



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

# Дефектоскопия



*Неразрушающий контроль*

*Техническая диагностика*

*Анализ материалов*

**№ 10**

**2024**



**НАУКА**

— 1727 —

**ДЕФЕКТОСКОПИЯ**

Журнал ежемесячный  
 Основан в феврале 1965 года  
 Екатеринбург

№ 10  
 2024

**СОДЕРЖАНИЕ****Акустические методы**

**Л.Ю. Могильнер, Я.Г. Смородинский, В.В. Тишкин.** Использование объемных отражателей для настройки параметров ультразвукового контроля ..... 3

**Электромагнитные методы**

**С.А. Бобуёк, А.П. Суржиков, Е.В. Николаев, А.В. Малышев, Е.Н. Лысенко.** Сравнительный анализ экспериментальных методов определения температуры Кюри ферритовых материалов ..... 16

**Радиационные методы**

**А.О. Хурчиев, Р.О. Гаврилин, А.В. Скобляков, А.В. Канцырев, А.А. Голубев, В.Б. Минцев, Д.Н. Николаев, Н.С. Шилкин, Р.С. Беликов.** Измерение вязкости расплава серы методом протонной микроскопии ..... 28

**Сяоя Ян, Жишуай Чжэн, Хуаньци Чжэн, Сяопин Лю.** Метод глубокого обучения для задачи классификации изображений древесины, полученных с помощью микротомографии ..... 36

**Тепловые методы**

**Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев, В.А. Перминов.** Инфракрасная термографическая диагностика огнестойкости древесины в условиях комбинированного теплового воздействия фронта низового пожара и горящих и тлеющих частиц ..... 51

**Юбинь Чжан, Чангханг Сюй, Пэнцянью Лю, Руи Лю, Цин Чжао, Лонгбо Ванг, Цзин Се.** Экспериментальные исследования по контролю трещин на резьбовых поверхностях методом электромагнитной термографии ..... 59

Информация ..... 72



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

© 2024 г. Л.Ю. Могильнер<sup>1,2,\*</sup>, Я.Г. Смородинский<sup>3,\*\*</sup>, В.В. Тишкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное учреждение  
«Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана»  
(ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана»), Россия 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия 105005 Москва,  
Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

<sup>3</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург,  
ул. Софьи Ковалевской, 18

E-mail: \*mogilner@mail.ru, mogilner@bmstu.ru

\*\*sm@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 28.08.2024; после доработки 18.09.2024

Принята к публикации 20.09.2024

В ультразвуковой дефектоскопии для настройки и проверки параметров оборудования традиционно используются боковые цилиндрические сверления. Другие объемные отражатели, например, вертикальные сверления или сферические поры, применяются редко. В настоящей статье отмечено, что объемные отражатели различных типов удобны для использования в качестве модели внутренних и выходящих на поверхность дефектов сварных швов. Тем более, что сверления различной ориентации просты в изготовлении. Долгое время ограничения применения сверлений для моделирования в ультразвуковой дефектоскопии были связаны с шумами, возникающими за счет дифракционных эффектов обегания цилиндрических полостей упругими волнами. Отмечено, что в настоящее время эти эффекты хорошо изучены. Их можно использовать для идентификации типа дефектов и измерения их размеров. В статье описаны результаты экспериментов по наблюдению рассеяния на цилиндрах и сферах продольных волн и поперечных волн с различной поляризацией, приведены характерные примеры проявления и использования указанных дифракционных эффектов. Также отмечена целесообразность использования не только сверлений, но и сферических пор. Эксперименты с рассеянием ультразвуковых волн на порах для наглядности выполнены на образцах из светопрозрачного стекла. Приведены сравнительные данные, показывающие, как дифракционные эффекты проявляются на различных объемных полостях. В том числе отмечено, что имеет место фокусировка сигналов, огибающих сферические поры. Отмечены ограничения на длительность импульсов ультразвуковых волн, при которых дифракционные сигналы можно использовать для повышения информативности при выявлении дефектов. Рекомендовано расширить применение боковых сверлений диаметром 2 мм в образцах для настройки чувствительности при ультразвуковом контроле эхометодом.

*Ключевые слова:* промышленность и инновации, ультразвуковая дефектоскопия, дифракционные эффекты, сварные швы, объемные дефекты, цилиндр, сфера, поры, фокусировка ультразвука.

## VOLUMETRIC REFLECTORS USING FOR ADJUSTING ULTRASONIC TESTING PARAMETERS

© 2024 L.Yu. Mogilner<sup>1,2,\*</sup>, Ya.G. Smorodinsky<sup>3,\*\*</sup>, V.V. Tishkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>«Welding and Testing» of MSTU n.a. Bauman), Russia 105005 Moscow, Baumanskaya 2nd str., 5 building 1

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Russia 105005 Moscow, Baumanskaya 2nd str., 5 building 1

<sup>3</sup>M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108  
Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Str., 18

E-mail: \*mogilner@mail.ru, mogilner@bmstu.ru

\*\*sm@imp.uran.ru

In ultrasonic flaw detection, lateral cylindrical drillings are traditionally used to adjust and check the parameters of equipment. Other volumetric reflectors, such as vertical drillings or spherical pores, are rarely used. This article notes that such models of internal and surface defects of welded seams are convenient to use and easy to manufacture. For a long time, a limitation to the use of drillings for modeling in ultrasonic flaw detection was the use of these effects not only on defect models in the form of noise associated with the diffraction effects of elastic waves running around cylindrical cavities. It is noted that these effects are currently well studied and are used to identify the type of defects and measure their sizes. Based on the results of experiments on observing the scattering of longitudinal waves and transverse waves with different polarization on cylinders and spheres, typical examples of the manifestation and use of these diffraction effects are given. The expediency of using not only drillings, but also spherical pores is noted. Experiments of the ultrasonic waves scattering on pores are performed on transparent glass samples for clarity. Comparative data on the manifestation of diffraction effects on various volume cavities are presented. In particular, it is noted that there is a

focusing of signals enveloping spherical pores. Limitations on the duration of ultrasonic wave pulses are noted, at which diffraction signals can be used to increase the information content when detecting defects. It is recommended to expand the use of 2 mm diameter side drillings in samples to adjust sensitivity during ultrasonic testing using the echo method.

*Keywords:* industry and innovation, ultrasonic flaw detection, diffraction effects, welds, volume defects, cylinder, sphere, pores, ultrasound focusing.

DOI: 10.31857/S0130308224100014

## ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Объемные искусственные отражатели в различных образцах — удобные модели дефектов. Например, если применять для настройки параметров ультразвукового контроля реальные поры в прозрачном стекле, то это дало бы возможность визуально контролировать форму и размеры отражателя, находящегося в объеме материала, и соотносить их с параметрами ультразвукового контроля. К сожалению, такой способ моделирования в ультразвуковой (УЗ) дефектоскопии практически не применяется.

Более традиционным является использование цилиндрических сверлений диаметром от 1 мм с различной ориентацией и глубиной [1]. Они имитируют объемные протяженные дефекты типа канальных пор и вертикальных свищей в сварных швах. Сверление легко изготовить как в лаборатории, так и в полевых условиях проведения работ по ультразвуковой (УЗ) дефектоскопии. Также относительно просто контролировать чистоту его поверхности и метрологические характеристики — диаметр, ориентацию оси. Боковые цилиндрические отражатели (БЦО) традиционно используются, например, в образцах типа СО-2 и V2 по стандартам [2, 3], а также при настройке параметров УЗ контроля дифракционно-временным методом (TOFD). Однако в отечественной практике долгое время, по крайней мере до 2010 годов, существовали жесткие ограничения на настройку чувствительности УЗ контроля по БЦО. В частности, как известно, в образцах СО-2 для этой цели предназначено только сверление диаметром 6 мм с осью на глубине 44 мм от поверхности (15 мм от противоположной поверхности), но имеющиеся в этом же образце два сверления диаметром 2 мм на глубине 3 и 8 мм для настройки по амплитудному признаку не используются. Между тем, по этим сверлениям было бы удобно выполнять временную регулировку чувствительности при контроле сварных швов малой толщины, ориентировочно — до 10 мм.

Причина ограниченного использования сверлений малого диаметра заключается в том, что еще в 60-е годы 20-го века на основании строгого расчета рассеяния поперечной волны на цилиндрической полости было установлено, что амплитуда сигнала, рассеянного на БЦО, может осциллировать с ростом его диаметра [4, 5]. В диапазоне диаметров БЦО от 0,1 до 1 мм на частоте 5 МГц или в диапазоне от 0,5 до 5 мм на частоте 1 МГц размах этих осцилляций может составлять 6 дБ, постепенно уменьшаясь с ростом диаметра сверления. К сожалению, в те годы причина появления осцилляций не была проанализирована. Сегодня известно, что они возникают, если происходит интерференция волн, зеркально отраженных от поверхности цилиндрической полости, и дифрагированных волн, обтекающих ее. Амплитуда сигнала, порождаемого каждой из этих волн, изменяется с ростом диаметра цилиндра монотонно: растет для первой и убывает для второй. Однако эти сигналы приходят на приемник со сдвигом фаз, который меняется при изменении диаметра цилиндра. Поэтому в случае, если приемник одновременно регистрирует поступление обоих сигналов, то действительно могут возникать осцилляции амплитуды результирующего сигнала при монотонном изменении диаметра цилиндра. Если же излучаемый ультразвуковой импульс настолько короткий, что на приемнике указанные сигналы разрешаются во времени, то они регистрируются независимо друг от друга, и каждый из них можно в полной мере анализировать и использовать по отдельности.

В настоящее время эти особенности формирования рассеяния упругих волн на цилиндрической полости хорошо известны. В частности, раздельный прием сигналов, рассеянных на разных участках дефекта, используется в дифракционных методах УЗ контроля [6—9]. Однако даже один из основателей теории УЗ дефектоскопии профессор Игорь Николаевич Ермолов до конца своей активной деятельности сомневался в наличии или отсутствии осцилляций, а главное — в причинах их появления (см. «Дефектоскопические истории» в [10]). Обсуждение вопроса об «осцилляциях» и раздельном приеме сигналов по-прежнему периодически поднимается в специальной литературе (см., например, [11—13]).

В вопросе о сигналах, дифрагированных на объемных отражателях, действительно по-прежнему есть предмет для обсуждения, но не в связи с самим фактом наличия или отсутствия осцилляций амплитуды, а в связи с ограничениями в использовании этих сигналов для определения параметров дефектов. Например, это относится к упомянутым сверлениям диаметром 2 мм в СО-2 в стандарте [2], а также к рекомендациям по применению БЦО в TOFD

[8] и к применению объемных отражателей для настройки в эхометре [14]. Далее поясним это на нескольких примерах.

### СФЕРИЧЕСКИЕ ПОРЫ

Вначале рассмотрим пример рассеяния на сферических порах, который не очень часто встречается в литературе по ультразвуковой дефектоскопии. На рис. 1 иллюстрируется прозвучивание образца из оптического стекла марки К108 толщиной 61,5 мм с четырьмя газовыми порами диаметром 2,0; 1,0; 1,0; 0,8 мм. Диаметры пор оценены визуально с погрешностью  $\pm 0,1$  мм. Рассмотренные поры имеют естественное происхождение. Они возникли случайным образом при изготовлении стекла, предназначенного для оптических приборов. Образец, описанный на рис. 1, был забракован по результатам визуального контроля для использования по основному назначению, однако оказался очень полезным в целях проведения экспериментов, описанных в настоящей статье.

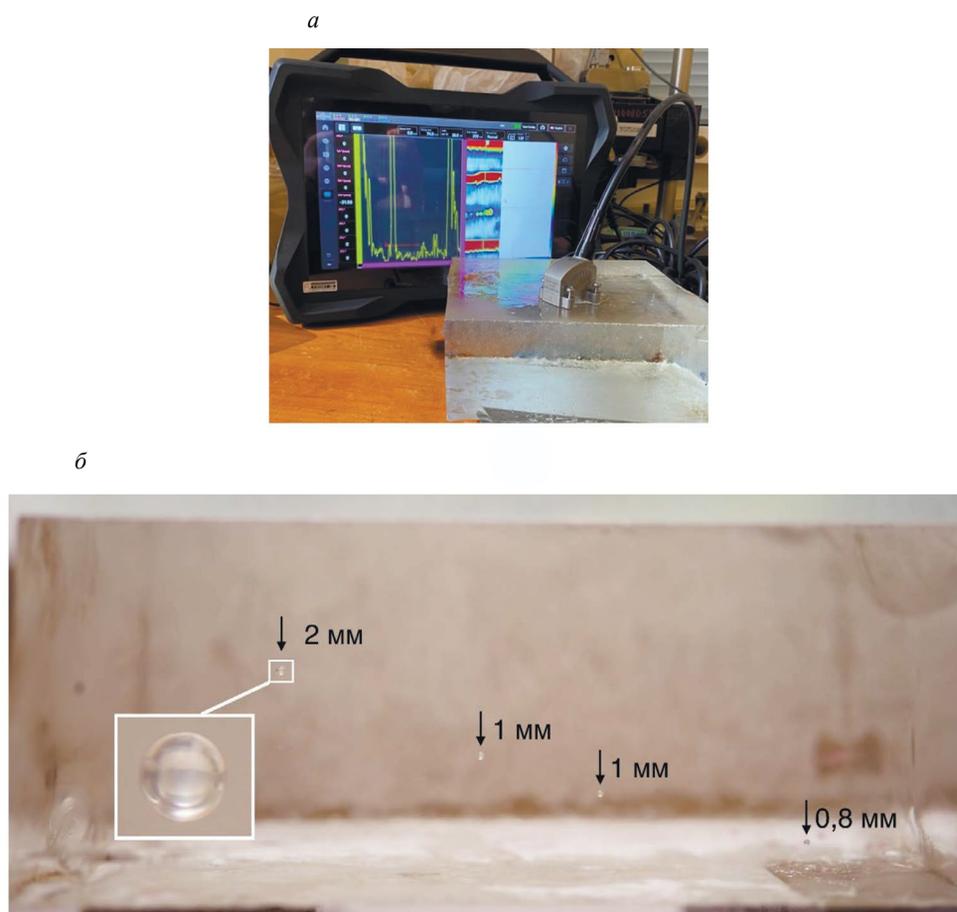


Рис. 1. Блок толщиной 61,5 мм из стекла с порами: общий вид при измерениях (а); фотография пор с торца образца (б).

Для выполнения измерений использовался ультразвуковой дефектоскоп общего назначения в комплекте с совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП): прямыми на продольные волны, прямыми и наклонными — на поперечные. В последних двух случаях результаты однотипные, поэтому ниже на рис. 2 приведены А-сканы сигналов из образца, полученных только прямыми ПЭП.

**Примечание.** На рис. 2 и 3 в конце развертки также показаны донные сигналы. Их амплитуда существенно превышает амплитуду сигналов от пор: на 35 дБ и более для продольной волны, на 40 дБ и более — для поперечной. Поэтому для выявления пор потребовалось завышать чувствительность, и при использовании поперечных волн на А-сканах могли появляться различные трансформированные сигналы. Эти сигналы удалены с рис. 3 для упрощения представления и анализа информации.

