней процедурах.

### 4. ПРОЦЕДУРЫ ТК

#### 4.1. Классические процедуры ТК (оптический нагрев)

Условно можно считать, что классическими являются одно- и двухсторонняя процедуры ТК с использованием оптических источников нагрева (рис. 2), из которых наиболее распространены галогенные лампы мощностью 0,5—2 кВт. В некоторых ТД также применяют импульсные ксеноновые лампы с длительностью «вспышки» 5—10 мс и мощностью до 3,2 кДж каждая, однако громоздкость и высокая стоимость таких источников нагрева делают их малоприменимыми для использования в портативных тепловых дефектоскопах (исключение — аппаратуры фирмы Thermal Wave Imaging).

Односторонний ТК представляет практический интерес при испытаниях в условиях цеха, ангара и на открытом воздухе, в то время как в лабораторных условиях можно реализовать и двухстороннюю процедуру. В двухстороннем ТК весьма эффективно построение карт теплопроводности, которые более устойчивы к шумам по сравнению с обычными ИК термограммами. В любом случае результатом контроля является последовательность ИК термограмм, отражающая динамику поверхностного температурного поля объекта контроля (количество термограмм в последовательности может достигать нескольких тысяч, хотя в практических ТД оно обычно не превышает нескольких десятков).

Проблемой оптической стимуляции является слабый нагрев объектов контроля с низким коэффициентом поглощения в видимой области спектра, например, окрашенных в светлые тона панелей самолетов, а также наличие отраженного излучения в тепловом (ИК) диапазоне. Последний

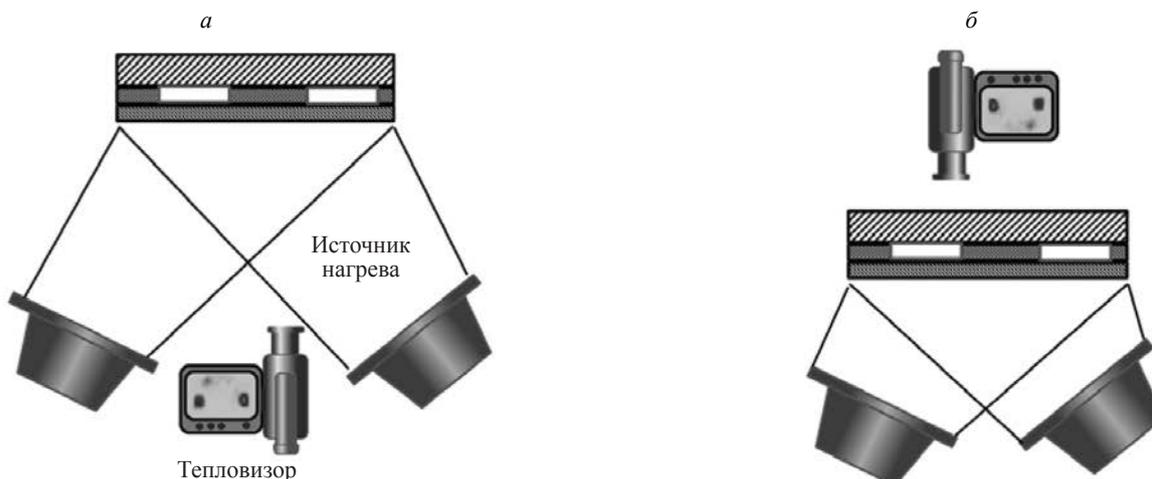


Рис. 2. Классические процедуры одно- (а) и двухстороннего (б) ТК.

вид помехи связан с нагревом колб и корпусов оптических источников нагрева, что приводит к искажению ИК термограмм уже после выключения источников. Основными способами борьбы с этим видом помех являются: 1) электрическое управление формой импульса нагрева; 2) введение механических шторок; 3) отворот нагревателей после выключения излучения нагрева; 4) использование оптических фильтров, в том числе обычного стекла, непрозрачного в диапазоне длин волн более 2,5 мкм, а также линз Френеля; 5) использование лазеров, работающих на длинах волн, находящихся вне диапазона спектральной чувствительности тепловизора.

Лазеры достаточно часто используют в научных исследованиях, требующих кратковременный мощный нагрев. Однако их широкому применению в ТК препятствуют высокая стоимость, низкий к.п.д. и громоздкость. В то же время рассеяние лазерного пучка в широкой зоне значительно снижает среднюю мощность нагрева, поэтому лазеры используют главным образом для точечного или сканирующего нагрева в ряде специальных задач, например, при контроле точечных сварных швов в автомобилестроении [65], паяных соединений печатных плат [66] и т.п.

Устройства ТК, использующие классический оптический нагрев, применяются в следующих областях: 1) заклепочные соединения авиационных алюминиевых панелей (коррозия, качество соединения); 2) композитные панели планеров самолетов, сотовые и монолитные (вода, пористость, расслоения, непрочности, включения); 3) лопасти вертолетных пропеллеров и ветрогенераторов (расслоения, непрочности); 4) лопасти турбин (отслоения); 5) композиционные элементы строительных конструкций; 6) объекты культурного наследия (здания, живопись, скульптура, археологические объекты).

#### 4.2. Линейное сканирование (оптический нагрев)

С одной стороны, процедуры ТК, связанные с непрерывным точечным или линейным (рис. 3) сканированием объекта исследований, могут считаться классическими, в особенности с учетом ранних работ Д.А. Рапопорта, В.А. Стороженко, О.Н. Будагина в 1980-е годы по ТК крупногабаритных цилиндрических изделий из стеклопластика [67]. Для нагрева применяли полосовые источники значительной длины, а температурное поле изделий в виде развертки цилиндра регистрировали с помощью линейно-сканирующих ИК-радиометров. Каждое полное изображение соответствовало определенной временной задержке момента регистрации температуры относительно окончания нагрева, и для выявления дефектов по всей толщине цилиндрических оболочек было необходимо повторять сканирование при изменяющихся временах задержках. В последующие годы эйфория от победного шествия матричных тепловизоров снизила интерес к ИК-сканерам, однако в настоящее время этот метод ТК испытывает возрождение вследствие замены ИК-радиометров тепловизорами и хорошего сочетания аппаратуры ТК с роботизированными комплексами [68] (см. рис. 3в). Основной областью применения таких комплексов является НК изделий ракетно-космической техники цилиндрической и конической формы.

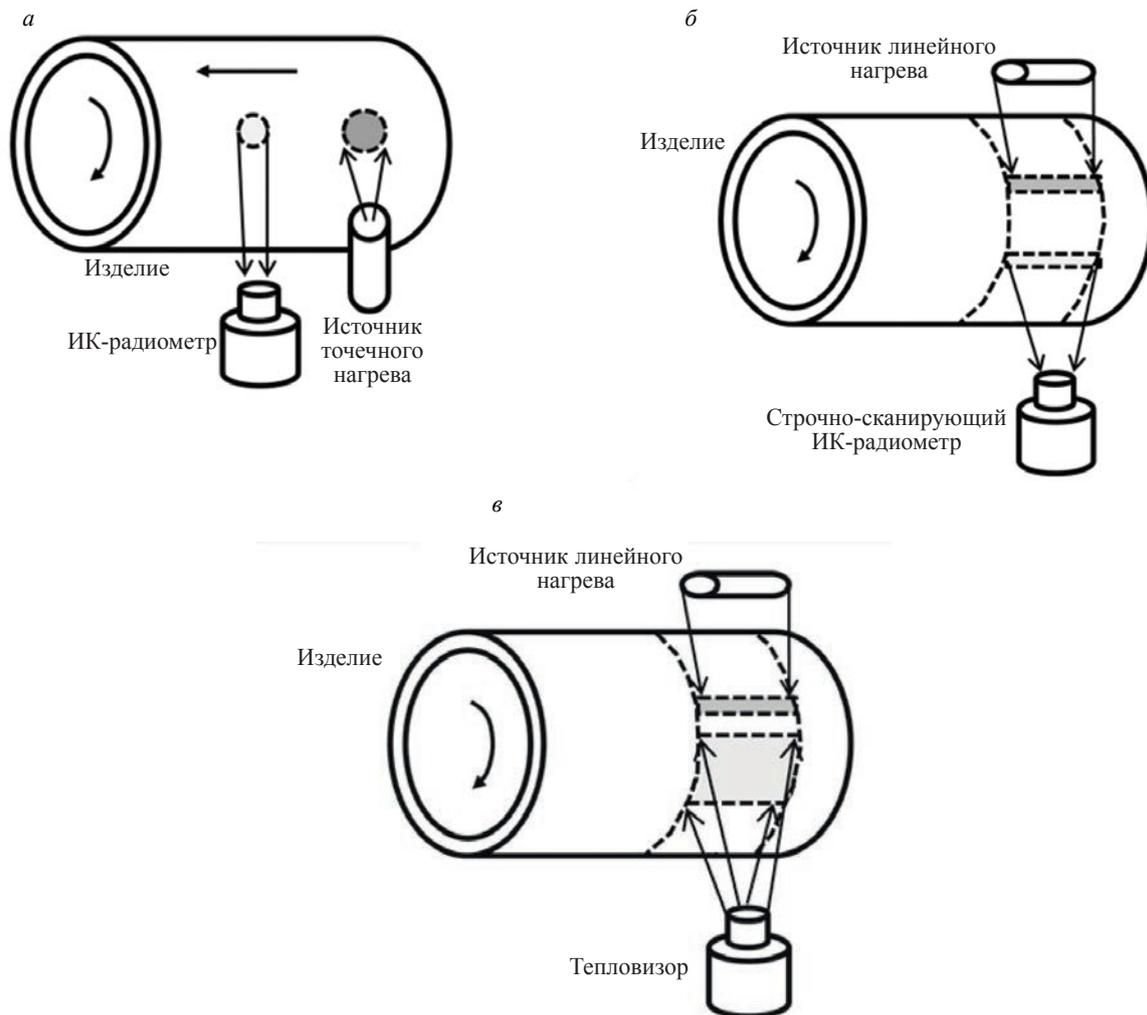


Рис. 3. Процедуры линейного сканирования с использованием точечных (а), строчно-сканирующих (б) ИК-радиометров и тепловизоров (в).

### 4.3. Акустическая ИК термография

В публикациях, где описаны техники термографирования при механической стимуляции объектов контроля, используют несколько терминов: «термоакустика» и «вибротепловизионный метод» (в России), «вибротермография» (vibrothermography), «звуковая ИК-термография» (sonic IR thermography), «ультразвуковая ИК-термография» (ultrasonic IR thermography). Эффективность этих способов ТК зависит от частоты ультразвуковой стимуляции и цели НК, будь то обнаружение скрытых дефектов или оценка механических напряжений.

Феномены вязкоупругости в бездефектных материалах, подвергнутых механической нагрузке, характеризуются слабыми температурными сигналами, тем не менее, тепловизионный анализ тонких температурных феноменов в изделиях сложной формы позволяет визуализировать механические напряжения в рамках так называемого метода анализа термоупругих напряжений (Thermoelastic Stress Analysis-TSA), использующего уравнение Томсона. Например, в мягких сталях изменение напряжений на уровне 1 МПа вызывает изменение температуры на уровне 1 °С. Поскольку требования к температурной чувствительности такого метода весьма высоки, используют циклическое (гармоническое) нагружение и принцип синхронного детектирования. Напомним, что W. Thomson (Lord Kelvin) был одним из первых ученых, описавших эффект термоупругости [69].

Интерес к использованию термоакустических феноменов в НК возрос в последнее время благодаря парадоксальной особенности метода, а именно, улучшению возможности дефектоскопии малых и «слипнутых» дефектов (трещин), в которых тепловая энергия генерируется за счет трения

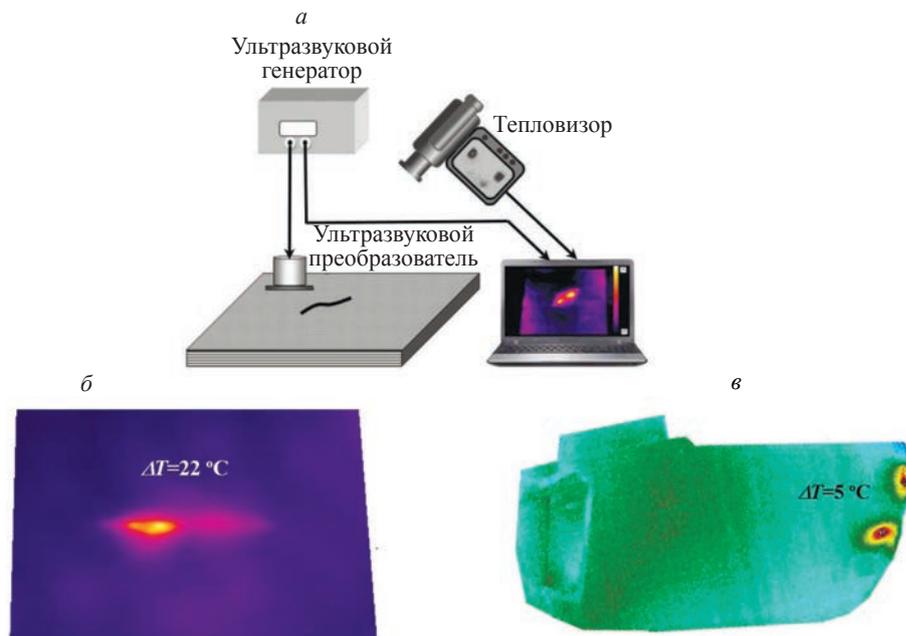


Рис. 4. Примеры ультразвукового ИК-термографического НК (стимуляция мощностью 300 Вт на частоте 22 кГц): *a* — схема испытаний; *б* — ударное повреждение (энергия удара 28 Дж) в углепластике; *в* — выявление усталостных трещин в турбинной лопатке.

берегов трещин, приводя к локальным температурным сигналам до нескольких десятков градусов (см. схему испытаний на рис. 4*a*). Кроме того, метод термоакустики реализует принцип так называемого «темного поля» (dark field), т.е. в процессе испытаний температура бездефектных областей практически не изменяется. Первые исследования в этой области были выполнены в 1981 г. R.V. Mignogna и др. [70]. В 1994 г. E.G. Henneke и др. ввели термин «вибротермография» [71]. Значительный объем исследований в данной области выполнили Хюан Нан и др. в Университете Уэйна, США [24, 26, 27, 72]. В ранних отечественных исследованиях по ультразвуковой ИК-термографии использовали магнитострикционные преобразователи мощностью 200—2000 Вт, работавшие на частоте 22 кГц [73]. В настоящее время чаще применяют мощные пьезоэлектрические преобразователи, работающие на частотах 20—60 кГц [25]. Ультразвуковую стимуляцию обычно применяют в течение 3—10 с или в виде краткого импульса (burst). Типичными проблемами данного метода является необходимость сохранять эффективный контакт ультразвукового излучателя с материалом, недопущение повреждения объекта контроля в зоне контакта, а также предотвращение появления стоячих волн, в узлах которых отсутствует накачка акустической энергии и, следовательно, изменение температуры.