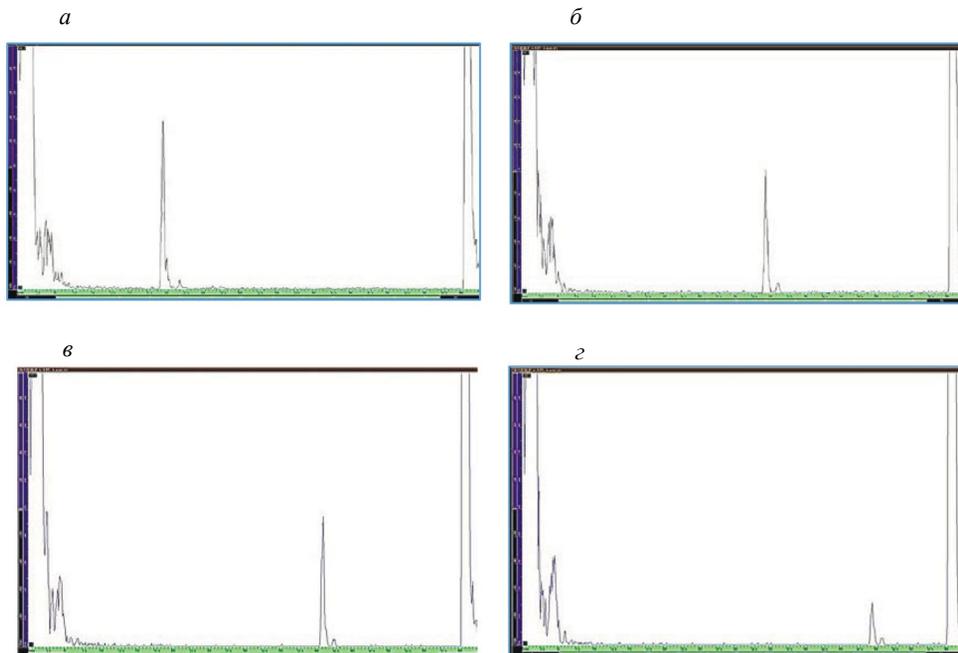


Рис. 2. А-сканы при выявлении в блоке из стекла продольными волнами пор диаметром: 2 мм (*а*); 1,0 мм (*б*); 1,0 мм (*в*); 0,8 мм (*г*).

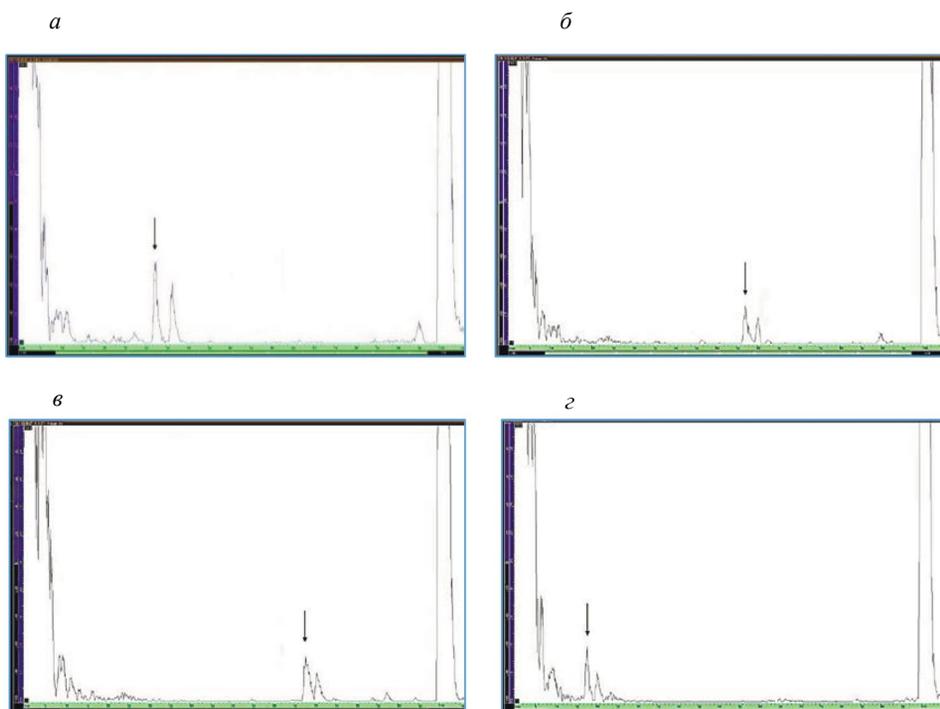


Рис. 3. А-сканы при выявлении в блоке из стекла поперечными волнами пор диаметром: 2 мм (*а*); 1,0 мм (*б*); 1,0 мм (*в*); 0,8 мм (*г*) (для поры  $\varnothing 0,8$  мм — измерения в направлении против стрелки на рис. 1б).

Измеренная скорость продольных  $c_L$  и поперечных  $c_S$  волн в использованном образце из стекла составила  $5,72 \times 10^3$  и  $3,67 \times 10^3$  м/с соответственно, т.е.  $c_S / c_L = 0,64$ . Исходя из этого, с учетом времени приема сигналов, расположения ПЭП и динамики изменения сигналов при сканировании по поверхности образца сделан однозначный вывод о том, что это — сигналы от пор. Необходимо отметить, что при прозвучивании поперечной волной в направлении стрелки на рис. 1б, пора диаметром 0,8 мм практически не выявлялась — сигналы затухали при рас-

Таблица 1

## Сравнение амплитуд и времени приема сигналов, различного при рассеянии на сфере продольных и поперечных волн

Диаметр поры $D$ , мм		2,0	1,0	1,0	0,8
<b>Продольная волна, частота 10 МГц</b>					
Оценка отношения амплитуд, $A_{\text{диф}}/A_{\text{зер}}$	Эксперимент	0,04	0,07	0,08	0,08
	Расчет	0,1—0,05	0,1—0,05	0,1—0,05	0,1—0,05
Оценка задержки $\Delta t_L$ , мкс	Эксперимент	0,7	0,6	0,5	0,5
	Расчет	0,9	0,5	0,5	0,4
<b>Поперечная волна, частота 5 МГц</b>					
Оценка отношения амплитуд, $A_{\text{диф}}/A_{\text{зер}}$	Эксперимент	0,6	0,6	0,6	0,6
	Расчет	0,35—0,6	0,35—0,6	0,35—0,6	0,35—0,6
Оценка задержки $\Delta t_S$ , мкс	Эксперимент	1,3	1,1	1,0	0,8
	Расчет	1,4	0,8	0,8	0,4
<b>Поперечная волна, частота 2,25 МГц</b>					
Оценка отношения амплитуд, $A_{\text{диф}}/A_{\text{зер}}$	Эксперимент	0,5	0,6	0,6	—
	Расчет	0,35—0,6	0,35—0,6	0,35—0,6	0,35—0,6
Оценка задержки $\Delta t_S$ , мкс	Эксперимент	1,2	1,0	0,7	—
	Расчет	1,4	0,8	0,8	—

стоянии 50,5 мм от поверхности образца. Поэтому на рис. 3г приведен А-скан сигнала, полученный от этой поры с расстояния 11,0 мм от ближней к ней поверхности образца, т.е. против стрелки на рис. 1б. В результате, сигнал от этой поры на развертке находится ближе к зондирующему импульсу, чем сигналы от других пор (см. стрелки на рис. 3).

Результаты получены на частотах 10 МГц для продольной волны, 5 МГц — для поперечной. При этом волновые размеры пор для волн разного типа близки (см. отношение  $c_S/c_L$ ), что облегчает сравнение результатов. Дополнительно выполнены измерения поперечной волной на частоте 2,25 МГц. Результаты в целом — аналогичные, однако здесь не приведены, т.к. на этой частоте уровень помех превышал уровень сигналов от поры минимального диаметра 0,8 мм.

На рис. 2 и рис. 3 видно, что все А-сканы от всех пор — двойные: вслед за более или менее мощным первым сигналом с амплитудой  $A_{\text{зер}}$  фиксируется второй с меньшей амплитудой  $A_{\text{диф}}$ . В табл. 1 приведены измеренные величины отношения амплитуд сигналов  $A_{\text{диф}}/A_{\text{зер}}$  и интервалы времени между ними  $\Delta t = t_{\text{диф}} - t_{\text{зер}}$ , при этом результаты округлены с учетом фактической точности измерений амплитуд в процентах от высоты экрана и временных интервалов — до 0,1 мкс. Видно, что в пределах точности измерений отношение амплитуд каждой пары сигналов, принимаемых от одной поры, мало изменяется при изменении диаметра поры, а запаздывание второго сигнала относительно первого примерно пропорционально диаметру (радиусу) поры  $D = 2b$ .

Объяснение такой структуры откликов от пор заключается в том, что в каждой паре сигналов первый создается волной, зеркально отраженной от поверхности поры, а второй — дифрагированной волной, обогнувшей пору. Механизм возбуждения дифрагированных сигналов достаточно хорошо известен. В теоретическом плане он изучен, например, в работах [15, 16], а в приложении к ультразвуковой дефектоскопии — в [17, 18]. Этот механизм аналогичен возбуждению дифрагированных сигналов при рассеянии на цилиндрической полости (сверлении), детально рассмотренный в работах [6, 17—20], а также с учетом возможностей современной аппаратуры — в [9]. Установлено, что волна, касающаяся гладкой вогнутой в материал поверхности полости, возбуждает на этой поверхности неоднородные волны, которые, распространяясь вдоль полости, в каждой ее точке переизлучают в объем. Именно это переизлучение создает сигналы, огибающие объемные полости. Показано, что в упругих средах на практике можно обнаружить такие неоднородные волны трех типов. Они могут распространяться со скоростями, несколько меньшими, чем скорость продольной и поперечной объемных волн, а также со скоростью, несколько меньше скорости волны Релея на плоской поверхности. Соответственно, такие неоднородные волны можно назвать квазипродольной, квазипоперечной и квазирелеевской. В связи с переизлучением в объем эти волны быстро затухают и могут быть обнаружены только при малых диаметрах полостей. Задержка дифрагированных сигналов, огибающих

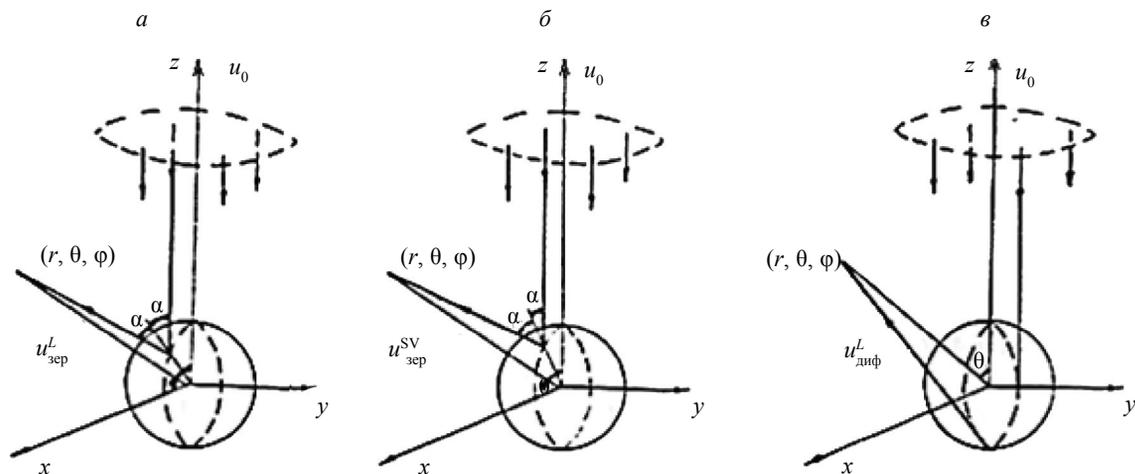


Рис. 4. К рассеянию продольной волны с амплитудой смещения  $u_0$  на сферической полости: отражение  $u^L_{\text{зер}}$  и трансформация  $u^{\text{SV}}_{\text{зер}}$  по законам геометрической акустики (а, б); огибание  $u^L_{\text{диф}}$  полости (в).

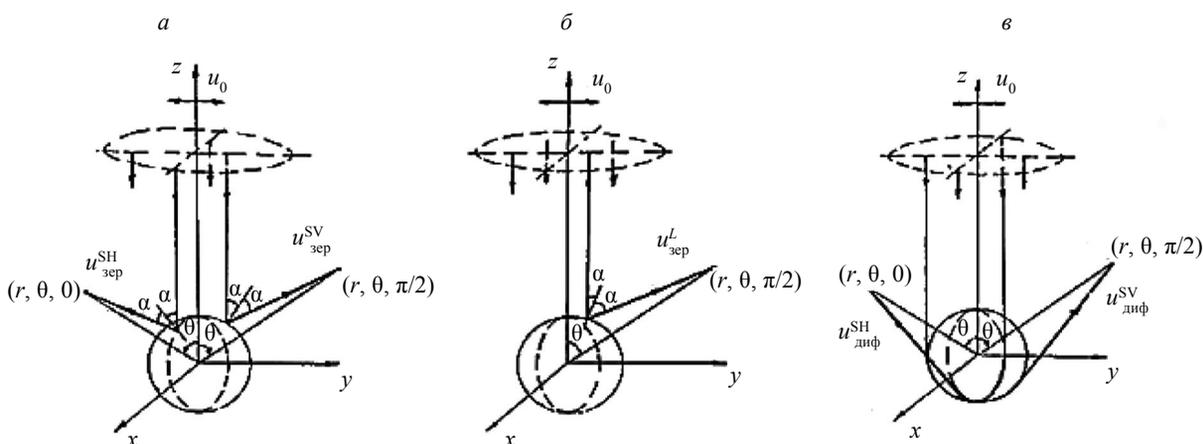


Рис. 5. К рассеянию линейно поляризованной поперечной волны  $u_0$  на сферической полости: отражение  $u^{\text{SV}}_{\text{зер}}$ ,  $u^{\text{SH}}_{\text{зер}}$ , трансформация  $u^L_{\text{зер}}$  по законам геометрической акустики (а, б); огибание полости  $u^{\text{SV}}_{\text{диф}} = u^{\text{SV}}_{\text{R}}$ ,  $u^{\text{SH}}_{\text{диф}}$  (в).

цилиндр и сферу, от зеркально отраженных практически одинакова при одинаковых диаметрах этих полостей. Однако есть существенные особенности в формировании амплитуд дифрагированных сигналов, которые удобно пояснить графически. Если падающая волна — продольная (как на рис. 4), то рассеяние на сфере симметрично по азимутальному углу  $\varphi$  в сферической системе координат  $(r, \theta, \varphi)$ , т.е. амплитуды принятых сигналов зависят только от переменных  $r, \theta$ , а задача рассеяния — двумерная. Если же падающая волна — линейно поляризованная поперечная (как на рис. 5), то задача становится трехмерной: результат рассеяния зависит от положения точки наблюдения. В плоскость поляризации падающей волны  $yOz$  она рассеивается как вертикально поляризованная (SV), а в перпендикулярную плоскость  $xOz$  — как горизонтально поляризованная (SH). Для сравнения: очевидно, что при рассеянии продольной волны на цилиндре (сверлении) симметрия по углу отсутствует. Еще одно существенное отличие в рассеянии на сфере и на цилиндре заключается в том, что при совмещенной схеме на поверхности сферы возникает «светящаяся» линия, со всех точек которой сигналы на приемник приходят одновременно (рис. 6). При этом на приемнике происходит фокусировка сигналов, одновременно поступающих с этой линии, в результате которой при совмещенной схеме излучения—приема отношение амплитуд огибающего сферу сигнала к амплитуде зеркально отраженного должно быть значительно больше, чем при рассеянии на цилиндре. Дополнительные комментарии к отдельным частям рис. 4 — рис. 6 можно найти также в [17, 18, 21].

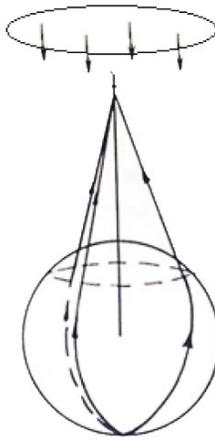


Рис. 6. «Светящаяся» линия на сферическом отражателе при рассеянии «назад».