В качестве иллюстрации эффективности описываемого способа ТК на рис. 4*б*, в приведены ИК-термограммы углепластикового композита с ударным повреждением (энергия удара 28 Дж) и турбинной лопатки с усталостной трещиной под теплозащитным покрытием.

Обнаружение поверхностных и подповерхностных трещин в турбинных лопатках, выполненных из жаропрочных сплавов, является важной областью применения ультразвуковой ИК-термографии. Более детальное описание возможностей и проблем этого метода можно найти в [16].

#### 4.4. Индукционная (вихретоковая) ИК-термография

Индукционная электромагнитная стимуляция возбуждает вихревые токи в теплопроводных материалах (металлах и углеродсодержащих композитах), которые концентрируются на краях трещин, приводя к локальным температурным сигналам. Подобно оптическому нагреву, индукционный нагрев может быть непрерывным, модулированным и импульсным, а его мощность может достигать нескольких кВт. В зависимости от контролируемого материала диапазон используемых частот составляет от нескольких килогерц до десятков мегагерц. В индукционной ТК термографии применяют те же методы обработки данных, что и в классическом ТК. Данный метод весьма эффективен

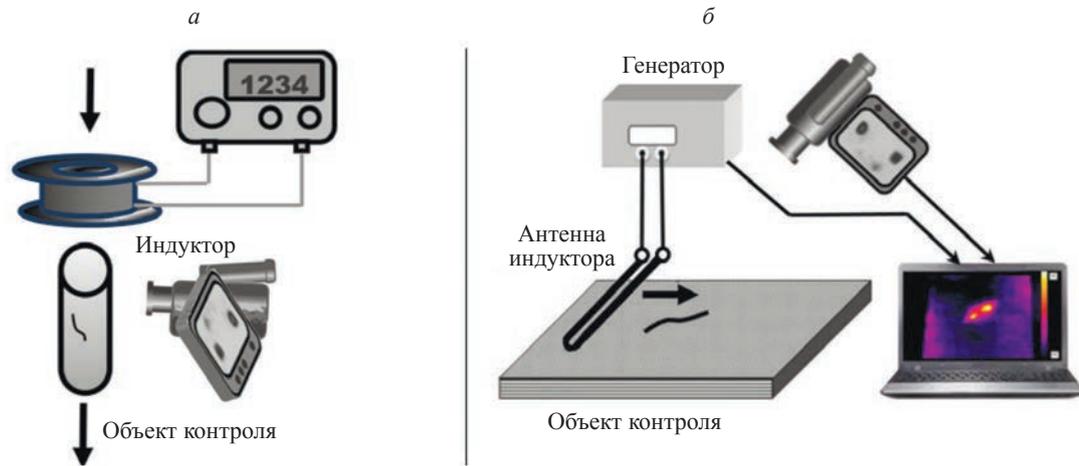


Рис. 5. Индукционная ИК термография:  
 а — нагрев цилиндрического объекта внутри индуктора; б — односторонний нагрев с помощью антенны.

для выявления поверхностных трещин, вокруг которых возрастает мощность вихревых токов, но в ряде случаев также возможно обнаружение подповерхностных дефектов. Наилучшей геометрией нагрева является размещение объекта контроля внутри индуктора (рис. 5а), что не всегда удобно на практике. Возможен сканирующий нагрев металлов полосовым индуктором, движущимся вблизи контролируемой поверхности (рис. 5б), но в этом случае снижается эффективность нагрева.

Впервые индукционная ИК-термография была предложена для обнаружения поверхностных трещин в стальных заготовках [74]. В 1994 г. R. Lehteniemi и J. Hartikainen разработали портативный тепловой дефектоскоп с индукционным нагревателем [75]. В последние годы активны группы В. Oswald-Tranta в Университете г. Леобена, Австрия [36], U. Netzelmann в Институте неразрушающего контроля, Германия [38]. Коммерческую аппаратуру DEFECTOVISION выпускает фирма Förster, Германия. В Чехии фирма Starmans Electronics разработала автоматизированную установку для контроля заготовок стальных валов, применяемых в автомобилестроении [76]. В Томском политехническом университете выполнены исследования по комбинированному НК с использованием оптического и индукционного нагрева [77]. Метод индукционной ИК-термографии эффективен для контроля турбинных лопаток, сварных швов, кованных изделий (карданных валов, конических шестерен), зубчатых колес, шестерен, эксцентриков и т.д.

## 5. ОБРАБОТКА ДАННЫХ В ТК

### 5.1. Помехи и шумы в ТК

Обработку данных в ТК выполняют с целью повышения достоверности испытаний, т.е. для улучшения предельных возможностей метода за счет повышения отношения сигнал/шум, а также для оценки существенных характеристик обнаруженных дефектов, имеющих значение для принятия решения о качестве изделия. С одной стороны, ТК базируется на хорошо сформулированных положениях теорий теплопередачи и теплового излучения, знание которых позволяет разрабатывать физически обоснованные алгоритмы тепловой дефектометрии. С другой стороны, как отмечалось выше, результатом применения большинства процедур активного ТК является куб данных, который чаще всего описываю в виде пиксельных функций  $T(i, j, k)$ . Следует иметь в виду, что функция  $T$  отражает кажущуюся температуру, которая совпадает с истинной только в случае абсолютно черного тела. Иными словами, при анализе результатов ТК в неявном виде присутствует спектральная функция помехи  $\varepsilon(i, j, k)$ , которая оказывает значительное влияние на результаты ТК (здесь  $\varepsilon$  есть коэффициент излучения, который согласно закону Кирхгофа численно равен коэффициенту поглощения  $\alpha$  на тех же длинах волн). Фактически, с учетом отраженного от объекта излучения сигнал ИК-детектора  $U(x, y, \tau)$  может быть выражен формулой (с точностью до постоянного коэффициента) [78]:

$$U(x, y, \tau) \pm \sqrt{\Delta U_D^2} = \varepsilon(x, y)T(x, y, \tau)^n + [1 - \varepsilon(x, y)]T_a(x, y, \tau)^n,$$

где  $\Delta U_D$  — амплитуда собственного белого шума ИК-детектора, определяющая температурное разрешение тепловизора  $\Delta T_{res}$ ;  $n$  — показатель степени, зависящий от спектральной чувствительности тепловизора;  $T_a$  — температура окружающей среды (или температура внешних тепловых источников), в том числе тех, которые используют для нагрева изделия. Коэффициент  $\varepsilon(i, j, k)$  в последнем выражении описывает мультипликативную помеху, в то время как второй член выражает внешнюю аддитивную помеху. Концепция шумов и помех в ТК разрабатывается в ТПУ и в кратком изложении сводится к следующему.

Предельные возможности ТК определяются температурным разрешением тепловизора, роль которого возрастает при слабых температурных сигналах в дефектных зонах.

Усредняя ИК термограммы в последовательности по  $N$  изображениям, можно улучшить температурное разрешение конкретного тепловизора в  $\Delta T_{res} / \sqrt{N}$  раз, однако это приводит к росту инерционности процесса регистрации температуры.

Температурные сигналы в дефектных зонах прямо пропорциональны мощности нагрева, увеличение которой ограничено температурой деструкции контролируемого материала.

Стационарную аддитивную помеху, обусловленную окружающей средой, устраняют вычитанием начальной термограммы из последовательности. Нестационарную аддитивную помеху, создаваемую источником нагрева, снижают физически (путем спектральной фильтрации, экранировки, поворота нагревателя и т.д.).

Мультипликативная помеха связана с оптическими свойствами объекта контроля, включая наличие грязи, пыли, пятен краски, царапин, инородных включений и т.д. Наименьшим уровнем помехи обладают неметаллы. Существенно снизить мультипликативную помеху можно, нанося на контролируемую поверхность однородное покрытие (краску). В ИК диапазоне цвет краски не имеет существенного значения, но при использовании оптического нагрева преимущественно излучением видимого диапазона предпочтительны краски темных цветов.

Мультипликативную помеху описывают контрастом шума, который в идеальном случае характеризует конкретный материал. Однако даже в случае «черных» покрытий контраст шума обычно не бывает ниже 2 %. Это означает, что при избыточной температуре нагрева 50 °С амплитуда излучательной помехи составляет 1 °С.

В реальных процедурах ТК поверхностный шум является нестационарным и, как правило, коррелирует с изменением мощности нагрева. Основным критерием сравнения процедур ТК является отношение сигнал/шум, которое изменяется во времени и достигает максимума в определенный момент времени (оптимальное время контроля).

## 5.2. Алгоритмы обработки данных

Как отмечено выше, обработка данных в ТК основана либо на многочисленных математических алгоритмах анализа нестационарных сигналов, либо на решениях теории теплопроводности, которые связывают температурные сигналы с ТФХ материала и параметрами скрытых дефектов. Алгоритмы 1-й группы улучшают отношение сигнал/шум; наиболее простой процедурой является фильтрация данных, а именно, двумерная пространственная и одномерная временная фильтрация высокочастотных температурных сигналов  $T(x, y, \tau)$ , причем используют два типа фильтров: сглаживающие (для подавления шумов) и градиентные (для подчеркивания границ дефектов). Для получения гладких зависимостей температуры от времени применяют полиномиальную фильтрацию функций  $T(\tau)$ , после чего возможно вычисление производных от температуры по времени. Алгоритмы 2-й группы в основном используют для тепловой дефектометрии. Например, приближенную оценку глубины залегания дефектов в одностороннем ТК выполняют по формуле:

$$l = \sqrt{a\tau_m},$$

следующей из решения задачи нагрева адиабатического полупространства импульсом Дирака (здесь  $\tau_m$  — время проявления максимального температурного сигнала  $\Delta T_m$ ).

Обе группы вышеупомянутых процедур обработки данных детально рассмотрены в [16] и кратко описаны в табл. 2 вместе с рядом экзотических алгоритмов, разработанных в последние годы.

Различные алгоритмы обычно сравнивают с использованием эталонных образцов, содержащих плоскодонные дефекты, используя критерий отношения сигнал/шум. На рис. 6 приведены результаты, полученные на образце из стеклопластика размером 195×195×9 мм, разработанном Лабораторией передовых систем (ASL), Индия, и содержащем дефекты различного вида (плоскодонные выемки, внутренние воздушные полости, вставки из пенополипропилена и эпоксидного

## Алгоритмы обработки данных в ТК

Алгоритм	Описание	Источник
Усреднение температуры во времени (averaging)	Усреднение функции по $N$ термограммам снижает случайный шум в $\sqrt{N}$ раз	[16]
Двухмерная пространственная фильтрация (2D filtration)	Для устранения однопиксельного шума используют простые маски размером $3 \times 3$ — $7 \times 7$ . Для подчеркивания границ дефектов применяют фильтры Собеля, Гаусса/Лапласа и т.п.	[16]
Вычитание фона (background subtraction)	Стандартная процедура вычитания из последовательности термограмм при начальной температуре позволяет подавить аддитивную помеху, то есть стационарные внешние засветки	[16]
Нормализация данных (normalization)	При делении термограмм, содержащих дефектные отметки, на термограмму без признаков дефектов возможно подавление мультипликативной помехи. Процедура деления увеличивает высокочастотные шумы	[79]
Раннее обнаружение (early detection)	Данный принцип основан на факте, что диффузия тепла проявляется слабее при малых временах наблюдения, температурные «отпечатки» скрытых дефектов имеют более резкие границы, но амплитуда сигналов $\Delta T$ ниже, чем в оптимальные времена наблюдения	[80]
Преобразование Фурье, или импульсная фазовая термография (PPT-Pulse Phase Thermography)	Базовая процедура ТК. К функции $T(\tau)$ применяют преобразование Фурье, переводя исходные термограммы в последовательность фазовых изображений (фазограмм), которые более помехозащищены. Как правило, наиболее информативна первая значимая частота Фурье. Алгоритм не требует выбора бездефектной зоны	[81]
Вейвлет-преобразование (wavelet analysis)	Метод сходен с преобразованием Фурье, но позволяет локализовать сигналы во времени. Применение в ТК фрагментарно. Алгоритм не требует выбора бездефектной зоны	[82]
Преобразование Хью (Hough transform)	Дискриминацию дефектных областей проводят в системе координат <i>Log-Log</i> , в которой функция температуры в бездефектной зоне имеет вид прямой линии. Алгоритм не требует выбора бездефектной зоны	[83]
Преобразование Радона (Radon transform)	Метод аналогичен преобразованию Хью. Алгоритм не требует выбора бездефектной зоны	[84]
Анализ главных компонент (PCA-Principal Component Analysis); разновидность – анализ главных компонент с прореживанием данных (sparse PCA)	Базовая процедура ТК. Исходную последовательность термограмм любой длины преобразуют в последовательность главных компонент, отражающих в порядке убывания наиболее статистически значимые характеристики температурного поля изделия. Наибольший объем информации заключается в нескольких первых компонентах. Обычно 1-я компонента отражает неоднородность нагрева, а дефектные отметки содержатся в последующих компонентах	[34]
Полиномиальная аппроксимация	Базовая процедура ТК. Пиксельные функции $T(\tau)$ аппроксимируют полиномами 3—6 порядка, устраняя высокочастотные шумы. Является важной стадией метода Термографической Реконструкции Сигнала (TSR)	[85]
Термографическая реконструкция сигнала (TSR—Thermographic Signal Reconstruction)	Базовая процедура ТК. Способ импульсного ТК (предложен S. Shepard) предусматривает полиномиальное сглаживание функции $T(\tau)$ и вычисление первой и второй производной производных по времени. Обеспечивает термограммы высокого качества. J.-M. Roche и D.L. Balageas распространили алгоритм на случай длительного нагрева	[24, 86]
Синхронная (фазочувствительная, термоволновая) термография (lock-in, phase sensitive, thermal wave thermography)	Комбинация фототермии и ИК-термографии, метод тепловых волн с анализом фазы	[50]
Мультичастотная синхронная термография с синтезом данных (multi-frequency fused thermography)	Нагрев тепловыми волнами различной частоты с фазовым анализом и синтезом данных	[87]
Частотно-модулированная визуализация тепловых волн (FMTWI—frequency modulated thermal wave imaging)	Частотная модуляция позволяет варьировать глубину проникновения тепловых волн для выявления различных дефектов в одном эксперименте. Метод сочетается с различными алгоритмами обработки данных (корреляция, окно Гаусса, импульсная компрессия и др.)	[53, 88]