Теперь вернемся к табл. 1. Аналогично оценке, сделанной для цилиндрической полости в [9], при совмещенной схеме, т.е. при  $\theta = 0$ , для случаев озвучивания сферы продольной и поперечной волнами задержку  $\Delta t_L$  и  $\Delta t_S$  сигналов, огибающих сферу, от зеркально отраженных, соответственно, можно оценить по формулам:

$$\Delta t_L = \frac{D}{c_L} \left\{ 1 + \frac{\pi}{2} \right\}, \quad \Delta t_S = D \frac{1}{c_S} \left\{ 1 + \frac{\pi c_S}{2 c_R} \right\}, \quad (1)$$

где  $c_R$  — скорость волны Релея. Принимая традиционное соотношение  $c_R/c_S = 0,93$ , получим для  $\Delta t_{L,S}$  оценки, приведенные в табл. 1. Оценки отношения амплитуд, приведенные в этой таблице, выполнены согласно расчетным формулам из [17, 18, 21]. Учитывая фактические погрешности измерений амплитуд дифрагированных сигналов, выполненных для продольной волны практически на уровне шумов, можно видеть, что наблюдаемые в экспериментах результаты удовлетворительно подтверждают расчеты для рассеяния поперечной волны и, как минимум, качественно — для рассеяния продольной.

### БОКОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ОТРАЖАТЕЛЬ

Поскольку выше приводились примеры сравнения рассеяния на сферической и цилиндрической полостях, эту тему целесообразно продолжить. На рис. 7 приведен пример озвучивания БЦО диаметром 3; 3,5; 4,5; 5 мм (слева направо) на глубине 30 от верхней поверхности образца, а на рис. 8 — А-сканы сигналов от этих БЦО, полученные поперечной волной совмещенным

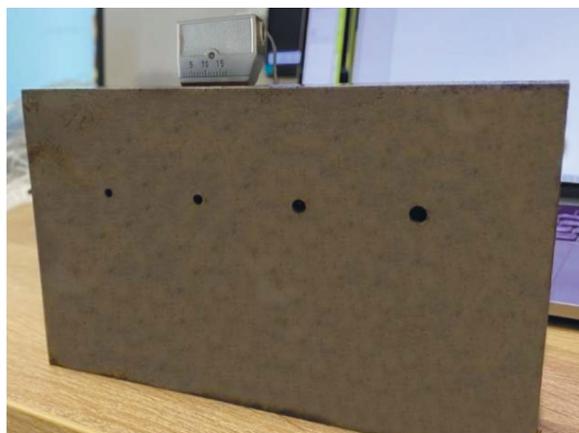


Рис. 7. Образец с серией БЦО.

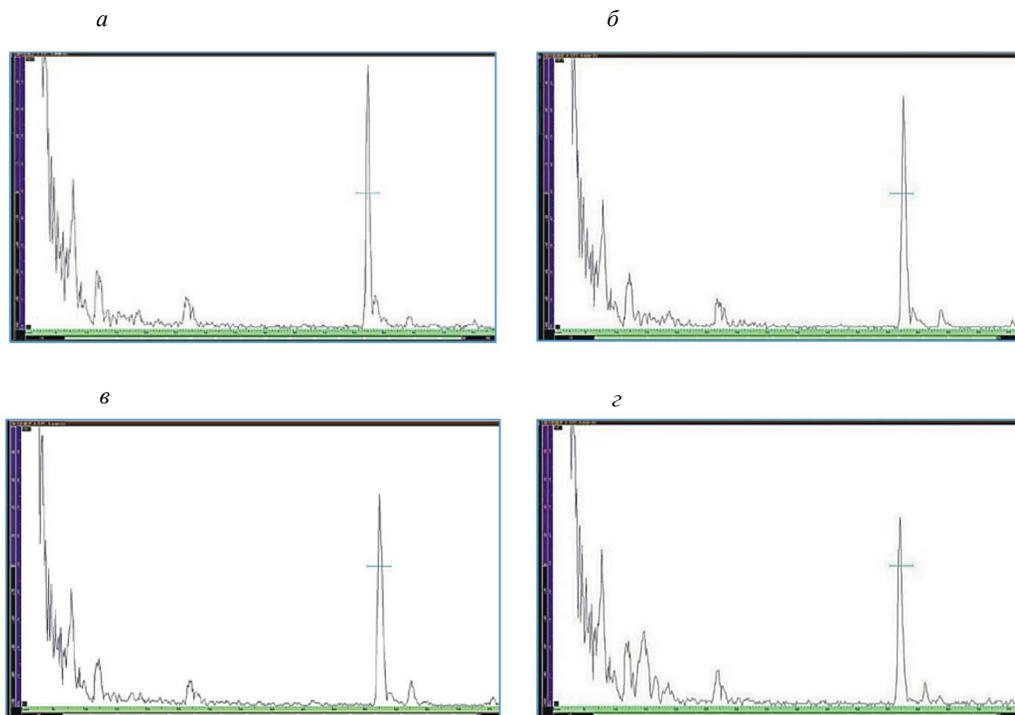


Рис. 8. А-сканы при выявлении в стали поперечными волнами БЦО диаметром: 5 мм (а); 4,5 мм (б); 3,5 мм (в); 3 мм (г). Чувствительность настроена как на рис. 3.

ПЭП с углом ввода  $40^\circ$  на частоте 5 МГц. В отличие от предыдущего образца, в котором поры находились на разных глубинах, в данном случае очень просто выполнить БЦО с осями на одной глубине, чтобы сделать максимально схожими условия рассеяния на разных БЦО.

Значения скоростей волн для стали приняты:  $c_S = 3,26 \times 10^3$  м/с,  $c_R/c_S = 0,93$ . Результаты измерений приведены в табл. 2 в сравнении с оценками, полученными расчетным путем согласно [6].

Таблица 2

## Сравнение амплитуд и времени приема сигналов различного типа при рассеянии поперечных волн на БЦО

Диаметр БЦО, мм		5,0	4,5	3,5	3,0
<b>Поперечная волна, частота 5 МГц</b>					
Амплитуда $A_{\text{зер}}$ , % экрана		97	93	85	78
Время $t_{\text{зер}}$ , мкс		34,2	35,0	35,7	35,9
Амплитуда $A_{\text{диф}}$ , % экрана		5,6	6,8	8,5	9,0
Время $t_{\text{диф}}$ , мкс		38,4	38,8	38,8	38,4
Оценка отношения амплитуд, $A_{\text{диф}}/A_{\text{зер}}$	Эксперимент	0,06	0,07	0,10	0,11
	Расчет	0,05—0,07	0,05—0,08	0,07—0,10	0,1—0,2
Оценка задержки $\Delta t$ , мкс	Эксперимент	4,2	3,8	3,1	2,5
	Расчет	4,1	3,7	2,9	2,5

В данном случае можно говорить уже не о качественном, а о количественном совпадении результатов расчета и экспериментов. Именно поэтому здесь приведены результаты измерений на цилиндрах сравнительно больших диаметров: сигналы лучше разрешаются, а амплитуда сигналов, зеркально отраженных от цилиндра, больше, чем от сфер диаметром 0,8—2 мм.

## ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ВОЛНЫ НА ЭФФЕКТ ОБЕГАНИЯ ОБЪЕМНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Приведем теперь пример того, как влияет поляризация исходной поперечной волны на результаты рассеяния на сфере и БЦО. Проще всего это продемонстрировать при выявлении поры и БЦО одинакового диаметра при нормальном вводе линейно поляризованной поперечной волны совмещенным ПЭП. Измерения проведены на поре диаметром 2 мм на глубине 19 мм в образце из стекла и БЦО диаметром 2 мм на глубине 15 мм в образце из стали. На рис. 9 показаны А-сканы принимаемых сигналов.

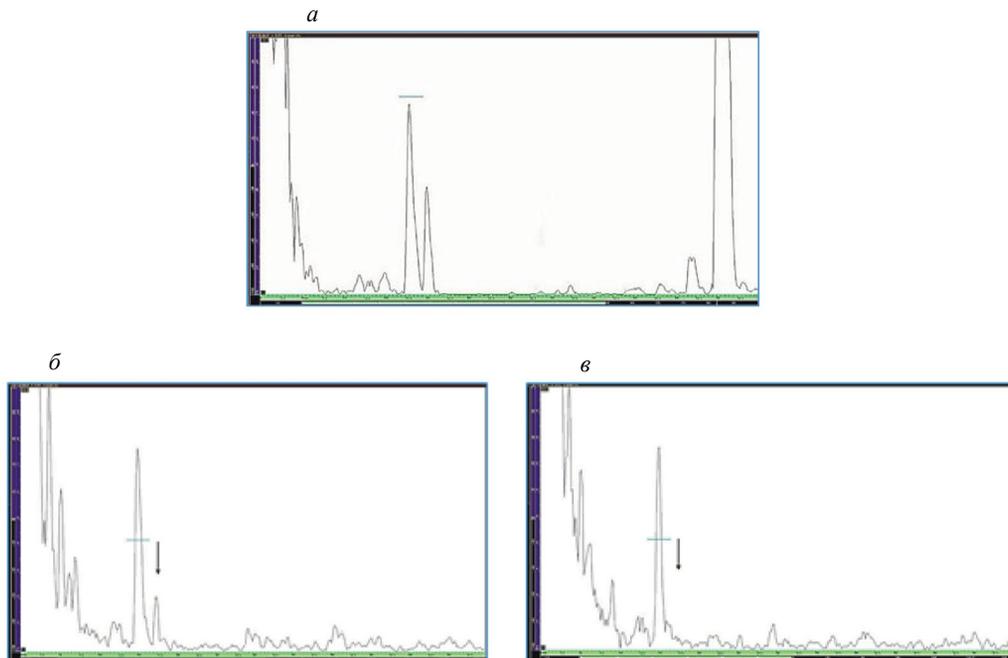


Рис. 9. А-сканы при анализе рассеяния линейно поляризованной поперечной волны на сфере и БЦО: рассеяние на сфере не зависит от ориентации вектора поляризации (*a*); рассеяние на БЦО волны с SV-поляризацией (*б*); рассеяние на БЦО волны с SH-поляризацией (*в*). А-сканы на (*б*) и (*в*) нормированы одинаково, но независимо от А-скана на (*a*).

Как указывалось выше, результат рассеяния продольной волны на сферической полости симметричен относительно азимутального угла  $\varphi$  (см. рис. 2), а в случае рассеяния поперечной волны (как на рис. 3) необходимо учитывать направление вектора ее поляризации. Однако есть одно исключение. Если выявление сферы производится по совмещенной схеме, то очевидно, что при вращении источника (он же — приемник) поляризованной поперечной волны вокруг вертикальной оси на рис. 3 условия озвучивания сферы не меняются при поворотах преобразователя. Таким образом, не меняется и характер рассеяния волн. Поэтому в однородной изотропной упругой среде при рассеянии поперечной волны пара сигналов, показанная на рис. 9*a*, не изменяется при вращении совмещенного преобразователя относительно вертикальной оси на рис. 3. Иная ситуация имеет место при озвучивании БЦО. Если исходная поперечная волна поляризована перпендикулярно поверхности (оси) БЦО, то она рассеивается как вертикально поляризованная относительно этой поверхности (SV-волна). Зеркальное отражение происходит с коэффициентом отражения, практически равным единице. При этом на поверхности БЦО формируется скользящая вдоль нее квазирелевская волна, которая переизлучает в объем в сторону приемника. Результат показан на рис. 9*б*. Он аналогичен ранее приведенным А-сканам на рис. 8. Приемник регистрирует зеркальное отражение и огибание полости (последнее отмечено стрелкой). Разница амплитуд и времени приема зеркально отраженных и огибающих полость сигналов рассчитывается как для данных табл. 1 и 2.

Теперь развернем совмещенный преобразователь на  $90^\circ$  относительно вертикальной оси. В этом случае плоскость поляризации исходной поперечной волны станет параллельной оси цилиндра, т.е. в этом случае волна уже горизонтально поляризована (SH-волна) относительно поверхности полости. В точке зеркального отражения поверхность полости локально пло-

ская. Соответственно, коэффициент отражения этой волны не изменится, так же, как и амплитуда зеркально отраженного сигнала. Однако квазирелеевская волна при SH-поляризации не возникает, а другие типы неоднородных волн, которые могут скользить вдоль цилиндрической поверхности, быстро затухают. Поэтому при ориентации вектора поляризации поперечной волны вдоль оси БЦО дифракционное огибание полости не наблюдается — соответствующий участок отмечен стрелкой на рис. 9в.

### ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАЗДЕЛЬНОЙ СХЕМЕ ИЗЛУЧЕНИЯ—ПРИЕМА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

Выше рассматривались только совмещенные схемы выявления сферических и цилиндрических полостей. Не меньший интерес представляют и дифракционные эффекты, возникающие при раздельном излучении—приеме ультразвуковых волн. Рассмотрим, согласно [18], пример эксперимента, в котором также демонстрируется различие в рассеянии на цилиндрических и сферических полостях. Пусть излучение и прием поперечных волн выполняется обычными наклонными ПЭП по схеме, показанной на рис. 10. В образце из алюминиевого сплава использовались: БЦО в качестве модели цилиндрической полости, сверление со сферическим дном в качестве модели сферы. Диаметры сверлений — 6 мм. Скорость поперечных волн  $3,1 \times 10^3$  м/с. Результаты измерений приведены в табл. 3.

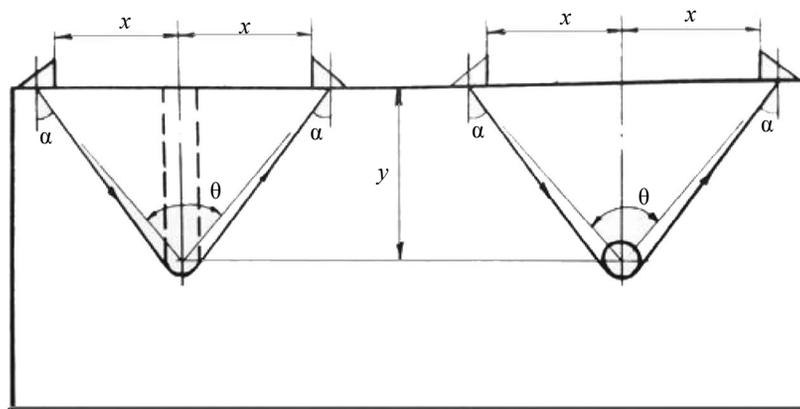


Рис. 10. Схема измерений для сравнения дифракции на сферической поверхности и БЦО.

В табл. 3 для расчета отношения амплитуд сигналов, огибающих поверхности полостей в указанных условиях, согласно [18], использована формула:

$$\left| \frac{A_{RCФ}^{SV}}{A_{RЦЛ}^{SV}} \right| = 0,84 \sqrt{\frac{\pi b}{r \sin \theta}} \exp\{(\theta - \pi)(\text{Im } v_{RCФ} - \text{Im } v_{RЦЛ})\}. \quad (2)$$

При этом имеется ввиду, что из всех волн, огибающих полости, вклад в принимаемый сигнал дают только квазирелеевские волны, т.е.  $A_{\text{дифСФ}}^{SV} = A_{RCФ}^{SV}$ ,  $A_{\text{дифЦЛ}}^{SV} = A_{RЦЛ}^{SV}$ .

Здесь  $b$  — радиус объемного дефекта, расстояние  $r$  задается по формуле  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , величины  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  показаны на рис. 10, а символами  $\text{Im } v_{RCФ}$  и  $\text{Im } v_{RЦЛ}$  обозначены коэффициенты затухания квазирелеевских волн при распространении вдоль поверхности сферы и цилиндра, соответственно. В таком виде коэффициенты затухания записаны для того, чтобы подчеркнуть, что неоднородные волны, скользят вдоль поверхности полостей, задаются комплексными волновыми числами  $v_R$ . Их действительная часть  $\text{Re } v_R$  определяет фазовые скорости волн, скользят вдоль полости. Расчетное значение этой величины для диапазона волновых размеров полостей, представляющих наибольший интерес для контроля качества сварных швов, приведено согласно [18] на рис. 11а. Из этого графика следует, что вдоль поверхностей БЦО и сферической поры квазирелеевские волны распространяются с практически одинаковой скоростью. Поэтому при сравнении времени распространения этих волн и

Таблица 3

Сравнение амплитуд сигналов, огибающих БЦО и сферическую поверхность

Угол ввода $\alpha$ , град		70	59	51
Разворот ПЭП $\theta$ , град		140	120	100
Расстояние между точками ввода, $2r = 2\sqrt{x^2 + y^2}$ , мм		120	100	80
$\frac{A_{\text{РСФ}}}{A_{\text{РЦЛ}}}$ , дБ	Эксперимент	-10	-9	-6
	Расчет	-9,5	-10,7	-10,6

вычислении времени приема сигналов, огибающих объемные отражатели, во второй формуле в (1) можно пользоваться одними и теми же значениями скоростей неоднородных волн.

На рис. 11б показана зависимость мнимой части  $\text{Im } v_R$  комплексных волновых чисел, т.е. коэффициента затухания квазирелеевских волн при их распространении вдоль поверхности полости, от волнового размера полости. Видно, что эта величина для сферической поверхности существенно превышает аналогичную для цилиндра. Соответственно, неоднородные волны при распространении вдоль сферической полости затухают значительно сильнее, чем при распространении вдоль цилиндра. На это указывалось в предыдущих разделах настоящей статьи.

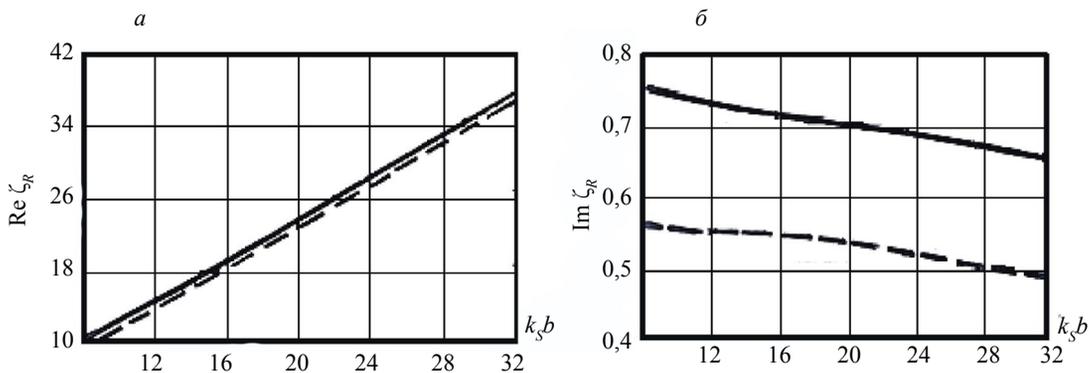


Рис. 11. Действительная и мнимая части комплексного волнового числа скользящих волн релеевского типа на сфере (сплошные линии) и цилиндре (штриховая линия): действительная часть (а); мнимая часть (б).

Как видно из табл. 3, результаты расчетов и экспериментов совпадают: при малых углах ввода — как минимум качественно, при достаточно больших углах — количественно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассеяние упругих волн на сферических полостях (порах) в упругой среде происходит по механизму, аналогичному рассеянию на цилиндрических сверлениях. В зависимости от типа и поляризации исходных волн можно наблюдать как зеркальное отражение волн, так и огибание волнами этих полостей. Однако коэффициенты затухания волн, скользящих вдоль поверхности сферической полости, больше, чем при огибании цилиндрических сверлений. В результате отношение амплитуд огибающих и зеркально отраженных сигналов на сфере меньше, т.е. огибающие сигналы значительно слабее, чем на цилиндре. Исключение составляет случай выявления объемных дефектов по совмещенной схеме. Вследствие фокусировки на приемнике сигналов, переизлучаемых со «светящейся» линии на поверхности сферы огибающими ее волнами, амплитуда дифрагированных на сфере сигналов существенно увеличивается. В результате разница амплитуд дифрагированных и зеркально отраженных от сферы сигналов может составить всего несколько децибел.

При использовании объемных полостей (сверлений, сферических пор) для настройки параметров ультразвукового контроля следует уделять внимание соотношению длительности импульсов и диаметров полостей в образцах и сварных швах. Если используются достаточно короткие зондирующие импульсы длительностью 2-3 периода (на центральной частоте), такие, что зеркально отраженные сигналы разрешаются во времени от огибающих объемные

дефекты, то амплитуду и время приема зеркальных отражений можно использовать для настройки чувствительности и диапазона развертки, а разницу времени приема этих сигналов — для проверки разрешающей способности оборудования. Например, это имеет место для БЦО диаметром 2 мм на глубине 3 и 8 мм в образце СО-2 по ГОСТ Р 55724—2013 при использовании частоты 5 МГц и более. При этом зеркально отраженные от этих БЦО сигналы разрешаются во времени от огибающих. Фактически, в указанном стандарте это уже допускается на образце СО-3Р.

При озвучивании объемных полостей поперечной волной наличие или отсутствие сигналов, огибающих эти полости, можно использовать в качестве информативного признака для идентификации типа объемного дефектов, т.е. для получения информативного признака, отличающего протяженные объемные дефекты типа свищей или канальных пор от локальных объемных дефектов типа сферических пор.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. С. 240.
2. ГОСТ Р 55724—2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые
3. ISO 7963. Non-destructive testing — Ultrasonic examination — Specification for calibration block No. 2.
4. *Тюткин В.В.* Рассеяние плоских волн цилиндрической полостью в изотропной упругой среде // *Акустический журнал*. 1959. Т. 5. № 1. С. 106—110.
5. *Голубев А.С.* Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта // *Акустический журнал*. 1961. Т. 7. Вып. 2. С. 174—180.
6. *Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю.* Анализ упругого поля ультразвуковых волн, рассеянных на цилиндрической полости // *Дефектоскопия*. 1982. № 12. С. 18—30.
7. *Могильнер Л.Ю.* Применение цилиндрического отражателя для настройки чувствительности при ультразвуковом контроле // *Дефектоскопия*. 2018. № 7. С. 27—36.
8. *Гинзел Э.* TOFD. Дифракционно-временной метод ультразвуковой дефектоскопии. М.: ДПК Пресс, 2021. С. 312. (Ed. Ginzell. Ultrasonic Time of Flight Diffraction. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. 249 p.).
9. *Могильнер Л.Ю., Смородинский Я.Г.* Ультразвуковой контроль: применение цилиндрического сверления для настройки и поверки оборудования // *Дефектоскопия*. 2018. № 9. С. 14—20.
10. *Ермолов И.Н.* Жизнь и дефектоскопические истории. М.: Спектр, 2011. 120 с.
11. *Мелешко Н.В., Петров А.А.* Зарубка и боковое цилиндрическое сверления. Режим доступа: <https://www.shearwave.ru>, запись от 11.08.2013. Дата обращения 26.07.2024.
12. *Базулин Е.Г., Вовилкин А.Х., Сухоруков Н.И., Тихонов Д.С.* Анализ фазы ЦФА-изображений с целью определения типа обнаруженного отражателя // *Дефектоскопия*. 2019. № 7. С. 20—29.
13. *Данилов В.Н.* О возможности оценки радиуса цилиндрического отражателя по времени запаздывания импульса волны обегания по отношению к зеркально отраженному импульсу поперечной волны при ультразвуковом контроле металла наклонным преобразователем // *Контроль. Диагностика*. 2024. Т. 27. № 3. С. 14—22.
14. *Могильнер Л.Ю., Сясько В.А., Шихов А.И.* Моделирование дефектов в ультразвуковой дефектоскопии. Состояние и перспективы // *Дефектоскопия*. 2024. № 5. С. 13—35.
15. *Яворская И.М.* Коротковолновая асимптотика дифракционного поля на сфере при падении плоских поперечных волн // *Прикладная математика и механика*. 1965. Т. 29. № 6. С. 1023—1034.
16. *Miklowitz J.* The theory of elastic waves and waveguides. Amsterdam—New York—Oxford: North-Holland Publishing Company, 1978. 618 p.
17. *Алешин Н.П.* Разработка теории, создание и внедрение методов и средств ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений строительных конструкций / Автореферат дисс. д.т.н. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1983. 32 с.
18. *Могильнер Л.Ю.* Рассеяние ультразвуковых колебаний объемными моделями дефектов и разработка методики и средств неразрушающего контроля сварных узлов строительных структурных покрытий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Автореферат диссертации к.т.н. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1983. 16 с.
19. *Яворская И.М.* Дифракция плоской продольной волны на круглом цилиндре // *Доклады АН СССР*. 1964. Т. 158. № 6. С. 1287—1290.
20. *Яворская И.М.* Дифракция плоских стационарных упругих волн на гладких выпуклых цилиндрах // *Прикладная математика и механика*. 1965. Т. 29. № 3. С. 493—508.
21. *Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Могильнер Л.Ю., Яровой А.А.* Повышение выявляемости объемных дефектов // *Дефектоскопия*. 1985. № 7. С. 24—30.

## REFERENCES

1. *Ermolov I.N.* Theory and practice of ultrasonic testing. M.: Mashinostroenie, 1981. P. 240.
2. GOST R 55724—2013. Non-destructive testing. Welded joints. Ultrasonic methods.
3. ISO 7963. Non-destructive testing — Ultrasonic examination — Specification for calibration block No. 2.
4. *Tyutekin V.V.* Scattering of plane waves by a cylindrical cavity in an isotropic elastic medium // Acoustic journal. 1959. V. 5. No. 1. P. 106—110.
5. *Golubev A.S.* Reflection of plane waves from a cylindrical defect // Acoustic journal. 1961. V. 7. Is. 2. P. 174—180.
6. *Aleshin N.P., Mogilner L.Yu.* Analysis of the elastic field of ultrasonic waves scattered by a cylindrical cavity // Defektoskopiya. 1982. No. 12. P. 18—30.
7. *Mogilner L.Yu.* Application of a cylindrical reflector for adjusting sensitivity in ultrasonic testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. No. 7. P. 27—36.
8. *Ginzel E.* Ultrasonic Time of Flight Diffraction — Moscow: DPK Press, 2021. P. 312. (Ed. Ginzel. Ultrasonic Time of Flight Diffraction. Waterloo, Ontario, Canada: Eclipse Scientific, 2013. 249 p.).
9. *Mogilner L.Yu., Smorodinsky Ya.G.* Ultrasonic testing: application of cylindrical drilling for equipment setup and testing // Defektoskopiya. 2018. No. 9. P. 14—20.
10. *Ermolov I.N.* Life and flaw detection stories. Moscow: Spektr, 2011. 120 p.
11. *Meleshko N.V., Petrov A.A.* Notch and lateral cylindrical drilling. Access mode: <https://www.shearwave.ru>, entry from 11.08.2013. Date of access 26.07.2024.
12. *Bazulin E.G., Vopilkin A.Kh., Sukhorukov N.I., Tikhonov D.S.* Phase analysis of digital facial image analysis to determine the type of detected reflector // Defektoskopiya. 2019. No. 7. P. 20—29.
13. *Danilov V.N.* On the Possibility of Estimating the Radius of a Cylindrical Reflector Based on the Time Delay of the Run-around Wave Pulse with Respect to the Specularly Reflected Transverse Wave Pulse in Ultrasonic Testing of Metal with an Inclined-Beam Transducer // Testing. Diagnostics. 2024. V. 27. No. 3. P. 14—22.
14. *Mogilner L.Yu., Syasko V.A., Shikhov A.I.* Modeling Defects in Ultrasonic Flaw Detection. Status and Prospects // Defektoskopiya. 2024. No. 5. P. 13—35.
15. *Yavorskaya I.M.* Short-Wave Asymptotics of the Diffraction Field on a Sphere with Incident Plane Transverse Waves // Applied Mathematics and Mechanics. 1965. V. 29. No. 6. P. 1023—1034.
16. *Miklowitz J.* The theory of elastic waves and waveguides. Amsterdam—New York—Oxford: North-Holland Publishing Company, 1978. 618 p.
17. *Aleshin N.P.* Development of the theory, creation and implementation of methods and means of ultrasonic flaw detection of welded joints of building structures Abstract of dissertation. Doctor of Engineering Sciences / PhD Abstract. Engineering Sciences. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 1983. 32 p.
18. *Mogilner L.Yu.* Scattering of ultrasonic vibrations by volumetric models of defects and development of methods and means of non-destructive testing of welded joints of building structural coatings / PhD Abstract. Engineering Sciences. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 1983. 16 p.
19. *Yavorskaya I.M.* Diffraction of a plane longitudinal wave by a round cylinder // Reports. USSR Academy of Sciences. 1964. V. 158. No. 6. P. 1287—1290.
20. *Yavorskaya I.M.* Diffraction of plane stationary elastic waves by smooth convex cylinders // Applied Mathematics and Mechanics. 1965. V. 29. No. 3. P. 493—508.
21. *Aleshin N.P., Baranov V.Yu., Mogilner L.Yu., Yarovoy A.A.* Increasing the detectability of volumetric defects // Defektoskopiya. 1985. No. 7. P. 24—30.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2024 г. С.А. Бобуёк<sup>1,\*</sup>, А.П. Суржиков<sup>1</sup>, Е.В. Николаев<sup>1</sup>,  
А.В. Малышев<sup>1</sup>, Е.Н. Лысенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30  
E-mail: \*bobuyok@tpu.ru

Поступила в редакцию 22.08.2024; после доработки 23.08.2024  
Принята к публикации 26.08.2024

Исследованы магнитные фазовые превращения в области температуры Кюри в ферритовом материале состава  $Ni_{0,4}Zn_{0,6}Fe_2O_4$  с применением термоманометрического анализа и методов регистрации температурных зависимостей начальной магнитной проницаемости  $\mu_0(T)$  и удельного электрического сопротивления  $\rho(T)$ . В работе приводится описание используемого оборудования и ключевых особенностей применения рассматриваемых экспериментальных методик. В ходе проведения термоманометрии на стадии охлаждения было обнаружено, что температура, при которой материал завершает переход в ферримагнитное состояние, соответствует температурным координатам точки перегиба кривой  $\mu_0(T)$  и точки излома графика зависимости  $\ln\rho(T)$ . Установленная связь между параметрами переходных процессов может быть полезной для более корректного определения температуры Кюри в ферритах.

*Ключевые слова:* феррит, магнитный фазовый переход, температура Кюри, термогравиметрия, удельное электрическое сопротивление, магнитная проницаемость.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL METHODS FOR DETERMINING THE CURIE TEMPERATURE OF FERRITE MATERIALS

© 2024 S.A. Bobuyok<sup>1,\*</sup>, A.P. Surzhikov<sup>1</sup>, E.V. Nikolaev<sup>1</sup>, A.V. Malyshev<sup>1</sup>, E.N. Lysenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634050 Tomsk, Lenin Avenue 30  
E-mail: \*bobuyok@tpu.ru

Magnetic phase transformations in the Curie temperature region of a ferrite material with the composition  $Ni_{0,4}Zn_{0,6}Fe_2O_4$  were studied using thermomagneto-metric analysis and methods for recording the temperature dependence of the initial magnetic permeability  $\mu_0(T)$  and electrical resistivity  $\rho(T)$ . The description of the equipment utilized and the key characteristics of the application of the experimental methods under review are provided. During thermomagneto-metry at the cooling stage, it was found that the temperature at which the material completes the transition to the ferrimagnetic state corresponds to the inflection point temperature on the  $\mu_0(T)$  curve and the breakpoint on the  $\ln\rho(T)$  plot. The established interaction between the parameters of transients can be useful for more correct determination of the Curie temperature in ferrites.

*Keywords:* ferrite, magnetic phase transition, Curie temperature, thermogravimetry, electrical resistivity, magnetic permeability.

DOI: 10.31857/S0130308224100026

### ВВЕДЕНИЕ

Ферриты находят свое применение для решения широкого спектра современных прикладных задач. Данные материалы используются в системах беспроводной передачи энергии [1], газовых датчиках [2], суперконденсаторах [3]. Также их применяют для обнаружения скрытых дефектов в проводящих материалах с помощью магнитооптической визуализации [4]. Из магнитотвердых ферритов изготавливают постоянные магниты [5]. В биомедицине ферритовые материалы применяются в виде порошков для адресной доставки лекарственных средств [6] и магнитной гипертермии [7]. В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям в области фотокаталитического расщепления воды с использованием ферритов различного состава [8, 9].