Продолжение табл. 2

Корреляция (correlation)	Базовая процедура ТК. Корреляцию осуществляют во времени между пиксельными функциями в дефектной и бездефектной областях, а также возможна автокорреляция. Алгоритм снижает уровень мультипликативной помехи	[16]
Динамическая тепловая томография (dynamic thermal tomography)	Разработано множество томографических принципов с использованием ИК-излучения. Динамическая тепловая томография основана на эффекте запаздывания сигналов $\Delta T_m$ с ростом глубины дефектов при одностороннем ТК. Тепловые томограммы показывают распределение дефектов по нескольким (3—5) слоям и являются вспомогательным средством анализа сложных дефектов, например, ударных повреждений	[89]
3D-тепловая томография (3D thermal tomography)	Предложен основанный на Байесовской инверсии алгоритм для определения температурного отклика поверхности, нагреваемой последовательно в нескольких точках, в результате чего определяют ТФХ материала и положение скрытых неоднородностей	[90]
Синтетическая термография на основе анализа времени распространения («пролета») тепловых сигналов (STTOF — Synthetic Thermal Time-of-Flight)	Способ ТК, позволяющий преобразовывать исходные последовательности в изображения глубин залегания дефектов («глубинограммы») путем анализа точек перегиба на кривых $T(\tau)$ . Бездефектное изделие рассматривают как полубесконечное тело, а дефекты — как тонкие пластины	[91]
Метод восстановленного псевдо-теплового потока (RPHF- restored pseudo heat flux)	На основе решения задачи нагрева покрытия на подложке лазерным непрерывным пучком предложено определять толщину покрытия по временному псевдопрофилю пучка. Обратная задача решена с помощью нейронной сети, реализующей алгоритм опорной векторной регрессии (SVR-Support Vector Regression)	[92]
Термография с использованием синхронного детектирования и «самоэталонирования» (self-reference lock-in thermography)	При испытаниях механически нагруженных объектов предложен принцип синхронного детектирования, в котором в качестве опорного сигнала служит изменение температуры бездефектной зоны объекта контроля	[93]
Анализ термоупругих напряжений (TSA-Thermal Stress Analysis)	Базовая процедура ТК. ИК-термография для анализа распределения напряжений и развития усталостных трещин	[55]
Нейронные сети (neural networks)	Расширяющееся использование искусственного интеллекта позволяет решать многопараметрические задачи идентификации дефектов. Требуется представительная обучающая выборка для конкретных задач НК. Перспективное направление в ТК	[94]
Синтез данных (data fusion)	Развивающаяся концепция НК, использующая преимущества отдельных видов НК (например, ТК пригоден для обнаружения дефектов в «мертвой» зоне ультразвукового контроля)	[95, 96]
Параметрическая и непараметрическая реконструкция отдельных термограмм (parametric and non-parametric single image reconstruction)	При использовании активного ТК в медицинской диагностике предложены алгоритмы повышения теплового контраста, например, при термографировании вен	[97]
Подход Тагучи к проектированию тепловых дефектоскопов (Taguchi approach)	Метод Тагучи включает оптимизацию проектирования на 3-х уровнях: 1) системное проектирование; 2) параметрическое проектирование; 3) проектирование с учетом допусков	[98]

клея) размером 10×10 и 20×20 мм (рис. 6а). Образец нагревали двумя галогенными лампами общей мощностью 2 кВт в течение 10 с. Примеры эффективности обработки данных, выполненной с помощью программы ThermoFit Pro (Томский политехнический университет), приведены на рис. 6б—л. Параметры отдельных алгоритмов не приводятся, поскольку данные приведены с иллюстративной целью. Сравнение данных выполнено восемью обученными операторами по критерию Танимото:

$$TC = \frac{N_{r.d.} - N_{m.d.}}{N_{r.d.} - N_{f.d.}},$$

где  $N_{r.d.}$ ,  $N_{m.d.}$ ,  $N_{f.d.}$  — количества обнаруженных оператором реальных, пропущенных и ложных дефектов. Краткие комментарии к рис. 6 сводятся к следующему. Для оптимальной термограммы на рис. 6б:  $N_{r.d.} = 12$ ,  $N_{m.d.} = 3$ ,  $N_{f.d.} = 0$  и  $TC = 9/12$ , или 75 %. Фазограмма Фурье на 1-й значимой

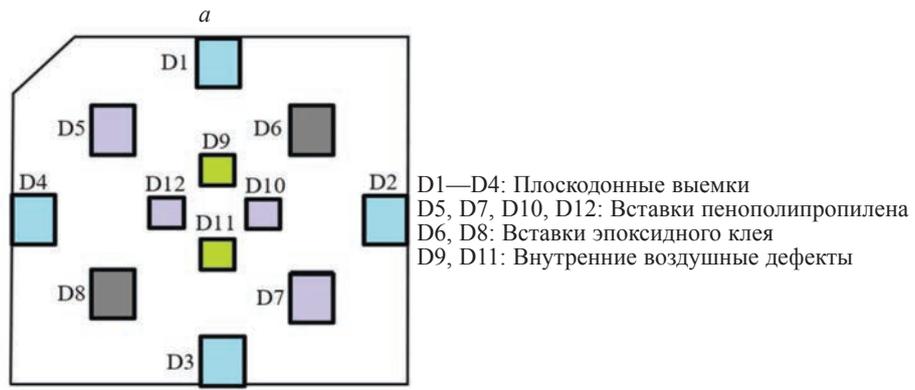
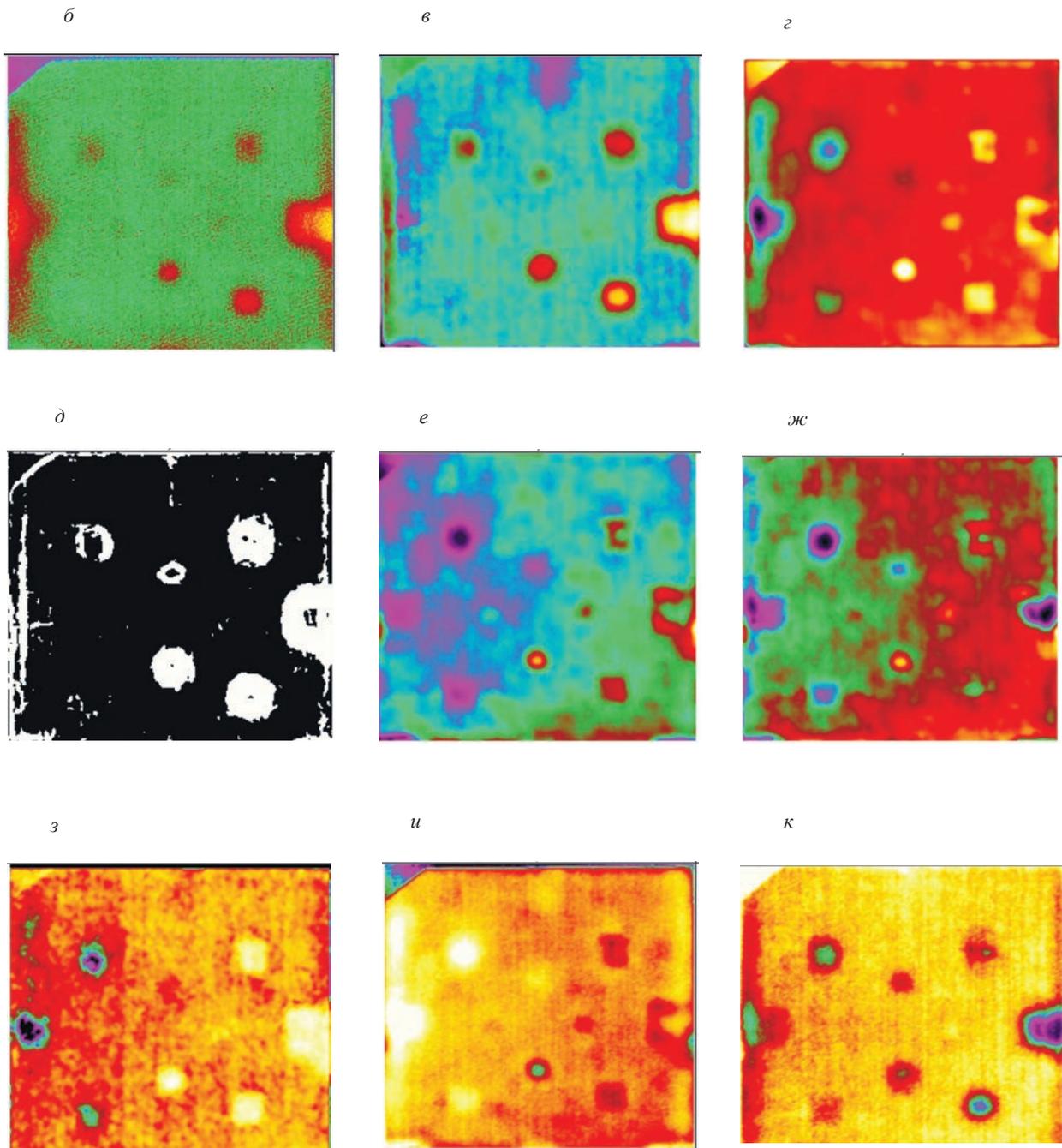


Схема дефектов



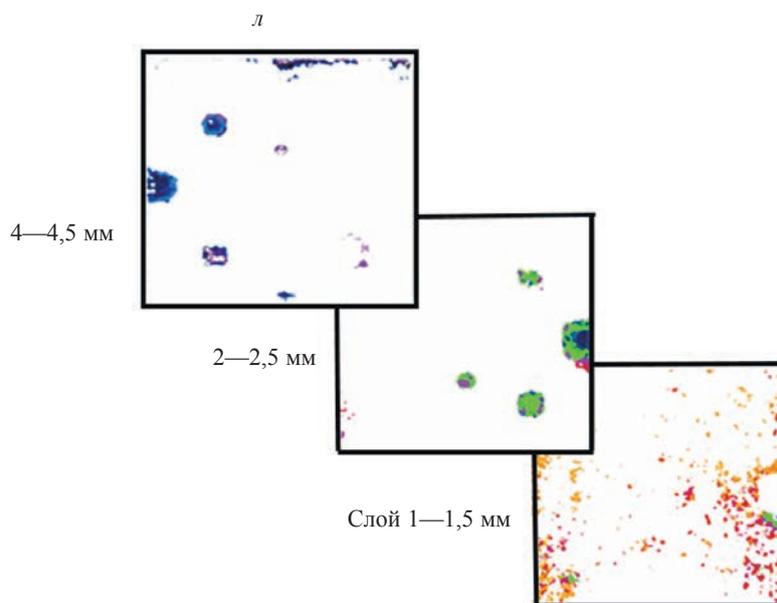


Рис. 6. Эффективность алгоритмов обработки ИК-термограмм в ТК (стандартный образец из стеклопластика толщиной 9 мм с дефектами различных видов):

*a* — схема дефектов; *б* — оптимальная термограмма ( $TC = 75\%$ ); *в* — фазограмма Фурье ( $TC = 50\%$ ); *г* — 2-я главная компонента (МАГК,  $TC = 83\%$ ); *д* — бинаризация 5-й главной компоненты с помощью фильтра Собеля (МАГК,  $TC = 50\%$ ); *е* — полиномиальная аппроксимация, 1-й коэффициент полинома 3-й степени ( $TC = 83\%$ ); *ж* — полиномиальная аппроксимация, 5-й коэффициент полинома 5-й степени ( $TC = 83\%$ ); *з* — авто-коррелограмма ( $TC = 64\%$ ); *и* — TSR-метод, 1-я производная ( $TC = 92\%$ ); *к* — TSR-метод, 2-я производная ( $TC = 67\%$ ); *л* — тепловые томограммы трех слоев.

гармонике показала изображение высокого качества, но с относительно небольшим количеством обнаруженных дефектов (рис. 6в,  $TC = 83\%$ ). Весьма эффективным является метод анализа главных компонент — МАГК (рис. 6г,  $TC = 50\%$ ). Рис. 6д иллюстрирует бинарную карту дефектов, полученную с помощью маски Собеля, однако пороговая фильтрация снизила количество обнаруженных дефектов до шести. Результаты, аналогичные МАГК, получены путем аппроксимации температурных профилей полиномом 3-й степени (рис. 6е), причем 1-й полиномиальный коэффициент обеспечил  $TC = 83\%$ . Близкие результаты отмечены в пятом коэффициенте полиномиальной функции пятой степени (рис. 6ж,  $TC = 83\%$ ). Изображение коэффициента автокорреляции обеспечило величину критерия Танимото на уровне 64 % (рис. 6з). Наибольшую эффективность показало изображение первой производной, полученное по методу TSR (рис. 6и,  $TC = 92\%$ ), в то время как изображение второй производной характеризовалось  $TC = 67\%$  (см. рис. 6к). Тепловые томограммы на рис. 6л позволили визуализировать дефекты в трех слоях изделия на глубине до 4,5 мм.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В мировом и отечественном НК последнее десятилетие характеризовалось ростом интереса к активному ТК, в особенности, если речь идет о композиционных и сотовых материалах авиакосмического профиля. Слоистый характер таких материалов предполагает возникновение тонких воздушных дефектов с преобладающими размерами в направлении, параллельном поверхности изделия. Тепловой контроль особенно эффективен для обнаружения расслоений в приповерхностных слоях, которые могут попадать в мертвую зону ультразвукового НК, включая теплозащитные покрытия толщиной 0,05—0,3 мм на металлической подложке. Предельная глубина выявления таких дефектов в односторонней процедуре ТК составляет 3—4 мм при поперечных размерах дефектов около 10 мм, в то время как двухсторонняя процедура обеспечивает контроль по всей глубине изделий толщиной 10—15 мм. Другим видом дефектов, эффективно обнаруживаемых с помощью ТК, является вода в сотовых структурах, которая создает специфические дефектные отметки, легко идентифицируемые оператором. Тепловой контроль предоставляет широкое поле для применения методов обработки данных, которые могут обладать физическим смыслом, если они связаны с теорией теплопередачи, или являться чисто математическими алгоритмами обработ-

ки зашумленных нестационарных процессов. Тем не менее эффективность сложных алгоритмов, применяемых для повышения отношения сигнал/шум, зачастую преувеличена; иными словами, «сырые» термограммы, полученные в оптимальный момент времени с помощью высококачественных тепловизоров, могут достаточно эффективно анализироваться операторами. Подавление помех осуществляют путем окрашивания изделий, а также разделением в пространстве тепловизора и источника нагрева. Но основная ценность специфической обработки результатов ТК заключается в возможности дефектометрии, роль которой возрастает в количественном НК.

Потенциал современного ТК связан с существенным прогрессом в области тепловизоров и тепловизионных модулей, на базе которых возможно создание роботизированных комплексов, предназначенных для фрагментарного контроля поверхности больших изделий. В то же время возродился интерес к сканирующему ТК при испытаниях крупногабаритных изделий цилиндрической и конической формы с использованием линейных источников нагрева. Для принятия решения о качестве изделий по результатам ТК успешно применяют нейронные сети, которые особенно эффективны при испытаниях однотипных изделий. С процессом обучения нейронных сетей связана до сих пор не решенная проблема создания и аттестации эталонных (контрольных, стандартных) образцов.

Автор благодарен А.О. Сиддикуи за предоставленный оригинальный эталонный образец композита с дефектами различной природы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2023-0004.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fourier J.* Théory du mouvement de la chaleur dans les corps solides, 1er partie // Mémoires de l'Académie des Sciences. 1824. V. 4. P. 185—555. 1826. V. 5. P. 153—246.
2. *Ångström M.A.J.* New method of determining the thermal conductivity of bodies // Phil. Mag. 1863. No. 25. P.130—142.
3. *Hudson R.D.* Infrared system engineering. Wiley-Interscience. 1969. 530 p.
4. *Lloyde J.M.* Thermal imaging systems. Plenum Press. New York. USA. 1979. 456 p.
5. *Accetta Joseph S., Shumaker David L.* The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook / Exec. Editors. V. 1-8. SPIE Optical Engineering Press. Bellingham, Washington, 1993.
6. *Vollmer M., Möllmann K.-P.* Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, research and applications. Wiley-VCH, Germany, 2010.
7. *Minkina W., Dudzik S.* Infrared Thermography: Errors and uncertainties. Wiley, 2009.
8. Nondestructive Testing Handbook, A.S.N.T. U.S.A. 2001. V. 3. Infrared and Thermal Testing. 714 P.
9. Infrared methodology and technology. Nondestructive testing monographs and tracts. Gordon and Breach Science Publishers, U.S.A. 1994. V. 7. 526 p.
10. *Maldague X.* Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography. Springer—Verlag, London, 1993. 440 p.
11. *Almond D., Patel P.* Photothermal science and techniques. London: Chapman and Hall, 1996. 230 p.
12. *Maldague X.* Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. John Wiley & Sons, New York, U.S.A. 2001. 682 p.
13. *Daniels A.* Field guide to infrared systems. SPIE Press, Washington, USA. 2006. 120 P.
14. *Kaplan H.* Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. Tutorial Texts in Optical Engineering, SPIE Press V. TT34, 1999, USA. 164 p.
15. *Breitenstein O., Warta W., Langekamp M.* Lock-in thermography. Springer Series in Advanced Microelectronics. V. 10. Springer, 2010. 250 p.
16. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД «Спектр», 2015. 545 с.
17. *Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В.* Тепловой контроль. М.: ИД «Спектр», 2011.
18. *Будадин О.Н., Потанов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В.* Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 476 с.
19. *Vavilov V., Burleigh D.* Infrared thermography and thermal nondestructive testing. Springer Nature, 2019. 595 p.
20. *Чернышева Т.И., Чернышев В.Н.* Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. М.: Машиностроение, 2001. 194 с.
21. *Cramer E., Winfree W., Hodges K.L., Koshti A.* Status of thermal NDT of space shuttle materials at NASA // Proc. SPIE. April 2006. V. 6205. 9 p. DOI:10.1117/12.669684
22. *Vavilov V.P., Burleigh D.D.* Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing // NDT & E International. 2015. V. 73. P. 28—52.
23. *Maldague X.P., Zolotoyabko E.* Theory and practice of infrared vision (2nd ed.) / Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, John Wiley & Son Publ., 2016. 780 p.

24. Siegel J., Beemer M.F., Shepard S. Automated non-destructive inspection of fused filament fabrication components using Thermographic Signal Reconstruction // Additive Manufacturing. Nov. 2019. V. 31. P. 100923. DOI:10.1016/j.addma.2019.100923
25. Чулков А.О., Нестерук Д.А., Шагдыров Б.И., Вавилов В.П. Метод и аппаратура инфракрасного и ультразвукового термографического контроля крупногабаритных композиционных изделий сложной формы // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 67—74. DOI: 10.31857/S0130308221070083
26. Obeidat O., Qiuye Yu, Favro L., Xioyan Han. The Effect of heating duration on the quantitative estimation of defect depth using sonic infrared imaging // J. Nondestruct. Eval. Diagnost. and Prognostics of Eng. Systems. March 2021. V 4 (4). P. 1—7. DOI:10.1115/1.4050353
27. Xiaoyan Han, Jianping Liu, Islam Md. S. Sonic infrared imaging NDE, Proceedings of SPIE / The International Society for Optical Engineering. May 2005. V. 5765. P. 142—147. DOI:10.1117/12.600118
28. Holland S., Schiefelbein B. Model-based inversion for pulse thermography // Exp. Mech. 2019. V. 59 (4). P. 413—426. DOI: 10.1007/s11340-018-00463-2
29. Holland S.D. First measurements from a new broadband vibrothermography measurement system // Rev. of Quant. Nondestruct. Evaluation. 2007. V. 26. P. 478—483.
30. Zalameda J.N., Winfree W. Passive thermography measurement of damage depth during composites load testing // Frontiers in Mech. Eng. Apr. 2021. V. 7. P. 651149. DOI:10.3389/fmech.2021.651149
31. Cramer E.K., Winfree W. The application of principal component analysis using fixed eigenvectors to the Infrared thermographic inspection of the space shuttle thermal protection system / Proc. Quantitative InfraRed Thermography Conf. January 2006. DOI:10.21611/qirt.2006.002
32. Sun J.G. Quantitative thermal tomography imaging of complex material structures / AIP Conference Proceedings. 2012. V. 1430. P. 507. DOI: 10.1063/1.4716269
33. Roche J.-M., Balageas D.L. Common tools for quantitative time-resolved pulsed and step-heating thermography- part 1: theoretical basis // Quant. Infrared Thermography J. 2014. V. 11. P. 43—56.
34. Rajic N. Principal Component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures // Composite Structures. Dec. 2002. V. 58 (4). P. 521—528. DOI:10.1016/S0263-8223(02)00161-7
35. Almond D.P., Angioni S., Pickering S.D. A case for NDT expert systems based on the development of the Thermographic NDE Advisory and Guidance System, Insight // Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. Sept. 2017. V. 59 (9). P. 473—478. DOI: 10.1784/insi.2017.59.9.473
36. Metz C., Franz P., Fischer C., Wachtendorf V., Maierhofer C. Active thermography for quality assurance of 3D-printed polymer structures / In: Proc. 14th Intern. Conf. Quant. Infr. Thermogr. June 2018. Berlin, Germany. NDT. net Issue: 2019-05. DOI:10.3390/app12125851
37. Tuschl C., Oswald-Tranta B., Eck S. Scanning inductive thermographic surface defect inspection of long flat or curved work-pieces using rectification targets // Appl. Sciences. 2022. V. 12 (12). P. 5851.
38. Mayr G., Plank B., Gruber J., Sekelja J., Hendorfer G. Quantitative evaluation of the effective thermal diffusivity for model-based porosity prediction in CFRP // Quant. Infr. Thermogr. J. 2016. V. 13 (1). P. 70—82. DOI: 10.1080/17686733.2015.1093310
39. Netzelmann U., Walle G., Lugin S., Ehlen A., Bessert S., Valeske B. Induction thermography: principle, applications and first steps toward standardization // Quant. Infr. Thermogr. J. 2016. V. 13. No. 2. P. 170—81. DOI: 10.1080/17686733.2016.1145842
40. Ryu M., Batsale J.-C., Morikawa J. Modelling of dual lock-in method for the simultaneous measurements of thermal diffusivity and thermal effusivity // Intern. J. Heat and Mass Transfer. Dec. 2020. V. 162. P. 120337. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120337
41. Alhammad M., Avdelidis N.P., Ibarra-Castaneda C., Torbali M.E., Genest M., Zhang H., Zolotas A., Maldgve X.P. Automated impact damage detection technique for composites based on thermographic image processing and machine learning classification // Sensors. 2022. V. 22 (23). Article No. 9031.
42. Nowakowski A., Kaczmarek M. Active dynamic thermography in medical diagnostics / In: Application of Infrared to Biomedical Sciences. Eds. E.Y. Ng and M. Etehad Tavakol. Springer Nature, Singapore. March 2017. P. 291—310. DOI:10.1007/978-981-10-3147-2\_17
43. Gryś S., Minkina W. Noninvasive methods of active thermographic investigation: Short overview of theoretical foundations with an example of application // Energies. 2022. V. 15. P. 4865. DOI: 10.3390/en15134865
44. Świdorski W. IR Thermography nondestructive testing methods of composite materials used in aerospace applications / Proc. Quantitative InfraRed Thermography Asia Conf. Jan. 2015. 7 p. DOI:10.21611/qirt.2015.0016
45. Gliścińska E., Michalak M., Krucińska I., Strakowska M., Kopeć M., Więcek B. A new thermographic method for determining the thickness of the polymer surface layer in sound-absorbing fibrous composite materials // Polymer Testing. Aug. 2022. V. 115 (2). P. 107748.
46. Steenackers G., Peeters J., Janssens K. Sublayer composition evaluation of Artwork using active thermography / In: Proc. 14 Intern. Conf. on Quant. Infr. Thermogr. Berlin, Germany. June 2018.
47. Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., Saeed N., Omar M. Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating defect depth in infrared thermographic nondestructive testing // Infr. Phys. & Techn. 2019. V. 102. P. 103047. DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103047

48. *Venegas P., Peran J., Usamentiaga R., De Ocariz I.S.* NDT inspection of aeronautical components by projected thermal diffusivity analysis / Proc. 14th International Conference on Quant. Infr. Thermography 2018, June, Berlin, Germany. NDT.net Issue: 2019-05.

49. *Cernuschi F., Bison P.* Thirty years of thermal barrier coatings (TBC). Photothermal and thermographic Techniques: Best practices and lessons learned // J. Thermal Spray Techn. March 2022. V. 31 (3). 30 p. DOI:10.1007/s11666-022-01344-w

50. *Meola C., Carlomagno G.M., Squillace A., Vitiello A.* Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography // Measurement Science and Technology. 2006. V. 13. No. 3. P. 380—389. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2005.02.007

51. *D'Accardi E., Palumbo D., Tamborrino R., Cavallo P., Galietti U.* Pulsed Thermography: evaluation and quantitative analysis of defects through different post-processing algorithms. NDT.net Issue: 2019-05. Proc. 14th Intern. Conf. on Quant. Infr. Thermography-2018, 25-29 June 2018, Berlin, Germany. NDT.net Issue: 2019-05.

52. *Švantner M., Muzika L., Moskovchenko A., Pereira C.M.C.* Repeatability study of flash-pulse thermographic inspection of carbon-fiber composite samples // Infrared Physics & Technology. Sept. 2022. V. 126. P. 104350. DOI:10.1016/j.infrared.2022.104350

53. *Mulaveesala R., Tuli, S.* Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection // Applied Physics Letters. 2006. V. 89 (19). Art. No. 191913.

54. *Park H.-S., Choe M.-Y.* Research trends in infrared thermography NDT — Ultrasound infrared thermography technology // J. Korean Soc. Nondestr. Test. 2012. V. 32 (3). P. 307—313. DOI: 10.7779/JKSNT.2012.32.3.307

55. *Uchida Y., Shiozawa D., Hori M., Kobayashi K., Sakagami T.* Advanced technique for thermoelastic stress analysis and dissipation energy evaluation via visible-infrared synchronous measurement // Experimental Mechanics. March 2022. V. 62 (3). P. 459—470.

56. *Runshi Zhang, Xingwang Guo, Mingyuan He.* Intelligent pseudo solder detection in PCB using laser-pulsed thermography and neural network // IEEE Sensors J. Nov. 2021. V. 22. No. 1. P. 631—638. DOI:10.1109/JSEN.2021.3129064

57. *Jue Hu, Hai Zhang, Sfarra S., Gargiulo G., Avdelidis N.P., Mingli Zhang, Yang D., Maldague X.* Non-destructive imaging of marqueteries based on a new infrared-terahertz fusion technique // Infrared Physics & Technology. June 2022. V. 125 (9). P. 104277. DOI:10.1016/j.infrared.2022.104277

58. *Fernandes H.C., Herrman H.-G., Hai Zhang, Goyo F., Nativio Del Pra J.H., Tarpani J.R.* Infrared thermography for impact damage analyses on curved CFRP laminates used in geostationary satellites / In: Proc. 5th Brazilian Conference on Composite Materials – BCCM 5. Jan. 2021. Sao Carlos, Brazil. 7 p.

59. *Panella F.W., Pirinu A.* Application of Pulsed Thermography and Post-processing Techniques for CFRP Industrial Components // J. Nondestruct. Eval. 2021. V. 40. P. 52. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00776-8>

60. *Будадин О.Н., Кульков А.А., Козельская С.О.* Способ теплового контроля композитных материалов / Патент РФ № RU 2616438 C1, рег. 23.05.2016, публ. 14.04.2017.

61. РД-13-04-2006 Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Серия 28. Выпуск 11/ Колл. авт. Под общ. ред. Пуликовского К.Б. М.: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2007, 32 с.

62. *Чернышев В.Н., Однолько В.Г., Чернышев А.В.* Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий. М.: ИД «Спектр», 2012. 201 с.

63. *Пономарев Д. Б., Захаренко В.А., Абрамова Е.В.* Анализ погрешностей при пирометрических измерениях в производственных условиях // Омский научный вестник. 2019. № 5. С. 94—99. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-94-99

64. *Котовицков И.О.* Разработка методики активного теплового контроля вертолётных лопастей из композиционных материалов / Дисс. ... на соискание уч. степени канд. техн. наук. С.-Петербург: ИТМО, 2022. 287 с.