При температуре Кюри (точке Кюри) ферриты теряют свои магнитные свойства из-за разрушения упорядоченности магнитных моментов в их кристаллической структуре (фазовый переход типа «ферримагнетик  $\rightleftharpoons$  парамагнетик»). В подавляющем большинстве случаев точка Кюри рассматривается в качестве верхнего предела рабочего диапазона температур магнитного изделия [10], что обуславливает необходимость строгого контроля данной характеристики на производстве.

Существует несколько экспериментальных методов определения температуры Кюри. Например, оценить данный параметр можно с помощью анализа зависимостей тепло- и температуропроводности от температуры [11]. В ряде случаев применяют dilatометрический анализ, предполагающий изучение относительной деформации образца при его нагреве и охлаждении [12]. Одним из классических экспериментальных подходов к измерению температуры Кюри является индукционный способ, основанный на регистрации температурной зависимости ЭДС индукции катушки с сердечником из исследуемого материала [7]. Зависимости удельного электрического сопротивления от температуры также могут применяться для изучения магнитных фазовых переходов [13]. Широко используются для определения температуры Кюри вибрационная магнитометрия, при которой оценивается кривая зависимости намагниченности образца от температуры [14—17], а также метод измерения магнитной проницаемости в широком диапазоне температур [18—20]. Измерить температуру Кюри можно с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии [21] и термомагнитометрии, при которой в постоянном магнитном поле получают зависимости веса образца от температуры [22, 23].

Разнообразие экспериментальных подходов к определению точки Кюри (которое далеко не ограничено приведенными выше методиками) ставит вопросы как о воспроизводимости результатов измерений данной характеристики, так и о ключевых преимуществах и недостатках различных методов.

Целью настоящей работы является измерение точки Кюри никель-цинкового феррита с помощью термомагнитометрии и регистрации температурных зависимостей удельного сопротивления  $\rho(T)$  и начальной магнитной проницаемости  $\mu_0(T)$ . Последние два метода были реализованы в специально разработанных лабораторных установках. При изучении магнитных фазовых превращений представлял особый интерес анализ взаимосвязи температурных характеристик, полученных с помощью разработанных установок и синхронного термического анализатора STA 449C Jupiter, который широко используется для термомагнитометрического анализа ферритмагнетиков [24—26]. Выбор в качестве объекта исследования феррита состава  $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$  обоснован широким распространением этого материала и, как следствие, наличием большого количества научных данных о его магнитном фазовом переходе в области температуры Кюри.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Получение и анализ фазового состава ферритовых образцов

Никель-цинковый феррит состава  $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$  был синтезирован по классической керамической технологии из оксидов никеля (NiO), цинка (ZnO) и железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Оксидная смесь механически активировалась в планетарной мельнице АГО-2С, ферритизация проводилась в лабораторной муфельной печи при температуре 900°C в течение 240 мин. Далее в синтезированный ферритовый порошок добавляли раствор поливинилового спирта, выполняющего роль пластификатора, а затем, используя ручной гидравлический пресс, получали образцы в виде тороидов и таблеток. Спекание ферритовой керамики проводили при температуре 1200 °С в течение 240 мин.

Фазовый состав образцов контролировался методом рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра ARL X'tra. Угловой диапазон  $2\theta$  составлял 15—100°. Обработка рентгенограмм производилась в программной среде PowderCell с использованием кристаллографической базы данных PDF-4+.

### Термомагнитометрический анализ

Термомагнитометрический анализ проведен на ферритовых образцах в виде небольших гранул, полученных после дробления таблеток, с применением синхронного термического анализатора Netzsch STA 449C Jupiter с установленной системой из двух постоянных магнитов (рис. 1).

Исследуемый образец помещался в тигель 2, после этого вертикальная печь анализатора закрывалась и оператор задавал параметры проведения необходимых температурных программ. Весовой блок 6 и термopара, установленная на вершине корундового держателя 5, служили для получения зависимостей веса образца от температуры. Дополнительную защиту термopары от перегрева обеспечивали расположенные вокруг держателя тепловые экраны 4.

Обладая спонтанной намагниченностью, ферритовый образец при температуре ниже точки Кюри втягивался вверх постоянным полем двух магнитов, которые были установлены

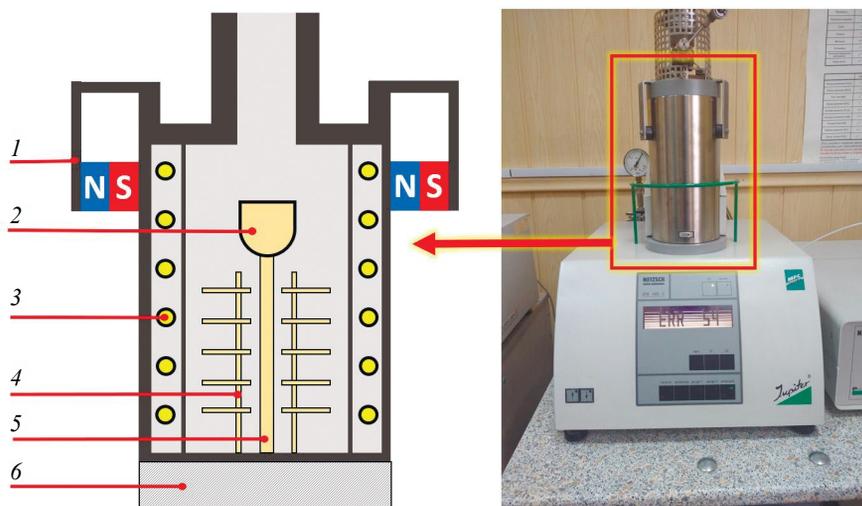


Рис. 1. Структура измерительной ячейки и внешний вид синхронного термического анализатора Netzsch STA 449C Jupiter.

держателем 1 немного выше уровня расположения тигля. В области точки Кюри взаимодействие образца с магнитным полем прекращалось, что приводило к аппаратному повышению веса. Таким образом, анализ температурных зависимостей веса исследуемого образца позволял получить информацию о характере протекания его магнитных фазовых превращений.

Температурный диапазон измерений составлял 25—800 °С, скорость нагрева — 50 °С/мин, скорость охлаждения — 10 °С/мин. Анализ термограмм проводился как при нагреве, так и на стадии охлаждения феррита.

### Метод измерения начальной магнитной проницаемости

Точка Кюри образца, выполненного в виде тороида, определена по температурной зависимости начальной магнитной проницаемости с применением установки, показанной на рис. 2.

Ферритовый тороидальный сердечник с намотанной катушкой помещался в измерительную ячейку, затем производился его нагрев до 300 °С со скоростью 5 °С/мин и последующее медленное охлаждение до комнатной температуры (скорость охлаждения не контролировалась). Измерения проводились на стадии охлаждения в слабых электромагнитных полях частотой

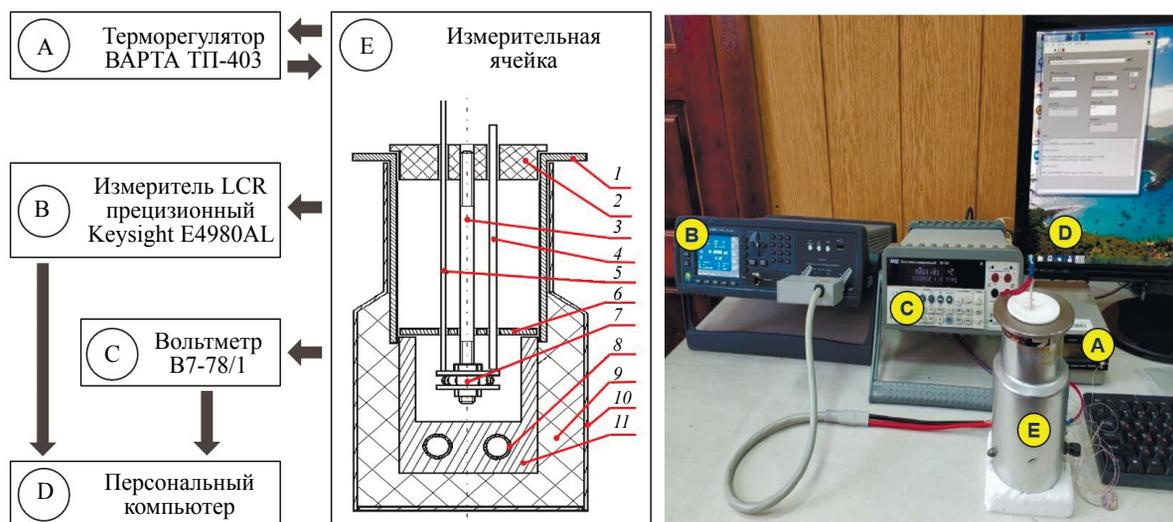


Рис. 2. Блок-схема и внешний вид экспериментального стенда для исследования температурной зависимости начальной магнитной проницаемости.

1 кГц с напряженностью не выше 0,1 Э. Скорость нагрева и охлаждения обеспечивались работой терморегулятора ВАРТА ТП-403. Прецизионный измеритель LCR Keysight E4980AL применен для измерения индуктивности катушки, которая затем преобразовывалась в значения начальной магнитной проницаемости  $\mu_0$  с помощью формулы:

$$\mu_0 = \frac{10^7 L}{2hN^2 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)}, \quad (1)$$

где  $L$  — измеряемая индуктивность ферритового образца с обмоткой, Гн;  $D$  — внешний диаметр тороида, м;  $d$  — внутренний диаметр тороида, м;  $h$  — высота тороида, м;  $N$  — количество витков в обмотке.

Универсальный вольтметр В7-78/1 выполнял роль измерителя температуры, получая информацию с термопары, находящейся в измерительной ячейке. Для автоматизированного сбора данных применялся персональный компьютер и специализированное программное обеспечение, разработанное с использованием среды программирования LABView.

Измерительная ячейка имеет форму цилиндра, изготовленного из высококачественной немагнитной нержавеющей стали 1. Верхняя часть цилиндра закрыта фторопластовой крышкой 2, которая служит защитой для стального стержня 3 и термопары 4. В крышке предусмотрены специальные отверстия для вывода проводников 5, соединяющих обмотку исследуемого образца 7 с измерительными приборами. Для обеспечения равномерного распределения температуры в нижней части цилиндра, где расположен образец, используется медный стакан 11, запрессованный в этой зоне. На дне стакана находится нагреватель 8, обеспечивающий нагрев ферритового образца. Для улучшения однородности нагрева нижняя часть ячейки закрывается алюминиевым тепловым экраном 6. Все компоненты ячейки размещены в прочном алюминиевом корпусе 10, оснащенном электрическими разъемами для подключения заземляющего провода и проводов питания нагревательного элемента. Корпус измерительной ячейки изолирован от нагревательных элементов с помощью шамотного порошка 9, что гарантирует безопасность и стабильность работы измерительной ячейки.

### Метод измерения удельной электрической проводимости

Метод регистрации удельного электрического сопротивления от температуры был проведен на никель-цинковой ферритовой таблетке с применением измерительного стенда, показанного на рис. 3.

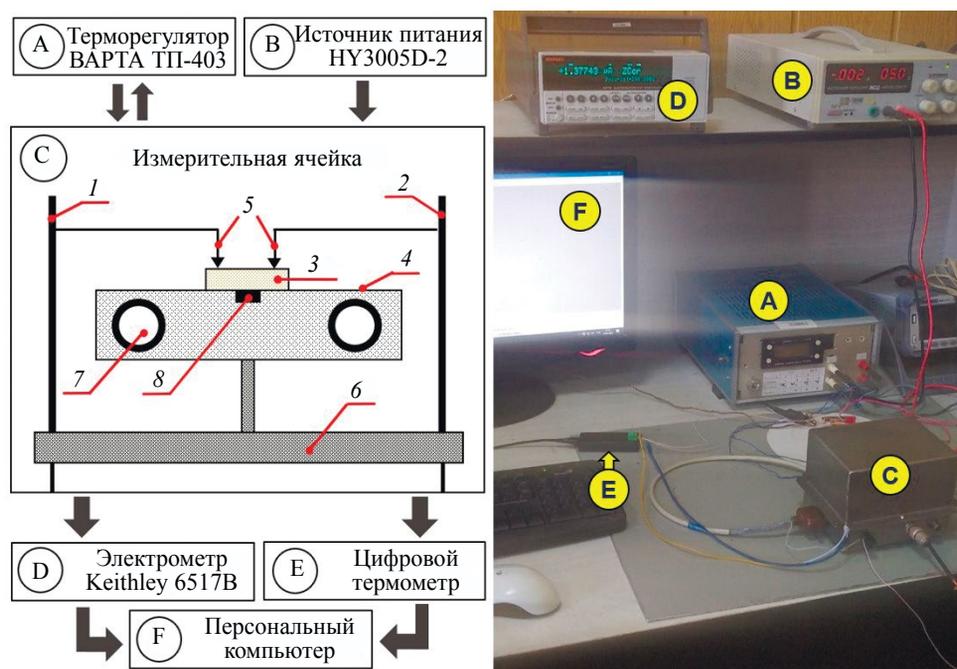


Рис. 3. Блок-схема и внешний вид экспериментального стенда для исследования удельного электрического сопротивления.

Измерения проводились при заданном напряжении  $U = 5$  В от лабораторного источника питания НУ3005D-2, подключенного к стрелю 1. Вывод на электрометр Keithley 6517В обеспечивался стержнем 2. Ферритовый образец 3 размещался на полированной поверхности столика 4, изготовленного из немагнитной нержавеющей стали. Два заостренных прижимных контакта 5 служили зондами на поверхности ферритовой таблетки. Электроизоляция между двумя электрическими выводами обеспечивалась карболитовым основанием 6. Для нагрева образца использовался встроенный в столик спиральный нагреватель 7, управляемый терморегулятором «ВАРТА» ТП-403 и дифференциальной хромель-алюмелевой термопарой 8.

С электрометра на персональный компьютер поступала измерительная информация о силе тока  $I$ , проходящего через исследуемый образец, которая затем преобразовывалась в значения удельного электрического сопротивления по формуле:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \pi \cdot r_0. \quad (2)$$

Поскольку сопротивление растекания в основном определяется приконтактной областью  $r_0$ , этот метод обладает высокой локальностью измерений. Пространственное разрешение соответствует диаметру контакта и составляет около 10 мкм. Объем области, в которой определяется удельное сопротивление, приблизительно равен  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>.

Температурные измерения передавались на компьютер с термопары измерительной ячейки через электронный термометр. Это позволило получить необходимые температурные зависимости удельного электрического сопротивления феррита для их последующего анализа. Измерения проводились на стадии нагрева образца от комнатной температуры до 300 °С.

## ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

### Рентгенофазовый анализ ферритовых образцов

Проведение рентгеновской дифрактометрии доказало, что в синтезированных образцах отсутствуют какие-либо сторонние примеси. Профиль рентгенограммы (рис. 4) полностью соответствует фазе никель-цинкового феррита состава  $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ . Полученные значения постоянной решетки  $a = b = c = 8,4022$  Å также хорошо согласуются с литературными данными [27, 28].