65. *Roemer J., Pieczonka L., Uhl T.* Laser spot thermography of welded joints. Diagnostyka, 2014. V. 15. No. 2. P. 43—49.

66. *Mashkov P., Pencheva T., Gyoch B.S.* Reflow soldering processes development using infrared thermography / Proc. 32nd Intern. Spring Seminar on Electronics Techn. June 2009. DOI:10.1109/ISSE.2009.5207020

67. *Стороженко В.А.* Исследование метода и разработка средств активного теплового контроля неметаллических материалов / Автореферат канд. дисс. Винница: Политехн. институт, 1979. 23 с.

68. *Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., OswaldTranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V.* The detection and characterization of defects in metal/nonmetal sandwich structures by thermal NDT, and the comparison of areal heating and scanned linear heating by optical and inductive methods // J. Nondestruct. Eval. 2021. V. 40. Article No. 44. DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y

69. *Thomson W. (Lord Kelvin).* On the dynamical theory of heat / Transactions of the Royal Society of Edinburgh. 1853. V. 20. P. 261—283.

70. *Mignogna R.B., Green R.E., Duke J., Henneke E.G., Reifsnider K.L.* Thermographic investigations of high-power ultrasonic heating in materials / *Ultrasonics*. 7. Guildford, Surrey, UK: IPS Science and Technology Press, 1981. P. 159—163.
71. *Henneke E.G. II, Russell S.S.* Vibrothermography / *Nondestructive Testing Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed. Special Nondestructive Testing Methods. Columbus, OH, USA: American Society for Nondestructive Testing, 1994. V. 9. P. 336—340.
72. *Xiaoyan Han, Jianping Liu, Md. S. Islam.* Sonic infrared imaging NDE / *Proc. of SPIE — The International Society for Optical Engineering*. May 2005. V. 5765. P. 142—147. DOI:10.1117/12.600118
73. *Vavilov V., Nesteruk D.* Comparative analysis of optical and ultrasonic stimulation of flaws in composite materials // *Rus. J. NDT*. 2010. V. 46. No. 2. P. 147—152.
74. *Kremer K.-J.* A new technique for online testing of steel products for surface defects / *Proc. 3<sup>rd</sup> European Conf. on Nondestr. Testing*. 15—18 Oct. 1984. Florence, Italy. P. 171—186.
75. *Lehtiniemi R., Hartikainen J.* An application of induction heating for fast thermal nondestructive evaluation // *Rev. Sci. Instrum.* 1994. V. 65. P. 2099—2101.
76. *Starman S., Matz V.* Automated system for crack detection using infrared thermographic testing / *Proc. 4th Intern. CANDU In-service Inspection Workshop and NDT Conf.* June 18—21 2012. Toronto, Canada. 7 p. [https://www.ndt.net/article/ndt-canada2012/content/papers/19\\_Starman.pdf](https://www.ndt.net/article/ndt-canada2012/content/papers/19_Starman.pdf).
77. *Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., Oswald Tranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V.* The detection and characterization of defects in metal/nonmetal sandwich structures by thermal NDT, and a comparison of areal heating and scanned linear heating by optical and inductive methods // *J. Nondestr. Eval.* 2021. V. 40 (44). DOI: 10.1007/s10921-021-00772-y
78. *Vavilov V.P.* Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing // *NDT & E Intern.* Jan. 2014. V. 61. P. 16—23.
79. *Degiovanni A., Lamine A.-S., Houlbert A.-S., Maillet D.* Identification of subsurface defects using a sensibility analysis / *Proc. 4th Europ. Conf. on Comp. Mater.* Stuttgart, Germany, 25—28 Sept. 1990. P. 691—695.
80. *Krapez J.-C., Balageas D.L.* Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography / *Proc. Quant. Infr. Thermography QIRT-94, Eurotherm Seminar #42, Sorrento. Italy.* 23—26 August 1994. P. 260—266.
81. *Maldague X., Marinetti S.* Pulse phase infrared thermography // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79. P. 2694—2698.
82. *Galmiche F., Vallerand S., Maldague X.* Wavelet transform applied to pulsed phase thermography / *Proc. V-th Workshop on Advances in Infrared Technology and Applications*. Ed. by E. Grinzato, P. Bison and A. Mazzoldi, CNR, Venice, Italy 1999. P. 117—122.
83. *Ibarra-Castanedo C., Gonzalez D., Galmiche F., Maldague X.P., Bendada A.* Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data / *Proc. SPIE «Thermosense-XXVIII»*, 2006. V. 6205. P. 620514—1-12.
84. *Gonzales D., Ibarra-Castanedo C., Madruga F., Maldague X.P.* Analysis of pulsed thermographic sequences based on Radon transform / *Proc. SPIE «Thermosense-XXVIII»*. 2006. V. 6205. P. 62051N—1-7.
85. *Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Vavilov V.* Non-destructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography / *Res. in NDE*. Springer-Verlag, New York. 1994. V. 5 (4). P. 257—271.
86. *Shepard S.* Temporal noise reduction, compression and analysis of thermographic image data sequences. U.S. Patent No. 6516084. 2003.
87. *Yanjie Wei, Yimin Ye, Hongjun He, Zhilong Su.* Multi-frequency fused lock-in thermography in detecting defects at different depths // *J. Nondestruct. Eval.* Aug. 2022. V. 41 (3). DOI:10.1007/s10921-022-00889-8
88. *Kaur K., Mulaveesala M.* An efficient data processing approach for frequency modulated thermal wave imaging for inspection of steel material // *Infr. Phys. & Techn.* Dec. 2019. V. 103. P. 103083. DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103083
89. *Vavilov V.P., Shirayev V.V., Kuimova M.V.* Time- and phase-domain thermal tomography of composites // *Photonics* 2018. V. 5 (4). P. 31. DOI: 10.3390/photonics5040031
90. *Toivanen J.M., Tarvainen T., Huttunen J.M.J., Savolainen T., Orlande H.R.B., Kaipio J.P., Kolehmainen V.* 3D thermal tomography with experimental measurement data // *Inter. J. Heat & Mass Transf.* Nov. 2014. V. 78. P. 1126—1134.
91. *Ringermacher H.I., Howard D.R., Knight B.* Thermal imaging NDT at General Electric / 18th WCNDT. 16—20 April 2012 Durban, South Africa. 4 p. (available on CD).
92. *Hongjin Wang, Sheng-Jen Hsieh.* Solving the inverse heat conduction problem in using long square pulse thermography to estimate coating thickness by using SVR models based on restored pseudo heat flux (RPHF) in plane profile // *J. Nondestr. Eval.* 2018. V. 37. P. 78. DOI: 10.1007/s10921-018-0535-8
93. *Sakagami T., Izumi Y., Mori N., Kubo S.* Development of self-reference lock-in thermography and its application to remote nondestructive inspection of fatigue cracks in steel bridges // *Quant. Infr. Thermography Journal*. 2010. V. 7 (1). P. 73—84.
94. *Ciliberto A., Cavaccini G., Salvetti O.* et al. Porosity detection in composite aeronautical structures // *Infr. Phys. & Techn.* 2002. V. 43. P. 139—143.

95. *Shark L.K., Matuszewski B.J., Smith J.P., Varley M.R.* Automatic feature-based fusion of ultrasonic, radiographic and shearographic images for aerospace NDT // *Insight*. 2001. V. 43 (9). P. 607—615.

96. *Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V.P., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G.M.* Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection // *J. of Nondestr. Eval.* Jan. 2016. V. 35 (18). P. 160—174. DOI:10.1007/s10921-015-0331-7

97. *Saxena A., Raman V., Ng E.Y.K.* Study on methods to extract high contrast image in active dynamic thermography // *Quant. Infrared Thermogr. J.* 2019. V. 16(3-4). P. 343—259. DOI: 10.1080/17686733.2019.1586376

98. *Abdulrahman Y.A., Omar M.A., Said Z., Obeideli F., Abusafieh A., Sankaran G.N.* A Taguchi design of experiment approach to pulse and pock-in thermography, applied to CFRP composites // *J. Nondestruct. Eval.* 2017. V. 36. P. 72. DOI: 10.1007/s10921-017-0450-4

---

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО СВАРНОГО ШВА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2023 г. Н.А. Маслов<sup>1,\*</sup>, С.А. Константинов<sup>1</sup>, А.Г. Маликов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия 630090 Новосибирск,

ул. Институтская, 4/1

E-mail: \*nmaslov@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.04.2023; после доработки 23.05.2023

Принята к публикации 24.05.2023

Сварка металлов подвержена разного рода случайным процессам, ухудшающим качество шва, — от наличия неоднородностей в металле до самопроизвольно возникающих импульсных процессов. Выборочный разрушающий контроль до начала сварки не может исключить наличие неоднородностей, не поможет при спонтанных нарушениях режима. Поэтому сегодня, особенно в связи с массовым внедрением волоконных лазеров, актуальна разработка новых подходов к диагностике процесса лазерной сварки в режиме реального времени. Задачей данной работы была разработка подходов к оптической диагностике процесса формирования гетерогенного материала на основе лазерной эмиссионной спектроскопии. Создана экспериментальная установка для разработки подходов к оптической диагностике процесса формирования гетерогенного материала, что является актуальной задачей для аддитивных технологий и лазерной сварки. Показано, что для актуальных в промышленности алюминиевых сплавов (1420, 1580, АМГ) удастся регистрировать спектры газоплазменного шлейфа, возникающего под воздействием лазерного излучения на поверхность металла. Эти спектры зависят от режима воздействия излучения и отражают процессы испарения атомов и молекул из ванны расплава. Дальнейшие исследования позволят установить характер этой связи и на ее основе разрабатывать оптимальные режимы технологических процессов, осуществлять управление этими процессами в режиме реального времени.

*Ключевые слова:* лазерная эмиссионная спектроскопия, волоконный иттербиевый лазер, алюминиеволитиевые сплавы.

DOI: 10.31857/S0130308223060052, EDN: AAKBEU

### ВВЕДЕНИЕ

При использовании мощного лазерного излучения для аддитивного производства и сварки многих технологических сплавов одной из основных проблем является потеря легко испаряющихся легирующих элементов из зоны расплава. На этот процесс влияют различные факторы — температурный режим, качество поверхности, ее покрытие поверхностно-активными элементами, возмущения на границе расплава, наличие плазмы в непосредственной близости от границы испарения. В результате состав и свойства сварного шва оказываются неконтролируемыми, особенно, как это широко известно, при сварке алюминиевых сплавов.

Диагностика процесса сварки или наплавки непосредственно во время производства с обратной связью в цепи параметров управления лазерным излучением дает возможность влиять на данные процессы. Например, *in situ* рентгеноструктурный анализ с использованием синхротронного излучения обеспечивает информацию о фазовом составе наплавляемого материала в процессе его нагрева и остывания. Это позволяет регулировать его свойства и добиться прочностных характеристик произведенной детали из нержавеющей стали наравне с изготовленной из цельного материала [1]. Однако в процессе реального производства такой метод слишком дорог и может использоваться только как научный инструмент для оптимизации технологического процесса.

Другим типом диагностики сварки является воздействие мощного лазерного излучения, которое позволяет получать информацию о процессе различными оптическими методами, например, лазерно-искровой спектроскопией. При использовании импульсного лазера с достаточной импульсной мощностью, по спектрам образующейся при пробое плазмы метод позволяет определять химический состав исходного сплава [2], ванны расплава [3], сопутствующей газовой фазы и плазмы [4], результирующего шва [5]. Этот метод, однако, в силу использования оптического пробоя несет информацию исключительно об элементном составе исследуемых объектов и требует дополнительного лазера для проведения диагностики. Кроме того, мощное импульсное лазерное излучение может вносить возмущения в процесс сварки и наплавки, за исключением случаев, когда для диагностики и технологического процесса используется один и тот же импульсно-периодический лазер [6].

Более деликатный метод анализа состава газоплазменного шлейфа использует лазерно-индуцированную флуоресценцию. Для него также необходим дополнительный лазер, который позволяет возбуждать флуоресценцию определенных атомов, а значит должен обеспечивать подходящую длину волны излучения. Лучшее всего для этих целей подходят перестраиваемые лазеры. Это делает реализацию метода достаточно сложной, однако за счет выбора длины волны возбуждения обладает высокой избирательностью, позволяя диагностировать именно заданные процессы [7]. Отдельно также можно отметить перспективность спектроскопических методов диагностики при гибридной лазерно-электродной сварке [8], когда регистрируют свечение плазмы, возникающий вследствие протекания тока.

При лазерной обработке металла ванна расплава и образующийся газоплазменный шлейф излучают свет сами по себе, и даже их яркостных характеристик может быть достаточно для диагностики [9]. В некоторых случаях состав и температура газового шлейфа позволяет наблюдать его свечение, отличное от теплового, и проводить оценку его состояния методами эмиссионной спектроскопии. В отличие от обозначенных выше подходов, данный метод дает информацию не только об элементном составе, но и молекулярном, кинетике происходящих процессов. Это позволяет проводить диагностику при сварке изделий из нержавеющей стали [10], сплавов титана [11] и магния [12]. При использовании различных типов лазеров (углекислотного, Nd:YAG, волоконного) удалось связать спектральные характеристики плазменного шлейфа с глубиной проплавления в процессе сварки нержавеющей стали [13]. При сварке различных алюминиевых сплавов углекислотным лазером эмиссионная спектроскопия позволяет оценить влияние процессов отражения и преломления лазерного излучения в образующейся плазме [14], влияние технологического газа на процессы окисления и испарения элементов сплава [15], потерю легирующих элементов [16], трансформацию фаз материала [17], определить момент зарождения дефекта [18].

С развитием новых типов лазеров, особенно волоконных, данные исследования становятся еще более актуальными, особенно учитывая возросшую мощность излучения [19]. Есть данные о возможности оценивать потерю легирующих элементов [20], глубину проплавления при сварке с помощью иттербиевого волоконного лазера. Для авиационной промышленности несомненный интерес представляют лазерные технологии для обработки алюминиево-литиевых сплавов. На сегодняшний день имеются наработки, показывающие возможность диагностировать прочностные характеристики сварного шва для такого рода задач [21]. Однако они базируются на принципах машинного обучения, и полного понимания происходящих процессов нет. В большинстве работ основное внимание уделено диапазону ультрафиолета и видимому диапазону до длины волны 500 нм, как, видимо, наиболее информативным. Для содержащих литий сплавов большие длины волн излучения также могут представлять интерес. Целью данной работы является разработка подходов к диагностике формирования гетерогенного материала при использовании мощного излучения волоконного лазера на основе лазерной эмиссионной спектроскопии в режиме реального времени. Для этого была создана измерительная система и определены характеристические спектры представляющих интерес сплавов для дальнейшего детального изучения лазерных технологических процессов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для мощного лазерного воздействия использовали волоконный иттербиевый лазер производства IPG Photonics с длиной волны излучения 1,07 мкм, оборудованным роботизированным манипулятором. С помощью манипулятора лазерный пучок перемещали вдоль поверхности образца. Излучение от газоплазменного шлейфа, возникающего в результате лазерного воздействия, напрямую попадало на входную щель спектрометра, расположенного в 1 м от положения фокуса лазерного излучения.