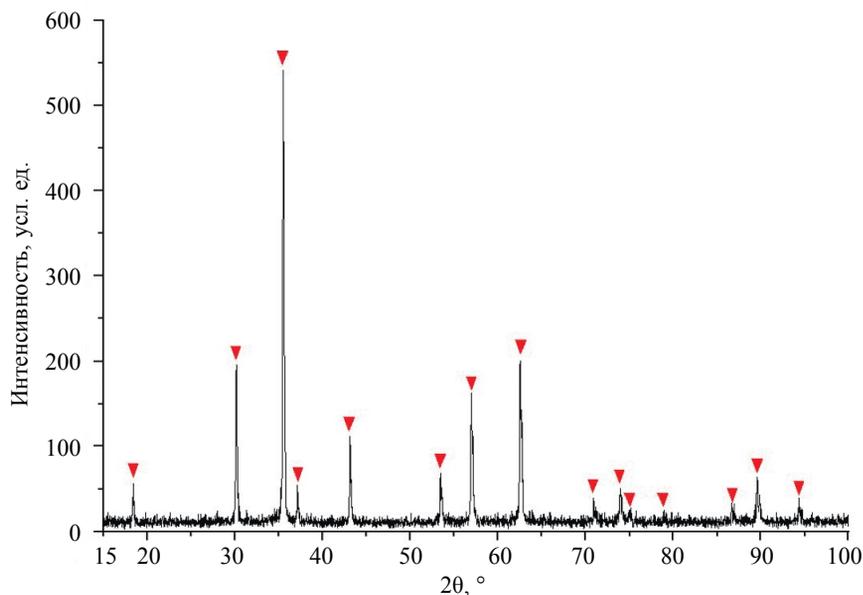


Рис. 4. Рентгенограмма никель-цинкового образца (▼ – рефлексы, соответствующие фазе  $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ).

### Термомагнитометрический анализ

Результаты термомагнитометрического анализа приведены на рис. 5. На данной термограмме изображена кривая зависимости веса ферритового образца от температуры (термо-

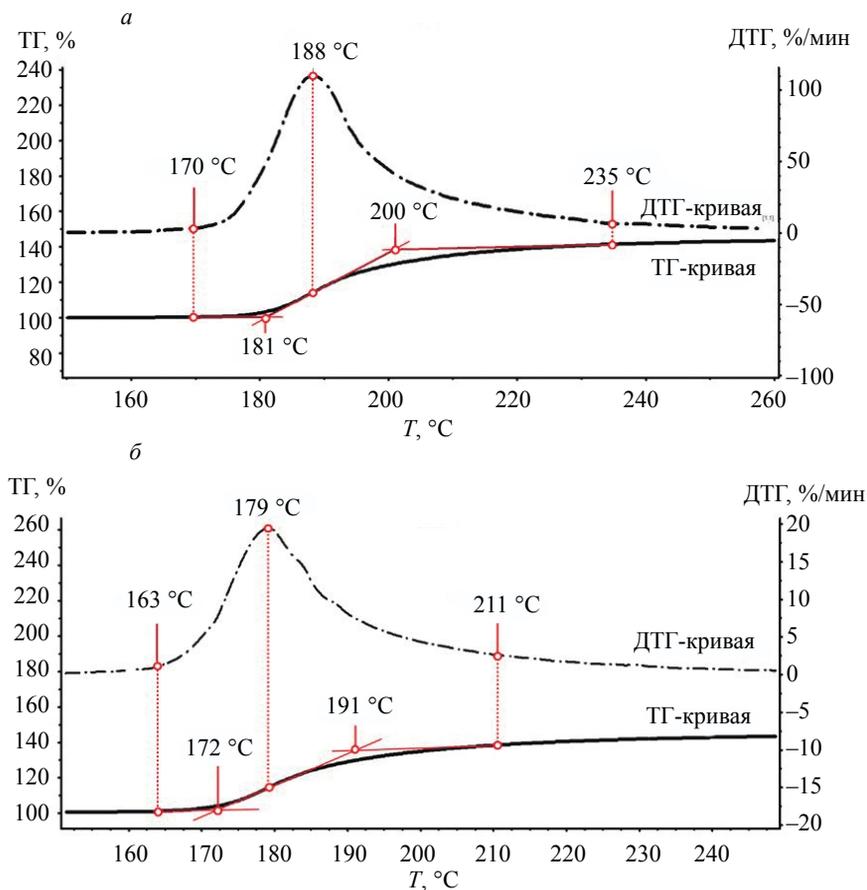


Рис. 5. ТГ- и ДТГ-зависимости ферритового образца в постоянном магнитном поле, полученные на стадии нагрева (а) и охлаждения (б).

гравиметрическая кривая — ТГ) вместе с ее первой производной, характеризующей скорость изменения веса (derivативная термогравиметрическая кривая — ДТГ).

Как правило, в качестве точки Кюри принимается температура, соответствующая максимуму ДТГ-кривой [23—26], однако в ряде работ используется иной математический аппарат для обработки экспериментальных данных. Например, в [29] находили точку пересечения касательных, проведенных по фронту ТГ-сигнала и по участку кривой после магнитного фазового перехода. В настоящей работе представлено несколько наиболее распространенных температурных характеристик переходного процесса. Так, для термограммы, полученной на стадии нагрева, можно выделить следующие температурные характеристики: 170—235 °С — температурный диапазон, при котором наблюдалось изменение веса образца (ненулевой ДТГ-сигнал); 181 и 200 °С — температурные координаты точек пересечения касательной, проведенной к фронту ТГ-кривой, и касательных, построенных для участков до и после магнитного фазового перехода соответственно; 188 °С — температура, соответствующая максимальной скорости изменения веса образца (пик ДТГ-сигнала). При этом характеристики магнитного фазового перехода, полученные на стадии охлаждения, находятся в области более низких температур. Наличие определенной инерционности при протекании магнитных фазовых превращений типа «ферромагнетик  $\rightleftharpoons$  парамагнетик» было ранее продемонстрировано в [26].

#### Анализ температурной зависимости магнитной проницаемости $\mu_0(T)$

Температурная зависимость начальной магнитной проницаемости показана на рис. 6. Изменение магнитной проницаемости наблюдалось в диапазоне температур 148—200 °С; точка перегиба графика  $\mu_0(T)$  соответствует температуре 163 °С; температурные координаты точек пересечения касательной, проведенной к точке перегиба, и касательных, построенных для стационарных участков кривой, равны 160 и 166 °С.

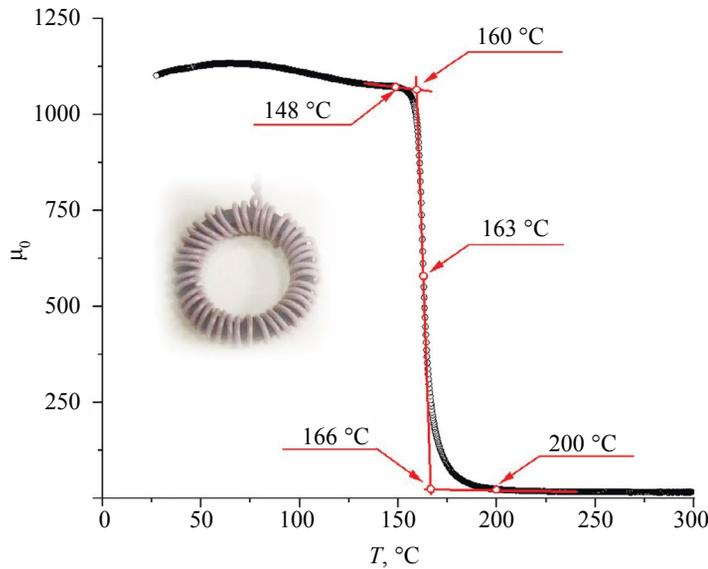


Рис. 6. Температурная зависимость начальной магнитной проницаемости ферритового тороида.

### Анализ температурной зависимости удельного электросопротивления $\rho(T)$

В полупроводниковых материалах, к которым относится рассматриваемый в работе феррит, температурная зависимость электрического сопротивления  $\rho(T)$  подчиняется экспоненциальному закону [30]. Для упрощения обработки экспериментальных данных будет рассмотрена зависимость натурального логарифма удельного электросопротивления от температуры образца  $\ln\rho(T)$  (рис. 7). На графике наблюдается незначительный излом, температурная координата которого определена путем построения диаграммы остатков к линейной аппроксимирующей модели, приведенной на этом же рисунке. Полученная температура (163 °C) совпадает с температурой, соответствующей точке перегиба ранее приведенного графика магнитной проницаемости, а также нижней границе переходного процесса изменения веса образца, изученного с помощью термомагнитометрии. Это свидетельствует о том, что излом на приведенном графике мог быть вызван переходом никель-цинкового феррита в парамагнитное состояние.

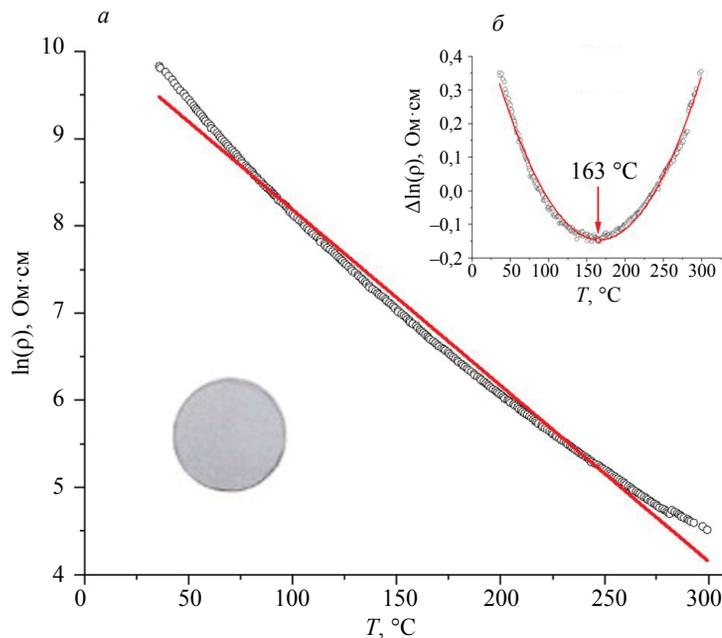


Рис. 7. Температурная зависимость удельного электросопротивления ферритовой таблетки с линейной аппроксимацией (а) и диаграмма остатков линейной модели (б).

## Сравнение экспериментальных методик определения температуры Кюри

Результаты рентгеновской дифрактометрии, доказывающие фазовую чистоту полученного образца  $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , позволяют сравнить измеренные температурные характеристики магнитных фазовых переходов в настоящей работе со значениями, полученными другими научными группами для данного состава феррита (табл. 1). Широкий разброс температур в приведенных работах свидетельствует о том, что на точку Кюри ферритмагнетиков оказывает влияние не только их фазовый состав. Большую роль играет метод обработки температурных зависимостей, однако в ряде приведенных работ подробной информации об этом нет. Кроме этого, на характер протекания магнитных фазовых превращений оказывают воздействие структурные характеристики магнитного материала [26]. Тем не менее, все температурные характеристики, полученные в настоящей работе, входят в диапазон показаний, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Точки Кюри феррита  $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 

Метод измерения	Значение точки Кюри, °С	Источник
Термомагнитометрический, стадия нагрева	188 (пик ДТГ-сигнала) 170 (начало переходного процесса)	Настоящая работа
Термомагнитометрический, стадия охлаждения	179 (пик ДТГ-сигнала) 163 (конец переходного процесса)	Настоящая работа
Магнитометрический (магнитная проницаемость)	163 (точка перегиба графика)	Настоящая работа
Регистрация удельного электросопротивления	163 (точка излома графика)	Настоящая работа
Магнитометрический (магнитная проницаемость)	187,4	[30]
Индукционный	~180	[31]
Магнитометрический (намагниченность насыщения)	~174±18	[32]
Термомагнитометрический, стадия нагрева	187 (пик ДТГ-сигнала)	[33]
Не указан	200	[34]

Необходимо принять во внимание, что полученное в настоящей работе температурное значение 163 °С соответствует точке перегиба графика зависимости  $\mu_0(T)$  и точке излома графика зависимости  $\ln\rho(T)$ , которые были зарегистрированы с использованием разработанных установок. Проведение термомагнитометрии на стадии охлаждения показало, что при данной температуре происходит завершение процесса перехода феррита в ферритмагнитное состояние. Это может свидетельствовать в пользу того, что данная температура наиболее корректно характеризует процесс магнитных фазовых превращений в феррите состава  $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$  и может быть принята в качестве его точки Кюри.

Сравнивая три рассмотренные в настоящей работе экспериментальные методики для определения температуры Кюри, можно выделить ряд их ключевых особенностей. Так, основное преимущество термомагнитометрического анализа заключается в высокой достоверности результатов измерений, связанной с калибровкой термических анализаторов по реперным точкам плавления материалов [29]. Также для проведения термомагнитометрии могут быть использованы как образцы в виде порошков, так и в виде различного рода небольших изделий. Однако высокая стоимость приборов (термогравиметрических анализаторов и синхронных термических анализаторов) определенным образом ограничивает их применение в качестве средств для изучения магнитных фазовых превращений ферритовых материалов.

Разработанные установки измерения температуры Кюри экономически доступны, а модульность конструкции существенно повышает их ремонтпригодность. Основной недостаток установки для регистрации зависимости  $\mu(T)$  состоит в том, что для проведения измерений можно использовать исключительно тороидальные ферритовые образцы. Намотка провода на ферритовый сердечник также увеличивает время проведения эксперимента. Установка, используемая для регистрации зависимостей  $\rho(T)$ , не имеет строгих требований к форме образца. Главное условие — возможность размещения на поверхности ферритового изделия измерительных зондов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регистрация температурных зависимостей магнитной проницаемости  $\mu(T)$  и удельного электросопротивления  $\rho(T)$  с использованием разработанных лабораторных установок свидетельствует о технической возможности их применения для измерения точки Кюри ферритовых материалов. В ходе проведения термомагнитометрического анализа на стадии охлаждения было обнаружено, что температура, при которой феррит  $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$  переходит в ферримагнитное состояние, соответствует температурным координатам точки перегиба графика зависимости  $\mu_0(T)$  и точки излома графика зависимости  $\ln\rho(T)$ . Установленная взаимосвязь между параметрами переходных процессов может быть полезна при изучении магнитных фазовых превращений ферритов в области температуры Кюри с помощью рассмотренных экспериментальных методик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00183, <https://rscf.ru/project/22-19-00183/>, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томская область). Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lathiya P., Kreuzer M., Wang J.* RF complex permeability spectra of Ni-Cu-Zn ferrites prepared under different applied hydraulic pressures and durations for wireless power transfer (WPT) applications // *J. Magn. Magn. Mat.* 2020. V. 499. P. 166273. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166273>
2. *Shetty C., Shastrimath V.V.D.* Pure and barium substituted bismuth ferrite as ethanol gas sensor // *Surf. Interfaces.* 2024. V. 46. P. 103942. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2024.103942>
3. *Zulqarnain M., Ali S.S., Yaqub M.A., Hira U., Khan M.I., Abdulmani Sh.A., Ikram R., Qadir R.* Synthesis, structural and opto-electrical/electronic trends of Zn/Co substituted spinel ferrites for energy conservation and supercapacitor applications // *Mater. Chem. Phys.* 2024. V. 322. P. 129567. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129567>
4. *Randoshkin V.V.* Pulsed remagnetization of ferrite-garnet films. I. Even magnetic field // *Defektoskopiya.* 1996. No. 1. P. 77—95. EDN MOVTMV.
5. *Reutov Yu.Ya.* Optimizing of magnetizing device made of high-coercive material // *Defektoskopiya.* 1997. No. 8. P. 68—72. EDN MOYND.
6. *Dhar D., Ghosh S., Mukherjee S., Dhara S., Chatterjee J., Das S.* Assessment of chitosan-coated zinc cobalt ferrite nanoparticle as a multifunctional theranostic platform facilitating pH-sensitive drug delivery and OCT image contrast enhancement // *Int. J. Pharm.* 2024. V. 654. P. 123999. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.123999>
7. *Li H., Wang J., Lv S., Chen Ch., Luo H., Wu Q., Zhang Q., Zheng H., Zheng L.* Curie temperature and magnetic permeability regulation of Cr—Mg co-doped NiCuZn ferrite for tumor hyperthermia // *Ceram. Int.* 2024. V. 50. No. 14. P. 25925. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.335>
8. *Miftahu G.I., Hafeez Y.H., Mohammed J., Abdussalam B.S., Chifu E.N.* A review on recent development in the spinel ferrites-based materials for efficient solar fuel (hydrogen) generation via photocatalytic water-splitting // *Appl. Surf. Sci. Adv.* 2023. V. 18. P. 100468. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100468>
9. *Yakubu M., Hafeez Y.H., Mohammed J., Abdussalam B.S., Chifu E.N., Miftahu G.I.* Hydrogen production via photocatalytic water splitting using spinel ferrite-based photocatalysts: Recent and future perspectives // *Next Energy.* 2024. V. 4. P. 100145. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100145>
10. *Костин В.Н., Сажина Е.Ю., Сергеев И.В.* Контроль качества никель-цинковых ферритов // *Дефектоскопия.* 1997. № 7. С. 21—24. EDN: MOYZBN.
11. *Wilhelmy S., Zimare A., Zhang Q., Rettenmayr M., Lippmann S.* Measurement of the Curie temperature based on temperature dependent thermal properties // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2021. V. 124. P. 105239. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105239>
12. *Vlasák G., Janičkovič D., Švec P.* Magnetostrictions and Curie temperature measurements of  $(\text{Fe—Co})_{91-x}\text{Mo}_8\text{Cu}_1\text{B}_x$  alloys with varying Co/Fe ratio // *J. Magn. Magn. Mat.* 2008. V. 320. No. 20. P. e754—e757. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.172>
13. *Nagy I., Pál L.* Thermoelectric Power and Electrical Resistivity of Some Ni-Based Alloys Near the Curie Point // *J. Magn. Magn. Mat.* 1973. V. 10. No. 1. P. 916—920. <https://doi.org/10.1063/1.2947053>
14. *Nishant K., Singh R.K., Sunil K., Prem K.* Tuning in optical, magnetic and Curie temperature behaviour of nickel ferrite by substitution of monovalent  $\text{K}^{+1}$  ion of  $\text{Ni}_{0,8}\text{K}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanomaterials for multifunctional applications // *Physica B Condens. Matter.* 2021. V. 606. P. 412797. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412797>
15. *Chen D., Harward I., Baptist J., Goldman S., Celinski Z.* Curie temperature and magnetic properties of aluminum doped barium ferrite particles prepared by ball mill method // *J. Magn. Magn. Mat.* 2015. V. 395. P. 350—353. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.07.076>
16. *Satyapal H.K., Singh R.K., Nishant K., Sharma S.* Low temperature synthesis and influence of rare earth  $\text{Nd}^{3+}$  substitution on the structural, magnetic behaviour of M-type barium hexa ferrite nanomaterials // *Mater. Today Proc.* 2020. V. 28. No. 1. P. 234—240. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.590>

17. Xu J., Zheng X., Xi L., Kan X., Bao B., Ma T., Zang Y., Wang D., Gao Y., Xu J., Yin W., Shen B., Wang S. Significant enhancement of magnetocaloric effects via tuning Curie temperature and magnetic anisotropy in rare-earth based compounds // *Appl. Mater. Today*. 2023. V. 35. P. 101982. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101982>
18. Беломытцев М.Ю., Кузько Е.И., Прокофьев П.А. Использование магнитометрического метода для исследования ферритно-мартенситных сталей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 11. С. 41—46. EDN: ZQZYPJ. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2017-83-11-41-46>
19. Найден Е.П., Журавлев В.А., Суслев В.И., Минин Р.В., Итин В.И., Коровин Е.Ю. Параметры структуры и магнитные свойства полученных методом свс кобальт содержащих гексаферритов системы  $Me_2W$  // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 9. С. 87—95. EDN: MWKJJR.
20. Баделин А.Г., Карнасюк В.К., Меркулов Д.И., Еремина Р.М., Яцык И.В., Шестаков А.В., Эстемирова С.Х. Влияние допирования железом на структурные, магнитные и электрические характеристики манганитов системы  $La_{0.7}Sr_{0.3}Mn_{0.9}Zn_{0.1-x}Fe_xO_3$  ( $0 \leq x \leq 0,1$ ) // Перспективные материалы. 2019. № 11. С. 49—58. EDN: OFVSJZ. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2019-11-49-58>
21. Tian F., Zhao Q., Guo J., Zhang Y., Chang T., Zhang R., Adil M., Zhou C., Cao K., Yang S. The spin glass and zero-field cooling exchange bias effect observed above the curie temperature in Ni<sub>2</sub>MnSb polycrystalline Heusler alloy // *Scr. Mater.* 2024. V. 245. P. 116055. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2024.116055>
22. Warne S.St.J., Gallagher P.K. Thermomagnetometry // *Thermochim. Acta*. 1987. V. 110. P. 269—279. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(87\)88235-7](https://doi.org/10.1016/0040-6031(87)88235-7)
23. Yu X., Rahman M.M., Yang R., Wu C., Bouyahya A., Zhang W. Effect of Al<sup>3+</sup> doping on magnetic properties of Zn-Mn ferrite nanoparticles for magnetic induction hyperthermia // *J. Magn. Magn. Mat.* 2024. V. 591. P. 171724. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.171724>
24. Nikolaev E., Lysenko E., Surzhikov A., Bobuyok S. The Influence of Thermomagnetometric Measurement Conditions on the Recorded Curie Temperature of Cobalt-Zinc Ferrite // *Emerging Trends in Materials Research and Manufacturing Processes*. 2023. P. 1—10. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-38964-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-38964-1_1)
25. Bobuyok S., Surzhikov A.P., Lysenko E.N., Nikolaev E.V., Salnikov V.D. Magnetic Properties of a Nickel-Zinc Ferrite Powder with Different Degrees of Dispersion // *Phys. Met. Metall.* 2024. V. 125. P. 355—362. <https://doi.org/10.1134/S0031918X2460012X>
26. Bobuyok S.A., Surzhikov A.P., Nikolaev E.V., Vlasov V.A., Lysenko E.N. A Study of Magnetic Phase Transitions in Nickel Zinc Ferrites with Differing Structure // *Russ. Phys. J.* 2024. V. 67. No. 5. P. 675—683. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03166-5>
27. El-Fadl A.A., Hassan A.M., Mahmoud M.H., Tatarchuk T., Yaremiy I.P., Gismelssed A.M., Ahmed M.A. Synthesis and magnetic properties of spinel  $Zn_{1-x}Ni_xFe_2O_4$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0$ ) nanoparticles synthesized by microwave combustion method // *J. Magn. Magn. Mat.* 2019. V. 471. P. 192—199. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.074>
28. Anupama M.K., Srinatha N., Matteppanavar S., Angadi B., Sahoo B., Rudraswamy B. Effect of Zn substitution on the structural and magnetic properties of nanocrystalline  $NiFe_2O_4$  ferrites // *Ceram. Int.* 2024. V. 44. № 5. P. 4946—4954. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.087>
29. Шупицын А.П., Непомилуев А.М., Тюрина А.Е. Стандартные образцы температуры фазовых переходов (температуры Кюри) на основе алюминия, никеля и силицида железа // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19. № 2. С. 35—46. EDN: PLSGBE. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-2-35-46>
30. Li L.Z., Zhong X.X., Wang R., Tu X.Q., He L., Wang F.H. Effects of Ce substitution on the structural and electromagnetic properties of NiZn ferrite // *J. Magn. Magn. Mat.* 2019. V. 475. P. 1—4. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.110>
31. Mattei J.L., Guen E.L., Chevalier A., Tarot A.C. Experimental determination of magnetocrystalline anisotropy constants and saturation magnetostriction constants of NiZn and NiZnCo ferrites intended to be used for antennas miniaturization // *J. Magn. Magn. Mat.* 2015. V. 374. P. 762—768. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.026>
32. Virden A.E., O'Grady K. Structure and magnetic properties of NiZn ferrite nanoparticles // *J. Magn. Magn. Mat.* 2005. V. 290—291. P. 868—870. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.398>
33. Николаев Е.В., Лысенко Е.Н., Бобуек С., Суржиков А.П. Исследование магнитных свойств никель-цинковых ферритов термомагнитометрическим методом // Известия вузов. Физика. 2023. Т. 66. № 5. С. 112. EDN: LJFASK.
34. Ramesh S., Patro L.N., Dhanalakshmi B., Chandrasekhar B., Babu T.A., Naidu K.C.B., Rao B.P. Magnetic properties of Mn/Co substituted nano and bulk Ni-Zn ferrites: A comparative study // *Mater. Chem. Phys.* 2023. V. 306. 128055. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128055>

## REFERENCES

1. Lathiya P., Kreuzer M., Wang J. RF complex permeability spectra of Ni-Cu-Zn ferrites prepared under different applied hydraulic pressures and durations for wireless power transfer (WPT) applications // *J. Magn. Magn. Mat.* 2020. V. 499. P. 166273. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166273>

2. Shetty C., Shastrimath V. V.D. Pure and barium substituted bismuth ferrite as ethanol gas sensor // Surf. Interfaces. 2024. V. 46. P. 103942. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.103942>
3. Zulqarnain M., Ali S.S., Yaqub M.A., Hira U., Khan M.I., Abdulmani Sh.A., Ikram R., Qadir R. Synthesis, structural and opto-electrical/electronic trends of Zn/Co substituted spinel ferrites for energy conservation and supercapacitor applications // Mater. Chem. Phys. 2024. V. 322. P. 129567. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129567>
4. Randoshkin V.V. Pulsed remagnetization of ferrite-garnet films. I. Even magnetic field // Defektoskopiya. 1996. No. 1. P. 77—95. EDN MOVTMV.
5. Reutov Yu.Ya. Optimization of magnetizing device made of high-coercive material // Defektoskopiya. 1997. No. 8. P. 68—72. EDN MOYNDD.
6. Dhar D., Ghosh S., Mukherjee S., Dhara S., Chatterjee J., Das S. Assessment of chitosan-coated zinc cobalt ferrite nanoparticle as a multifunctional theranostic platform facilitating pH-sensitive drug delivery and OCT image contrast enhancement // Int. J. Pharm. 2024. V. 654. P. 123999. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.123999>
7. Li H., Wang J., Lv S., Chen Ch., Luo H., Wu Q., Zhang Q., Zheng H., Zheng L. Curie temperature and magnetic permeability regulation of Cr—Mg co-doped NiCuZn ferrite for tumor hyperthermia // Ceram. Int. 2024. V. 50. No. 14. P. 25925. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.335>
8. Miftahu G.I., Hafeez Y.H., Mohammed J., Abdussalam B.S., Chifu E.N. A review on recent development in the spinel ferrites-based materials for efficient solar fuel (hydrogen) generation via photocatalytic water-splitting // Appl. Surf. Sci. Adv. 2023. V. 18. P. 100468. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100468>
9. Yakubu M., Hafeez Y.H., Mohammed J., Abdussalam B.S., Chifu E.N., Miftahu G.I. Hydrogen production via photocatalytic water splitting using spinel ferrite-based photocatalysts: Recent and future perspectives // Next Energy. 2024. V. 4. P. 100145. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100145>
10. Kostin V.N., Sazhina E.Yu., Sergeev I.V. Quality Control of Ni-Zn-Ferrites // Defektoskopiya. 1997. V 7. P. 21—24. EDN: MOYZBN.
11. Wilhelmy S., Zimare A., Zhang Q., Rettenmayr M., Lippmann S. Measurement of the Curie temperature based on temperature dependent thermal properties // Int. Commun. Heat Mass Transf. 2021. V. 124. P. 105239. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105239>
12. Vlasák G., Janičkovič D., Švec P. Magnetostriptions and Curie temperature measurements of (Fe—Co)<sub>91-x</sub>Mo<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub>B<sub>x</sub> alloys with varying Co/Fe ratio // J. Magn. Magn. Mat. 2008. V. 320. No. 20. P. e754—e757. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.172>
13. Nagy I., Pál L. Thermoelectric Power and Electrical Resistivity of Some Ni-Based Alloys Near the Curie Point // J. Magn. Magn. Mat. 1973. V. 10. No. 1. P. 916—920. <https://doi.org/10.1063/1.2947053>
14. Nishant K., Singh R.K., Sunil K., Prem K. Tuning in optical, magnetic and Curie temperature behaviour of nickel ferrite by substitution of monovalent K<sup>+</sup> ion of Ni<sub>0.8</sub>K<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanomaterials for multifunctional applications // Physica B Condens. Matter. 2021. V. 606. P. 412797. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412797>
15. Chen D., Harward I., Baptist J., Goldman S., Celinski Z. Curie temperature and magnetic properties of aluminum doped barium ferrite particles prepared by ball mill method // J. Magn. Magn. Mat. 2015. V. 395. P. 350—353. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.07.076>
16. Satyapal H.K., Singh R.K., Nishant K., Sharma S. Low temperature synthesis and influence of rare earth Nd<sup>3+</sup> substitution on the structural, magnetic behaviour of M-type barium hexa ferrite nanomaterials // Mater. Today Proc. 2020. V. 28. No. 1. P. 234—240. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.590>
17. Xu J., Zheng X., Xi L., Kan X., Bao B., Ma T., Zang Y., Wang D., Gao Y., Xu J., Yin W., Shen B., Wang S. Significant enhancement of magnetocaloric effects via tuning Curie temperature and magnetic anisotropy in rare-earth based compounds // Appl. Mater. Today. 2023. V. 35. P. 101982. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101982>
18. Belomytsev M.Iu., Kuz'ko E.I., Prokof'ev P.A. Ispol'zovanie magnitometricheskogo metoda dlia issledovaniia ferritno-martensitnykh stalei // Zavodskaiia laboratoriiia. Diagnostika materialov. 2017. V. 83. № 11. P. 41—46. EDN: ZQZYPJ
19. Naiden E.P., Zhuravlev V.A., Susliaev V.I., Minin R.V., Itin V.I., Korovin E.U. Parametry struktury i magnitnye svoistva poluchennykh metodom svk kobal't soderzhashchikh geksaferritov sistemy ME<sub>2</sub>W // Izvestiia vuzov. Fizika. 2010. V. 53. № 9. S. 87—95. EDN: MWKJJR.
20. Badelin A.G., Karpasiuk V.K., Merkulov D.I., Eremina R.M., Iatsyk I.V., Shestakov A.V., Estemirova S.H. Vliianie dopirovaniia zhelezom na strukturnye, magnitnye i elektricheskie kharakteristiki manganitov sistemy La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>Mn<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (0 ≤ x ≤ 0,1) // Perspektivnye materialy. 2019. V 11. S. 49—58. EDN: OFVSJZ. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2019-11-49-58>
21. Tian F., Zhao Q., Guo J., Zhang Y., Chang T., Zhang R., Adil M., Zhou C., Cao K., Yang S. The spin glass and zero-field cooling exchange bias effect observed above the curie temperature in Ni,MnSb polycrystalline Heusler alloy // Scr. Mater. 2024. V. 245. P. 116055. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2024.116055>
22. Warne S.St.J., Gallagher P.K. Thermomagnetometry // Thermochim. Acta. 1987. V. 110. P. 269—279. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(87\)88235-7](https://doi.org/10.1016/0040-6031(87)88235-7)
23. Yu X., Rahman M.M., Yang R., Wu C., Bouyahya A., Zhang W. Effect of Al<sup>3+</sup> doping on magnetic properties of Zn-Mn ferrite nanoparticles for magnetic induction hyperthermia // J. Magn. Magn. Mat. 2024. V. 591. P. 171724. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.171724>