Спектрометр состоял из монохроматора с голографической дифракционной решеткой, с дисперсией 16 нм/мм. Входная щель спектрографа устанавливалась 0,05 мм, что обеспечивало спектральное разрешение порядка 1 нм. В качестве регистрирующего элемента в спектрометре использован усилитель яркости — микроканальная пластина (электронно-оптический преобразователь, ЭОП) с фотокатодом на увиолевой подложке (ЭПМ 44Г-БУ, ОАО «Катод», Россия), обеспечивающим диапазон спектральной чувствительности детектора от 200 до 900 нм. Коэффициент усиления на длине волны 555 нм —  $10^4$ , время послесвечения — порядка 1 мс. Перед входной щелью спектрометра устанавливали фильтр БС-6, тогда фотокатодом ЭОП охватывался участок спектра в диапазоне 360—680 нм в первом порядке дифракции, или фильтр УФС-1, тогда эффективный измеряемый спектральный диапазон составлял 220—340 нм во втором порядке дифракции. Изо-

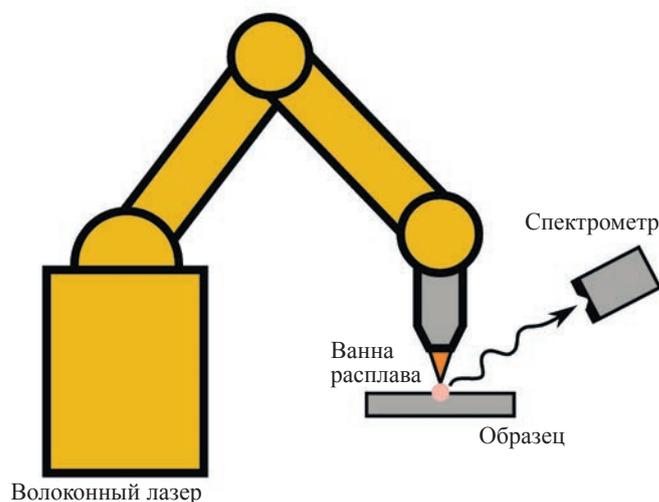


Рис. 1. Схема эксперимента.

бражение с люминофора усилителя регистрировали с помощью индустриальной CMOS камеры (UI-3242LE, IDS Imaging, Германия).

В качестве образцов были использованы сплавы алюминия системы Al—Mg—Li марки 1420, Al—Mg—Sc марки 1581 и Al—Mg—Mn марки AMg6 в виде пластин толщиной 3 мм. Для экспериментов применяли мощность — 2,7 кВт, диаметр пятна сфокусированного лазерного пучка на поверхности образца — 2 мм. Скорость варьировали в зависимости от типа сплава, чтобы избежать полного проплавления образца. В качестве защитного технологического газа использовали аргон или гелий. Наименования исследуемых образцов и параметры эксперимента приведены в табл. 1. Для каждого типа образцов проводили серию из пяти измерений. В каждом измерении проплавливали трек длиной 10 см. Спектры начинали регистрировать после прохождения первых двух сантиметров пути и установления стационарного режима проплавления. Экспозицию варьировали в диапазоне 10—500 мс в зависимости от уровня сигнала, чтобы обеспечить максимально возможный динамический диапазон. Кадры накапливали в течение 2 с — в результате число зарегистрированных кадров зависело от экспозиции. При обработке каждый спектр получали, усредняя сигнал по 150 строкам изображения и всем измеренным кадрам. Также вычитали фоновый сигнал, измеренный заранее. На текущем этапе нормировка на чувствительность фотокатода ЭОП пока не проводили, поскольку в первую очередь интересовали длины волн спектральных линий, которые можно наблюдать в данном эксперименте.

Таблица 1

Исследуемые образцы

Наименование сплава	Скорость, мм/с	Газ
1420	40	Гелий или аргон
1580	25	Гелий или аргон
AMg6	40	Гелий или аргон

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ультрафиолетовой части спектра для всех образцов и типов технологических газов эмиссионный спектр отсутствовал, за исключением сплава 1420, для которого наблюдались слабые

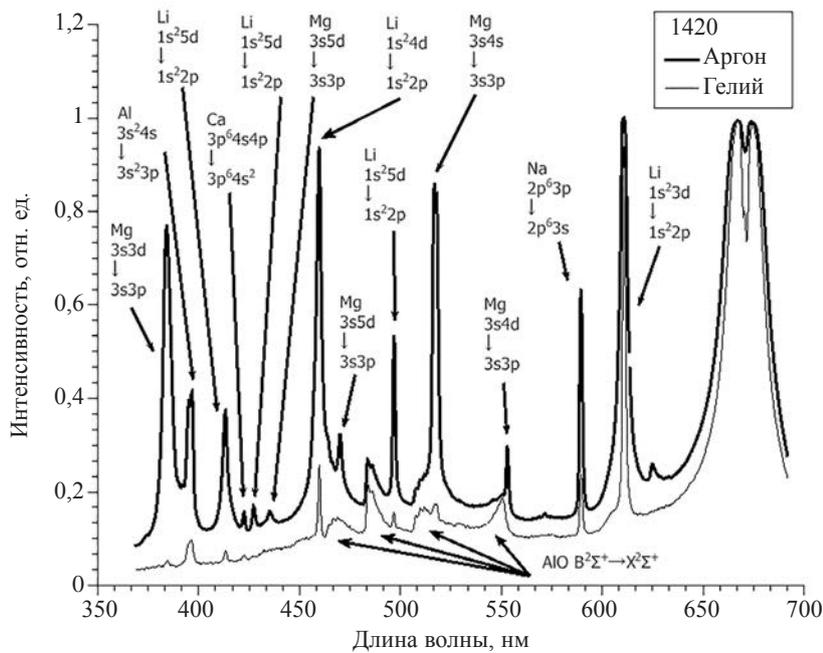


Рис. 2. Нормированные на максимум спектры, измеренные при лазерном воздействии на образцы сплава 1420 при использовании гелия или аргона в качестве защитного технологического газа.

линии. Основная диагностическая информация оказалась сосредоточена в ближней ультрафиолетовой и видимой областях. Результаты измерений спектров различных образцов алюминиевых сплавов представлены на рис. 2, 3 и 4. Спектры нормированы на максимумы интенсивности, чтобы иметь возможность сравнивать их формы. Отношения максимумов ненормированных спектров для различных образцов с использованием различных технологических газов представлены в табл. 2.

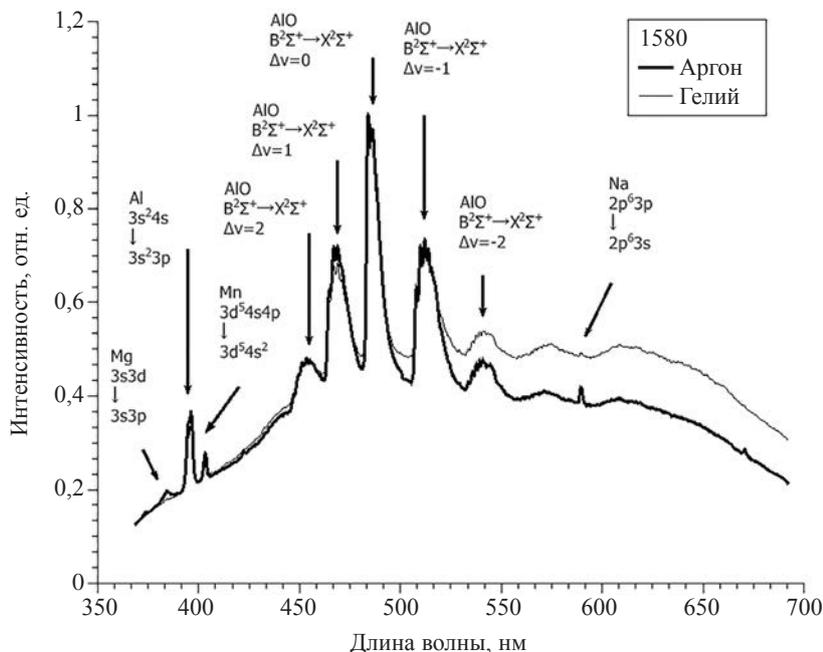


Рис. 3. Нормированные на максимум спектры, измеренные при лазерном воздействии на образцы сплава 1580 при использовании гелия или аргона в качестве защитного технологического газа.

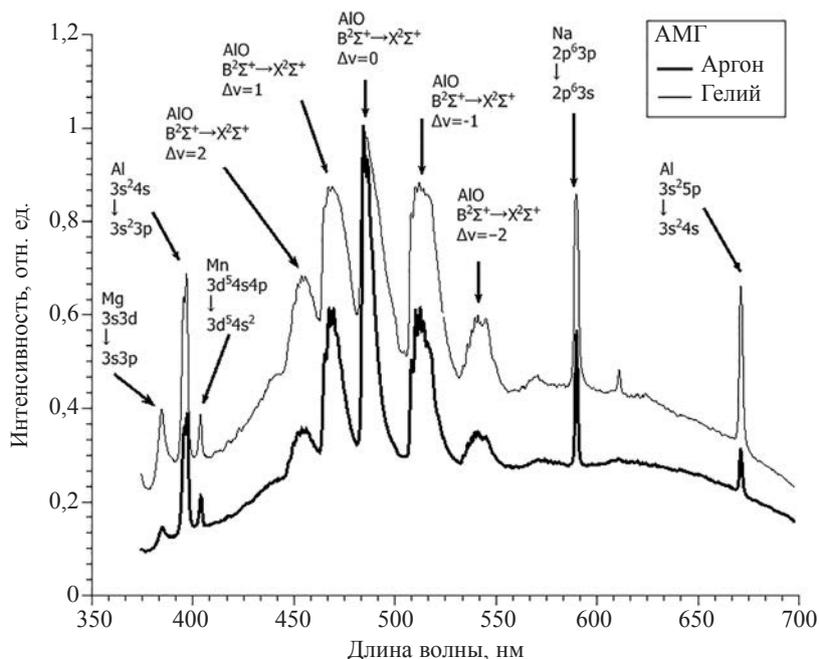


Рис. 4. Нормированные на максимум спектры, измеренные при лазерном воздействии на образцы сплава АМг6 при использовании гелия или аргона в качестве защитного технологического газа.

Все спектры представляют собой комбинацию из сплошного спектра, вызванного тепловым излучением нагретой ванны расплава и испаряющихся газов, и линейчатого спектра, вызванного излучением паров металлов над ванной расплава. Уширение этих линий при температурах, соответствующих данному эксперименту, составило приблизительно 3 нм. Обнаруженные спектральные линии были проанализированы с помощью базы данных атомных спектров [grotrian.nsu.ru](http://grotrian.nsu.ru). Идентифицированные линии, соответствующие им химические элементы и переходы обозначены на рисунках стрелками. При этом в массиве собранных в серии экспериментов данных имеются спектры с различным вкладом различных химических элементов. Спектр мог изменяться в процессе одного прохода лазерного пучка, отражая нестационарность процессов испарения различных химических элементов.

Таблица 2

#### Отношение максимумов интенсивностей в спектрах

Наименование сплава	$(I_{\max})_{\text{Ar}} / (I_{\max})_{\text{He}}$
1420	$4,28 \pm 0,55$
1580	$3,37 \pm 0,88$
АМг6	$14,1 \pm 4,1$

Из табл. 2 и рисунков видно, что использование гелия по сравнению с аргоном как уменьшает общий уровень сигнала для всех типов сплавов, так и вклад отдельных атомов в нормированный спектр. Поскольку влияние прослеживается для всего спектра излучения, оно скорее всего вызвано уменьшением количества излучающего вещества.

Помимо спектральных линий, принадлежащих отдельным атомам в измеренных спектрах, присутствуют и более широкие полосы, принадлежащие электронно-колебательным спектрам. Пять полос, лежащих в области 450—550 нм, соответствуют излучению монооксида алюминия [22], они также обозначены на рисунках. Эти полосы возникают благодаря тому, что на поверхности алюминиевых сплавов находится оксидная пленка, которая разрушается под действием лазерного излучения, что приводит к появлению в факеле монооксида алюминия.

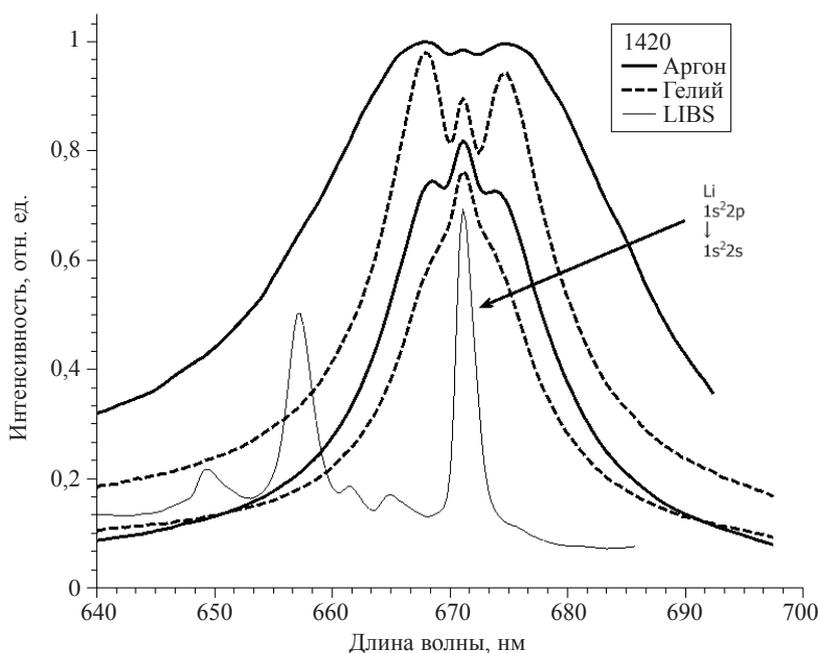


Рис. 5. Фрагмент спектра сплава 1420 для двух различных измерений при воздействии непрерывным излучением волоконного лазера с различными технологическими газами и искровом пробое (LIBS), вызванном импульсным излучением углекислотного лазера.

В спектре алюминиевого сплава 1420, содержащего литий, также присутствует широкая полоса в диапазоне длин волн 650—690 нм. На рис. 5 эта полоса для нескольких различных измерений представлена более подробно. Также для сравнения на этом рисунке представлен спектр, полученный при искровом пробое, вызванном импульсным излучением углекислотного лазера. В последнем случае в спектре отчетливо идентифицируется головная линия главной серии лития. При воздействии непрерывным излучением волоконного лазера эта линия также может присутствовать, однако она симметрично окружена широкими полосами, отстоящими от нее в разных экспериментах на 4—6 нм, ширина этих полос также может варьировать, как и интенсивность, относительно пика атомарного лития, вплоть до полной неразрешимости последнего. Это указывает на возможное молекулярное происхождение этих полос. В такой постановке эксперимента аналогичные полосы наблюдались в работе [21], но они не привлекли внимания исследователей. Свечение в данной области спектра, связанное с наличием лития, было изучено в других условиях, и спектры, соответственно, отличались от зарегистрированных в наших экспериментах, однако, они могут иметь одну природу. Это могут быть электронно-колебательные спектры димеров [23] и кластеров лития [24]; эксимеров, образованных из атомов лития и инертного технологического газа [25]. Можно сделать вывод, что эмиссионная спектроскопия позволяет наблюдать молекулярные процессы, недоступные при использовании лазерной искровой спектроскопии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана экспериментальная установка, позволяющая изучать процесс сварки и наплавки с использованием мощного волоконного лазера методом эмиссионной спектроскопии. Было показано, что для алюминиевых сплавов 1420, 1580 и АМг6 удастся регистрировать спектры газоплазменного шлейфа, возникающего под воздействием лазерного излучения. Эти спектры зависят от режима воздействия излучения и отражают процессы испарения атомов и молекул из ванны расплава. В спектрах газоплазменного шлейфа были зарегистрированы как линии отдельных атомов, так и молекулярные линии. Показано, что в серии экспериментов с одним типом сплава регистрируются спектры с различным вкладом различных химических элементов, что говорит о нестационарности процесса и возможности применения эмиссионной спектроскопии для контроля процесса сварки. А именно, применение гелия в качестве технологического газа по сравнению с аргоном снижает свечение в целом и вклады отдельных элементов в спектр в частности, что говорит о

меньшей потере этих элементов через испарение при воздействии лазерного излучения. Регистрация полос монооксида алюминия позволяет судить о наличии оксидной пленки на поверхности образца и характеризовать процесс ее разрушения под воздействием лазерного излучения. При исследовании сплава, содержащего литий, обнаружены особенности в области длин волн 650—690 нм, природа которых требуют дальнейшего изучения. Это закладывает основу для дальнейших исследований по применению оптической диагностики для контроля качества сварного шва и наплавляемых треков для аддитивных технологий.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021—2023 гг. (код проекта 121030900259-0). В работе использовалось оборудование ЦКП «Механика» ИТПМ СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo Q., Qu M., Chuang C.A., Xiong L., Nabaai A., Young Z.A., Ren Y., Kenesei P., Zhang F., Chen L. Phase transformation dynamics guided alloy development for additive manufacturing // *Addit. Manuf.* 2022. V. 59. Part A. P. 103068.
2. Lednev V.N., Yakovlev A.V., Labutin T.A., Popov A.M., Zorov N. B. Selection of an analytical line for determining lithium in aluminum alloys by laser induced breakdown spectrometry // *J. Anal. Chem.* 2007. V. 62. No. 12. P. 1151—1155.
3. Rai A.K., Yueh F.-Y., Singh J.P. Laser-induced breakdown spectroscopy of molten aluminum alloy // *Appl. Opt.* 2003. V. 42. No. 12. P. 2078—2084.
4. Lednev V.N., Sdvizhenskii P.A., Stavertiy A.Ya., Grishin M.Ya., Tretyakov R.S., Asyutin R.D., Pershin S.M. Online and in situ laser-induced breakdown spectroscopy for laser welding monitoring // *Spectrochim. Acta Part B: At. Spectrosc.* 2021. V. 175. P. 106032.
5. Lednev V.N., Tretyakov R.S., Sdvizhenskii P.A., Grishin M.Ya., Asyutin R.D., Pershin S.M. Laser induced breakdown spectroscopy for in-situ multielemental analysis during additive manufacturing process // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. V. 1109. No. 1. P. 012050.
6. Sabbaghzadeh J., Dadras S., Torkamany M.J. Comparison of pulsed Nd: YAG laser welding qualitative features with plasma plume thermal characteristics // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. V. 40. No. 4. P. 1047—1051.
7. Simonds B.J., Tran B., Williams P.A. In situ monitoring of Cu/Al laser welding using laser induced fluorescence // *Procedia CIRP.* 2020. V. 94. P. 605—609.
8. Cai C., He S., Chen H., Zhang W. The influences of Ar-He shielding gas mixture on welding characteristics of fiber laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy // *Optics & Laser Technology.* 2019. V. 113. P. 37—45.
9. You D.Y., Gao X.D., Katayama S. Review of laser welding monitoring // *Sci. Technol. Weld. Join.* 2014. V. 19. No. 3. P. 181—201.
10. Collur M.M., Debroy T. Emission spectroscopy of plasma during laser welding of AISI 201 stainless steel // *Metall. Mater. Trans. B.* 1989. V. 20. No. 2. P. 277—286.
11. Szymanski Z., Kurzyrna J., Kalita W. The spectroscopy of the plasma plume induced during laser welding of stainless steel and titanium // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1997. V. 30. No. 22. P. 3153—3162.
12. Dai J., Wang X., Yang L., Huang J., Zhang Y., Chen J. Study of plasma in laser welding of magnesium alloy // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014. V. 73. No. 14. P. 443—447.
13. Sibillano T., Rizzi D., Ancona A., Saludes-Rodil S., Rodríguez Nieto J., Chmelíčková H., Šebestová H. Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO<sub>2</sub> Nd:YAG and fiber laser welding processes // *J. Mater. Process. Technol.* 2012. V. 212. No. 4. P. 910—916.
14. Lober R., Mazumder J. Spectroscopic diagnostics of plasma during laser processing of aluminium // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. V. 40. No. 19. P. 5917—5923.
15. Sibillano T., Ancona A., Berardi V., Schingaro E., Basile G., Lugarà P.M. A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083 aluminium alloys by in-process spectroscopic investigation // *Opt. Lasers Eng.* 2006. V. 44. No. 10. P. 1039—1051.
16. Sibillano T., Ancona A., Berardi V., Schingaro E., Parente P., Lugarà P.M. Correlation spectroscopy as a tool for detecting losses of ligand elements in laser welding of aluminium alloys // *Opt. Lasers Eng.* 2006. V. 44. No. 12. P. 1324 — 1335.
17. Song L., Wang C., Mazumder J. Identification of phase transformation using optical emission spectroscopy for direct metal deposition process // *High Power Laser Mater. Process. Lasers, Beam Deliv. Diagnostics, Appl.* 2012. V. 8239. P. 82390G.
18. Palanco S., Klasson M., Skupin J., Hansen K., Schubert E., Sepold G., Laserna J.J. Spectroscopic diagnostics on CW-laser welding plasmas of aluminum alloys // *Spectrochim. Acta Part B: At. Spectrosc.* 2001. V. 56. No. 6. P. 651—659.
19. Gao M., Chen C., Hu M., Guo L., Wang Z., Zeng X. Characteristics of plasma plume in fiber laser welding of aluminum alloy // *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 326. P. 181—186.

20. Zhou L., Zhang M., Jin X., Zhang H., Mao C. Study on the burning loss of magnesium in fiber laser welding of an Al-Mg alloy by optical emission spectroscopy // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. V. 88. P. 1373—1381.
21. Zhang Z., Huang Y., Qin R., Ren W., Wen G. XGBoost-based on-line prediction of seam tensile strength for Al-Li alloy in laser welding: Experiment study and modelling // *J. Manuf. Process.* 2021. V. 64. P. 30—44.
22. Parigger C.G., Hornkohl J.O. Computation of AlO B $2\Sigma^+$  X $2\Sigma^+$  + emission spectra // *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 2011. V. 81. No. 1. P. 404—411.
23. Labazan I., Milošević S. Laser vaporized Li $_2$ , Na $_2$ , K $_2$  and LiNa molecules observed by cavity ring-down spectroscopy // *Phys. Rev. A — At. Mol. Opt. Phys.* 2003. V. 68. P. 032901.
24. Blanc J., Broyer M., Chevaleyre J., Dugourd P., Kühling H., Labastie P., Ulbricht M., Wolf J.P., Wöste L. High resolution spectroscopy of small metal clusters // *Zeitschrift für Phys. D Atoms, Mol. Clust.* 1991. V. 19. No. 4. P. 7—12.
25. Scheps R., Ottinger Ch., York G., Gallagher A. Continuum spectra and potentials of Li-noble gas molecules // *J. Chem. Phys.* 1975. V. 63. No. 6. P. 2581—2590.
-

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

© 2023 г. Р.А. Соколов<sup>1,\*</sup>, К.Р. Муратов<sup>1,\*\*</sup>, В.Ф. Новиков<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38  
E-mail: \*falcon.rs@mail.ru; \*\*muratovkr@tyuiu.ru; \*\*\*vitaly.nowikov2017@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.05.2023; после доработки 19.05.2023  
Принята к публикации 26.05.2023

Рассматриваются результаты практического применения гармонических составляющих, полученных при анализе петли магнитного гистерезиса для определения твердости стали. Определение магнитных характеристик стали, включая петлю магнитного гистерезиса, проводилось при помощи магнитного структуроскопа DIUS-1.15M. При помощи метода учета группового аргумента по величине нечетных гармонических составляющих обнаружен комплексный параметр. Установлены весовые коэффициенты влияния гармонических составляющих на величину комплексного параметра. На примере рассмотрения зависимостей коэрцитивной силы, остаточной индукции и комплексного параметра, полученного методом учета группового аргумента, от твердости материала по Бринеллю показано, что для определения твердости с наименьшей погрешностью возможно использовать комплексный параметр.

*Ключевые слова:* петля магнитного гистерезиса, гармонический спектр, твердость, метод группового учета аргументов, диагностическое пространство признаков.

**DOI:** 10.31857/S0130308223060064, **EDN:** AASNQV

Магнитные характеристики материала достаточно долгое время используются в практических условиях для определения структуры материала, его текущего состояния и его физических свойств [1]. Применение магнитных параметров для определения механических свойств стали и проведения структурного анализа является достаточно изученным направлением, в котором, однако, остаются некоторые особенности, связанные с относительностью применимостью полученных закономерностей к узкому кругу материалов. Такие особенности метода связаны с тем, что используемые магнитные характеристики являются величинами, зависимыми от множества внутренних факторов рассматриваемой системы: структурно-фазового состава, химического состава и т.д.

Для расширения применимости магнитных методов и нахождения эффективных критериев оценки применяют многопараметровый подход, основанный на использовании основных магнитных характеристик вещества, полученных по петле магнитного гистерезиса. Но в таком случае из всего многообразия информации, присущей петле магнитного гистерезиса, используется лишь небольшая часть. Исходя из этого, в предлагаемой работе проведен поиск универсального критерия или параметра, основанного на петле магнитного гистерезиса как носителя многомерной информации о состоянии вещества.

В работе рассматриваются результаты лабораторных исследований конструкционных сталей. Материал образцов находится в состоянии поставки, основные данные об исследуемых образцах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Некоторые характеристики исследуемых образцов сталей

№	Марка стали	HB, кг/мм <sup>2</sup>	H <sub>c</sub> , А/см	B <sub>r</sub> , Тл	Размеры, мм
1	Ст20	141	1,2	0,3	60×60×22
2	Ст45	246	7,5	1,3	70×70×20
3	40X	219	7,1	1,1	65×65×21
4	20X2H4A	216	5,2	0,8	200×85×15
5	Ст3сп	142	5,5	1,0	150×85×8

Измерение твердости проводилось поверенным твердомером Бринелля METOVIEW. Регистрацию петель магнитного гистерезиса выполняли структуроскопом DIUS-1.15M, который

реализует способ измерения петли магнитного гистерезиса в замкнутой магнитной цепи [2]. Извлечение гармонических составляющих из петли магнитного гистерезиса проводилось согласно алгоритму, описанному в работе [3].

Для анализа использованы составляющие фурье-спектра петель магнитного гистерезиса, представленные в псевдореальной форме [4]. При помощи метода учета группового аргумента [5, 6] определен параметр, включающий в себя комплекс гармонических составляющих, который имеет удовлетворительную корреляцию с твердостью материала (рис. 1). Комплексный параметр представляет из себя величину, описываемую полиномиальной функцией:

$$P = k_1 \cdot A_1 + k_2 \cdot A_2 + k_3 \cdot A_3, \quad (1)$$

где  $A_i$  — величина амплитудной составляющей;  $k_i$  — коэффициент влияния соответствующей амплитудной составляющей.

На рис. 1 зависимости основных структурочувствительных параметров ( $H_c$ ,  $B_r$ ), комплексного параметра  $P$  и твердости, полученной по методу Бринелля для исследуемых марок стали.

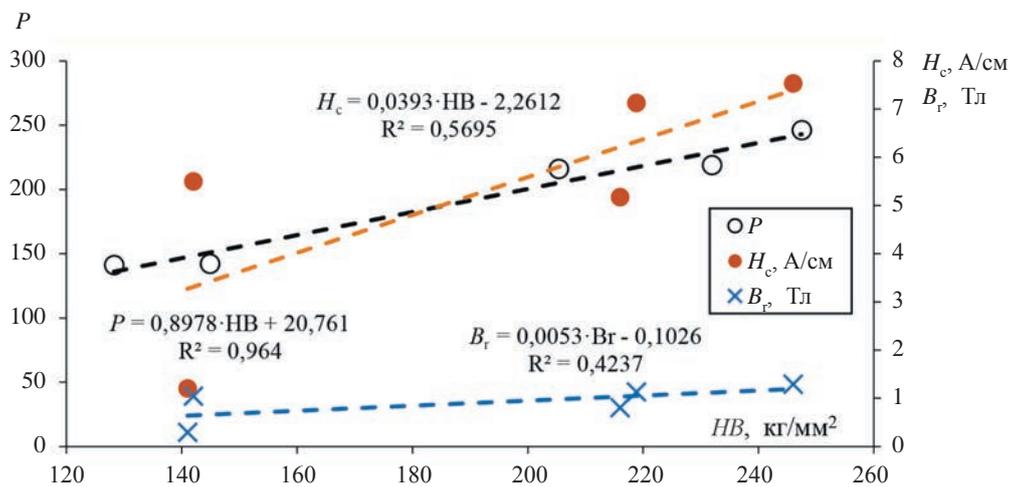


Рис. 1. Связь коэрцитивной силы, остаточной индукции и комплексного параметра с твердостью для различных марок стали.

Из рис. 1 видно, что при описании приведенных зависимостей линейной функцией наибольший коэффициент детерминации  $R^2 = 0,96$  наблюдается у зависимости  $P(HB)$ . Для зависимости  $H_c(HB)$  —  $R^2 = 0,57$ ,  $B_r(HB)$  —  $R^2 = 0,42$ . Разброс определяемых значений при этом для  $H_c = \pm 33,96\%$ ,  $B_r = \pm 35,64\%$ ,  $P = \pm 5,77\%$ .

## ВЫВОДЫ

Согласно полученным данным установлено, что для твердости и комплексного параметра, полученного при помощи метода учета группового аргумента на основе гармонических составляющих, наблюдается удовлетворительная корреляция с твердостью для исследуемых марок сталей, находящихся в состоянии поставки. Обнаруженная зависимость, описывающая изменение  $P$  от  $HB$ , имеет коэффициент детерминации  $R^2 = 0,96$ , что почти в два раза выше, чем у зависимости  $H_c$  от  $HB$  и  $B_r$  от  $HB$ . Кроме того, разброс получаемых данных по обнаруженным зависимостям позволяет говорить о том, что наименьшая погрешность в определении зависимой величины наблюдается у зависимости  $P$  от  $HB$  и составляет  $\pm 5,77\%$ , что почти в 7 раз меньше, чем у зависимости  $H_c$  от  $HB$  и  $B_r$  от  $HB$ . Полученные данные показывают, что использование комплексного параметра на основе гармонических составляющих, полученного методом группового учета аргументов, дает возможность оценить величину твердости материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Костин В.Н., Муриков С.А., Муриков Е.С. Коэрцитиметрический контроль качества стальных деталей. Уральская школа коэрцитиметрии // В мире неразрушающего контроля. 2015. Т. 18. № 4. С. 9—13.
2. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.
3. Соколов Р.А., Новиков В.Ф., Муратов К.Р. Патент № 2777695 С1 Российская Федерация, МПК G01N 17/00. Способ оценки стойкости сталей и сплавов к коррозии. № 2021132922. Заявл. 12.11.2021. Оpubл. 08.08.2022.
4. Sokolov R., Novikov V., Muratov K. Application of magnetic hysteresis loop for analysis of corrosion properties of steel // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2313. P. 060017.
5. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Сравнительный анализ методов регрессии и метода группового учета аргументов при моделировании процессов переработки полезных ископаемых // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 4. С. 23—34.
6. Аузин А.А., Муравина О.М. Статистический анализ данных каротажа методом группового учета аргументов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2010. № 2. С. 219—224.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОРОС-333

© 2023 г. А.И. Сурдо<sup>1,\*</sup>, Р.М. Абашев<sup>1,\*\*</sup>, В.С. Красноперов<sup>2,\*\*\*</sup>, И.И. Мильман<sup>1,\*\*\*\*</sup>,  
Е.В. Моисейкин<sup>3,\*\*\*\*\*</sup>, А.И. Бояринцев<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Россия 620077 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

<sup>2</sup>АО «Уральский электромеханический завод», Россия 620000 Екатеринбург, ул. Студенческая, 9

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: \*surdo@imp.uran.ru; \*\*abashevrm@imp.uran.ru; \*\*\*krasnoперov@uemz.ru; \*\*\*\*milman@imp.uran.ru;  
\*\*\*\*\*e.v.moiseykin@urfu.ru; \*\*\*\*\*a.i.boyarincev@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023; после доработки 19.05.2023

Принята к публикации 26.05.2023

Сравнены российские и зарубежные термолюминесцентные (ТЛ) системы индивидуального дозиметрического контроля, применяемые в атомной отрасли и в радиационном контроле, указаны их ограничения. Описана новая автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля КОРОС-333, использующая эффект оптически стимулированной люминесценции, превосходящая по многим параметрам ТЛ-аналоги и предназначенная для измерения индивидуальных эквивалентов доз облучения всего тела, хрусталика глаза и кожных покровов.

*Ключевые слова:* индивидуальный дозиметрический контроль, дозиметрическая система, КОРОС-333, оптически стимулированная люминесценция, индивидуальный эквивалент дозы.

DOI: 10.31857/S0130308223060076, EDN: AATJOF

### ВВЕДЕНИЕ

Производимые в России термолюминесцентные (ТЛ) системы индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) типа АКИДК-304, ДОЗА-ТЛД, ДТУ-01М имеют недостаточную производительность в сравнении с зарубежными аналогами из-за ручной загрузки детекторов или карточек с детекторами [1—3]. Поэтому на крупных предприятиях атомно-промышленного комплекса со значительным (более 500 чел.) количеством персонала групп А и Б (АЭС, производства по переработке ядерного топлива) приобретают ТЛ-системы зарубежного производства с автоматизированной подачей до 200 дозиметров или карточек из их состава. К ним можно отнести ТЛ-системы типа RE2000 и Harshaw 6600 [4]. Однако приобретение, эксплуатация, обслуживание и ремонт зарубежных автоматизированных систем ИДК (АСИДК) осложнены из-за вводимых западных санкций. Более того, у перечисленных АСИДК энергетические, дозовые диапазоны и диапазоны погрешностей не вполне удовлетворяют требованиям норм радиационной безопасности НРБ-99/2009 и отраслевым стандартам, например Росэнергоатома, СТО 1.1.1.01.001.0877-2020 [5, 6]. Кроме того, в составе большинства АСИДК отсутствуют кожные дозиметры с требуемой НРБ-99/2009 толщиной чувствительного слоя детекторов, равной 5 мг/см<sup>2</sup>.

Поэтому целью работы являлось создание новой отечественной АСИДК с использованием современного и наиболее производительного метода считывания дозиметрической информации, основанного на эффекте оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ).

### ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КОРОС-333

Специалистами Института физики металлов УрО РАН, АО «Уральский электромеханический завод» и Уральского федерального университета закончено в 2022 г. создание нового наукоемкого и высокотехнологичного продукта — АСИДК КОРОС-333. Для считывания дозиметрической информации в КОРОС-333 впервые в России использован эффект оптически стимулированной люминесценции, что позволяет в 5-10 раз увеличить скорость считывания, снизить в несколько раз энергопотребление и материалоемкость. АСИДК КОРОС-333 состоит из ОСЛ-считывателя со встроенным промышленным компьютером, комплекта дозиметров, специализированного программного обеспечения и стирающего устройства. Стирающее устройство предназначено для обнуления дозиметрической информации, накопленной в индивидуальных дози-

метрах при хранении, а также оставшейся после считывания и представляет собой две светодиодные панели, соединенные как книжка. Время обнуления при дозе облучения 1 мЗв составляет не более 4 ч.

В считыватели системы КОРОС-333 непосредственно загружаются дозиметры, а не карточки с детекторами, как в большинстве подобных ТЛ-систем. Время измерения одного дозиметра составляет в среднем  $\sim 10$  с. Пока сертифицирована система, в составе которой имеется считыватель с ручной загрузкой дозиметров (рис. 1а), но уже разрабатываются его варианты с автоматической загрузкой от 100 до 500 дозиметров. В соответствии с НРБ-99/2009 АСИДК КОРОС-333 комплектуется дозиметрами для измерения индивидуальных эквивалентов доз (ИЭД) облучения всего тела  $\text{Hr}(10)$ , хрусталика глаза  $\text{Hr}(3)$  и кожных покровов  $\text{Hr}(0.07)$ . Их использование возможно в полях бета- и фотонных ионизирующих излучений и в широких дозовых и энергетических диапазонах:

- диапазон измерений ИЭД  $\text{Hr}(10)$ :  $10^{-5}$  — 10 Зв;
- диапазон измерений ИЭД  $\text{Hr}(3)$  в полях фотонного и бета-излучений:  $10^{-5}$  — 10 Зв;
- диапазон измерений ИЭД  $\text{Hr}(0,07)$  в полях фотонного и бета-излучений:  $10^{-4}$  — 10 Зв;
- диапазон энергий регистрируемого фотонного излучения: 0,015 — 10,0 МэВ;
- диапазон энергий регистрируемого бета-излучения: 0,06 — 2,2 МэВ.



Рис. 1. Общий вид ОСЛ-считывателя КОРОС-333 (а) и его структурная схема (б).

Структурная схема ОСЛ-считывателя приведена на рис. 1б. Управление процессом измерения, контроль чувствительности и диагностика измерительного тракта, диагностика исправности оптического стимулятора и обмен информацией со встроенным компьютером осуществляется при помощи микроконтроллера. Внешняя управляющая программа обеспечивает обработку результатов измерения, расчет ИЭД в зависимости от характеристик и типа излучения, которым были облучены дозиметры, перенос значений ИЭД в базу данных, автоматический экспорт полученных данных во внешние файлы и калибровку считывателя. База данных о дозиметрах, включающая информацию о калибровке и результатах измерений, хранится во встроенном компьютере.

## ВЫВОДЫ

АСИДК КОРОС-333 утверждена приказом Росстандарта от 18.10.2022 № 2613 в качестве типа средства измерения и зарегистрирована в Госреестре средств измерений под № 87141-22 и в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений в области использования атомной энергии. Метрологические параметры АСИДК КОРОС-333 полностью удовлетворяют требованиям норм радиационной безопасности НРБ-99/2009 и расширенным требованиям отраслевых стандартов, в частности Росэнергоатома СТО 1.1.1.01.001.0877-2020.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Описание типа средства измерений «Комплексы автоматизированные индивидуального дозиметрического контроля АКЖДК-304» № 87562-22. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».
  2. Описание типа средства измерений «Комплексы дозиметрические термолюминесцентные «ДОЗА-ТЛД»» № 48025/1. ГЦИ СИ ФБУ «ЦСМ Московской области», Центральное отделение.
  3. Описание типа средства измерений «Системы термолюминесцентные дозиметрические ДТУ-01М» № 63964. Санкт-Петербург: ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».
  4. Описание типа средства измерений «Системы термолюминесцентные дозиметрические автоматизированные Harshaw 6600, 6600 LITE, 6600 PLUS» № 42135. Санкт-Петербург: ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».
  5. СТО 1.1.1.01.001.0877-2020. Автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля атомных электростанций. Технические требования. 2020.
  6. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ99/2009. Санитарные правила и нормы. М.: Роспотребнадзор, 2009. С. 100.
-

## ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА

**В июне 2023 года исполняется 75 лет известному специалисту  
в области акустико-эмиссионного контроля и диагностики  
доктору физико-математических наук  
Сергею Ивановичу БУЙЛО**

В 1972 г. Сергей Иванович окончил физический факультет Ростовского государственного (ныне Южного федерального) университета. С 1983 года работает заведующим лабораторией акустической эмиссии. С 1990 по 2013 г. — руководитель отдела акустики твердого тела НИИ механики и прикладной математики Ростовского госуниверситета. С 2014 г. является ведущим, затем главным научным сотрудником Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета.

Круг научных интересов доктора физ.-мат. наук С.И. Буйло составляют физико-механические, статистические и химические аспекты явления акустической эмиссии и его применение для диагностики предразрушающего состояния твердых тел, а также методы оценки и повышения достоверности результатов АЭ-диагностики.

С.И. Буйло создал теорию и разработал методику восстановления истинных (излученных) параметров потока актов (событий) акустической эмиссии по регистрируемым сигналам, теорию и методы диагностики стадий разрушения по параметрам сопутствующего акустического излучения с оценкой достоверности результатов. Сергей Иванович предложил применение методов случайных потоков к явлению АЭ и разработал метод диагностики предразрушающего состояния по отклонению соотношений параметров АЭ от их устойчивых (инвариантных) значений.

Является одним из разработчиков ГОСТа 27655—88 «Акустическая эмиссия». С 1991 по 1997 гг. был научным руководителем раздела «Теоретические основы и экспериментальные методы комплексной диагностики предразрушающего состояния материалов и конструкций» Межвузовской научно-технической Программы «Фундаментальные и прикладные проблемы механики деформируемых сред и конструкций». Член Редакционного совета журнала Электроника и Электротехника. Член Объединенного Экспертного Совета по акустической эмиссии (ОЭС АЭ).

Вместе со своими сотрудниками Сергей Иванович диагностировал прочность Царь-колокола в Московском Кремле, ряда других изделий и объектов атомного энергетического машиностро-



ения, авиационной и ракетно-космической техники. Результаты исследований и разработок С.И. Буйло нашли применение при создании новых методов диагностики титановых лопаток турбин авиационных двигателей, а также теплозащиты первого отечественного многоразового космического орбитального корабля «Буран».

За цикл работ по развитию метода акустико-эмиссионной диагностики С. И. Буйло включен в Международный справочник «Кто Есть Кто в Мире» (США) и в Справочник Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике: «Неразрушающий контроль. Россия. 1900—2000 гг.». За разработку и внедрение метода АЭ-диагностики был награжден медалью ВДНХ, а в 2000 г. — Почетной грамотой Минобразования Российской Федерации. В 2011 г. «за заслуги перед космонавтикой» С.И. Буйло был награжден медалью им. С. П. Королева. В 2015 г. награжден медалью «За заслуги перед Южным федеральным университетом».

С.И. Буйло — член Научных программных комитетов шести Международных конференций: «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA). Был членом Оргкомитетов I-й Всесоюзной конференции «Акустическая эмиссия» (1984 г. Ростов-на-Дону) и I-й Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2018) в 2018 г. (Тольятти).

Доктор физ.-мат. наук С.И. Буйло является автором более 20 публицистических статей и почти 300 научных работ, 42 из которых опубликованы в журнале Дефектоскопия Российской академии наук, а также четырех патентов СССР и двух патентов РФ. Индекс Хирша — 17 (РИНЦ); 7 (Scopus); 7 (Web of Science).

Помимо своей профессиональной деятельности много внимания уделяет публицистике и исследованию малоизвестных страниц истории ВОВ.

От всего сердца пожелаем юбиляру здоровья, неиссякаемой энергии и новых успехов в творческой деятельности.

Редколлегия