24. Nikolaev E., Lysenko E., Surzhikov A., Bobuyok S. The Influence of Thermomagneto-metric Measurement Conditions on the Recorded Curie Temperature of Cobalt-Zinc Ferrite // *Emerging Trends in Materials Research and Manufacturing Processes*. 2023. P. 1—10. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-38964-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-38964-1_1)
25. Bobuyok S., Surzhikov A.P., Lysenko E.N., Nikolaev E.V., Salnikov V.D. Magnetic Properties of a Nickel—Zinc Ferrite Powder with Different Degrees of Dispersion // *Phys. Met. Metall.* 2024. V. 125. P. 355—362. <https://doi.org/10.1134/S0031918X2460012X>
26. Bobuyok S.A., Surzhikov A.P., Nikolaev E.V., Vlasov V.A., Lysenko E.N. A Study of Magnetic Phase Transitions in Nickel Zinc Ferrites with Differing Structure // *Russ. Phys. J.* 2024. V. 67. No. 5. P. 675—683. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03166-5>
27. El-Fadl A.A., Hassan A.M., Mahmoud M.H., Tatarchuk T., Yaremiy I.P., Gismelssed A.M., Ahmed M.A. Synthesis and magnetic properties of spinel  $Zn_{1-x}Ni_xFe_2O_4$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0$ ) nanoparticles synthesized by microwave combustion method // *J. Magn. Magn. Mat.* 2019. V. 471. P. 192—199. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.074>
28. Anupama M.K., Srinatha N., Matteppanavar S., Angadi B., Sahoo B., Rudraswamy B. Effect of Zn substitution on the structural and magnetic properties of nanocrystalline  $NiFe_2O_4$  ferrites // *Ceram. Int.* 2024. V. 44. № 5. P. 4946—4954. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.087>
29. Shipitsyn A.P., Nepomiluev A.M., Tiurnina A.E. Standartnye obraztsy temperatury fazovykh perekhodov (temperatury Kiuri) na osnove aliumeli, nikelia i silitsida zheleza // *Etalony. Standartnye obraztsy*. 2023. V. 19. No. 2. P. 35—46. EDN: PLSGBE. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-2-35-46>
30. Li L.Z., Zhong X.X., Wang R., Tu X.Q., He L., Wang F.H. Effects of Ce substitution on the structural and electromagnetic properties of NiZn ferrite // *J. Magn. Magn. Mat.* 2019. V. 475. P. 1—4. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.110>
31. Mattei J.L., Guen E.L., Chevalier A., Tarot A.C. Experimental determination of magnetocrystalline anisotropy constants and saturation magnetostriction constants of NiZn and NiZnCo ferrites intended to be used for antennas miniaturization // *J. Magn. Magn. Mat.* 2015. V. 374. P. 762—768. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.026>
32. Virden A.E., O'Grady K. Structure and magnetic properties of NiZn ferrite nanoparticles // *J. Magn. Magn. Mat.* 2005. V. 290—291. P. 868—870. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.398>
33. Nikolaev E.V., Lysenko E.N., Bobuyok S., Surzhikov A.P. Issledovanie magnitnykh svoystv nikel'-tsinkovykh ferritov termomagnitometricheskim metodom // *Izvestiia vuzov. Fizika*. 2023. V. 66. No. 5. P. 112. EDN: LJFASK.
34. Ramesh S., Patro L.N., Dhanalakshmi B., Chandrasekhar B., Babu T.A., Naidu K.C.B., Rao B.P. Magnetic properties of Mn/Co substituted nano and bulk Ni—Zn ferrites: A comparative study // *Mater. Chem. Phys.* 2023. V. 306. P. 128055. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128055>

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВА СЕРЫ МЕТОДОМ ПРОТОННОЙ МИКРОСКОПИИ

© 2024 г. А.О. Хурчиев<sup>1,\*</sup>, Р.О. Гаврилин<sup>1</sup>, А.В. Скобляков<sup>1</sup>, А.В. Канцырев<sup>1</sup>,  
А.А. Голубев<sup>1</sup>, В.Б. Минцев<sup>2</sup>, Д.Н. Николаев<sup>2</sup>, Н.С. Шилкин<sup>2</sup>, Р.С. Беликов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Россия 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, 1

<sup>2</sup>ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
Россия 142432 Черноголовка, пр-кт Академика Семенова, 1

<sup>3</sup>Goethe University Frankfurt, Altenhoferallee 1, 60438, Frankfurt am Main, Germany  
E-mail: \*ayuxa@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.07.2024; после доработки 19.08.2024

Принята к публикации 20.08.2024

Сера — вещество с аномальной зависимостью вязкости от температуры. Была создана экспериментальная установка для исследования вязкости серы при давлениях до 100 бар и температурах до 500 °С. Для визуализации процесса падения шарика из карбида вольфрама, расположенного в расплаве серы, использовался метод протонной радиографии. Эксперимент проводился на протонном микроскопе PRIOR-II (Институт тяжелых ионов исследований, GSI, Дармштадт, Германия). В данном эксперименте для протонной радиографии впервые применялся режим работы ускорителя SIS-18 с медленным выводом пучка. Была измерена вязкость расплава серы при давлении 90 бар и температурах 190—320 °С. Показано, что на вязкость серы имеют большое влияние примеси, в том числе сероводород, который появляется в расплаве серы при высоких температурах.

*Ключевые слова:* вязкость, сера, протонный микроскоп, протонная радиография, метод Стокса.

## MEASURING THE VISCOSITY OF MELT SULFUR BY PROTON MICROSCOPY METHOD

© 2024 A.O. Khurchiev<sup>1,\*</sup>, R.O. Gavrilin<sup>1</sup>, A.V. Skobliakov<sup>1</sup>, A.V. Kantsyrev<sup>1</sup>,  
A.A. Golubev<sup>1</sup>, V.B. Mintsev<sup>2</sup>, D.N. Nikolaev<sup>2</sup>, N.S. Shilkin<sup>2</sup>, R.S. Belikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NRC “Kurchatov institute”, Russia 123182 Moscow, pl. Akademika Kurchatova, 1

<sup>2</sup>Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS,  
Russia 142432 Chernogolovka, prosp. Akademika Semenova, 1

<sup>3</sup>Goethe University Frankfurt, Altenhoferallee 1, 60438, Frankfurt am Main, Germany  
E-mail: \*ayuxa@inbox.ru

Sulfur is a substance with an abnormal dependence of viscosity on temperature. An experimental setup was created to study the viscosity of sulfur at pressures up to 100 bar and temperatures up to 500 °C. To visualize the process of falling of a tungsten carbide ball located in molten sulfur, the proton radiography method was used. The experiment was carried out on a PRIOR-II proton microscope (Institute for Heavy Ion Research, GSI, Darmstadt, Germany). In this experiment, the operating mode of the SIS-18 accelerator with slow beam extraction was used for the first time for proton radiography. The viscosity of the sulfur melt was measured at a pressure of 90 bar and temperatures of 190—320 °C. It has been shown that the viscosity of sulfur is greatly influenced by impurities, including hydrogen sulfide, which appears in the molten sulfur at high temperatures.

*Keywords:* viscosity, sulfur, proton microscope, proton radiography, Stokes method.

DOI: 10.31857/S0130308224100035

## ВВЕДЕНИЕ

Сера — вещество, которое имеет аномальную зависимость вязкости от температуры. Сера при атмосферном давлении плавится при температуре 113 °С, достигая минимального значения вязкости  $7 \cdot 10^{-3}$  Па·с при температуре 160 °С (точка  $\lambda$ -перехода). При дальнейшем нагреве серы происходит ее полимеризация, что ведет к резкому увеличению вязкости серы на несколько порядков: максимальное значение вязкости достигает 93,3 Па·с при температуре 187 °С. Дальнейшее увеличение температуры ведет к постепенному уменьшению вязкости расплава серы до 0,1 Па·с при температуре кипения [1]. При этом температурная зависимость уменьшения вязкости после максимума имеет отличный характер от поведения до точки  $\lambda$ -перехода.

Сера широко изучалась во второй половине прошлого столетия из-за ее необычных свойств в жидком состоянии. Однако большинство работ проводилось при атмосферном давлении [2]. Первые исследования влияния давления на вязкость серы были сделаны в работе [3] с помощью

вискозиметрии. В данной работе установка для определения скорости движения шара по наклонной плоскости полностью погружалась в расплав жидкой серы. Измерения проводились в диапазоне давлений от 1 до 100 бар и при температурах от 165 до 305 °С, полученные результаты показали высокую корреляцию с существующими на тот период времени моделями [4]. Развитие математической модели для описания вязкости серы было продолжено в работах [5—7], основанных на описании полимерных цепочек серы. В [8] была получена экспериментальная кривая вязкости серы в зависимости от температуры. В [9] измерялось изменение вязкости серы в зависимости от температуры при давлении 9,7 ГПа. Полученные экспериментальные результаты показали хорошее согласие с расчетами, проведенными в [10]. Работа [11] была посвящена измерению вязкости серы при давлении 4,5 ГПа и температурах 727 и 1100 °С. Изучение свойств серы также интересно с точки зрения процессов, протекающих на других планетах. Так, например, атмосфера Венеры, состоящая в основном из углекислого газа и азота, содержит небольшое количество серы, которая участвует в цикле окисления. Кроме того, предполагается наличие расплавленной серы на поверхности Венеры, которая может образовывать реки и каналы. Определяя в лабораторных условиях размер цепочек серы по измерениям ее вязкости, можно делать косвенные выводы о процессах, происходящих на поверхности планеты. В данной работе представлены результаты измерения вязкости серы при давлении 90 бар и температуре в диапазоне от 190 до 320 °С.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Один из наиболее распространенных методов измерения вязкости жидкости — метод Стокса, основанный на измерении скорости падения тестового сферического объекта в жидкости. Для обеспечения давления 90 бар в процессе эксперимента при нагреве серы до температуры 320 °С использовалась титановая трубка диаметром 12,7 мм, толщиной стенки 1,24 мм и длиной 106 мм. При подготовке сборки к облучению вольфрамовая трубка заполнялась порошковой серой. Чистота изначального материала составляла 99,992 %. Затем в трубку помещался тестовый объект в виде шара, изготовленного из карбида вольфрама, диаметром 2 мм. Затем происходил нагрев сборки до температуры плавления серы. Итерационно сборка заполнялась расплавом серы до заполнения внутренних полостей и достижения необходимого уровня расплава в трубке. Нагрев и отпуск производились при атмосферных условиях.

Конструкция экспериментальной установки позволяла дистанционно переворачивать трубку вокруг горизонтальной оси, запуская процесс падения шара из карбида вольфрама. Нагрев трубки осуществлялся с помощью двух резистивных электронагревательных элементов. Для контроля температуры использовались два термопарных датчика фирмы Omega типа К с погрешностью измерений  $\pm 2,5$  °С. Первый из датчиков был непосредственно вмонтирован в

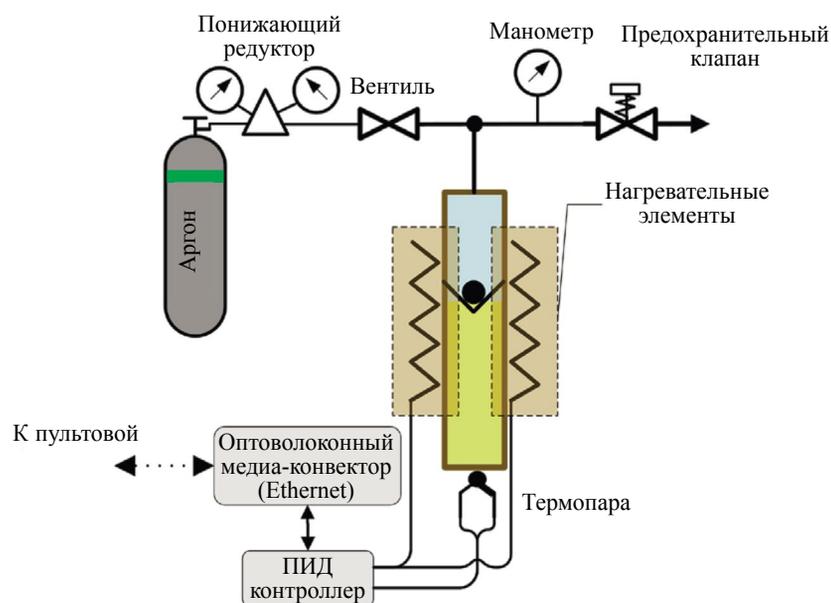


Рис. 1. Схема мишенной части установки для исследования вязкости расплава серы методом протонной микроскопии.

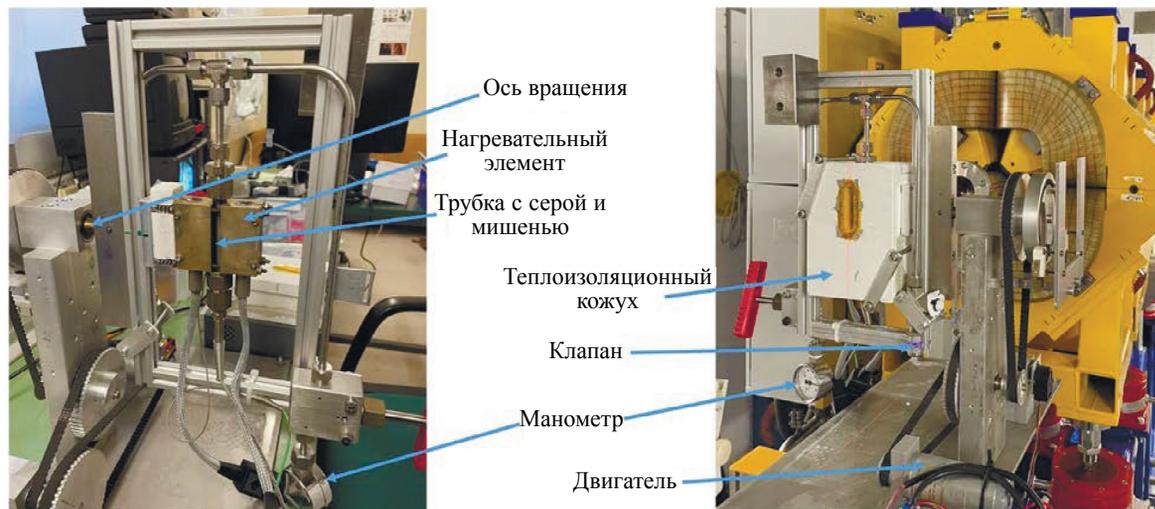


Рис. 2. Установка для измерения вязкости серы. Слева — фотография поворотного узла с титановой трубкой, заполняемой серой при снятом термокожухе. Справа — общий вид установки на фоне квадрупольных электромагнитных линз (желтого цвета) системы формирования протонно-радиографических изображений протонного микроскопа PRIOR-II.

латунный держатель нагревателя, второй был установлен в торце титановой трубки. Управление нагревом, а также считывание сигналов с термопарных датчиков осуществлялось с помощью регулятора UR4848xA Universal Controller фирмы Wachendorf. Для создания повышенного давления в титановой трубке используется буферный газ—аргон с заявленной чистотой по содержанию примесей 99,998 % (20 ppm). Давление газа регулировалось с помощью предохранительного пружинного клапана фирмы Swagelok 177-R3A-K1-C, рассчитанного на рабочее давление от 51,7 до 103 бар. В проведенных экспериментах предохранительный клапан был настроен на давление 90 бар с ошибкой установки давления до 20 %.

Поскольку расплав серы и шарик из карбида вольфрама расположены в титановой трубке с толстой стенкой, для визуализации процесса падения шарика применяли метод высокоэнергетической протонной микроскопии [12]. Высокоэнергетическая протонная микроскопия при энергии протонов  $>1$  ГэВ обеспечивает лучшее пространственное разрешение и проникающую способность по сравнению с методом рентгеновской радиографии. Эксперимент по измерению вязкости серы проводился на протонном микроскопе PRIOR II ускорителя SIS-18 (Общество тяжелоионных исследований GSI (Германия, Дармштадт)) при энергии протонов 2,5 ГэВ. Установка PRIOR II является усовершенствованной версией ранее созданного протонного микроскопа PRIOR [13] с применением высокостабильных электромагнитных квадрупольных линз в системе формирования изображений взамен квадрупольных линз на постоянных магнитах. Схема расположения квадрупольных линз и настройка их токов обеспечивают формирование изображения в плоскости регистрации. Протонно-радиографические изображения исследуемого объекта получены с увеличением 3,49. Также установка обеспечивает возможность регулировки контраста изображений. Предельное полученное пространственное разрешение данной установки для исследуемого объекта составило  $\sim 40$  мкм при размерах исследуемой области  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>. В данном эксперименте для протонной радиографии впервые применялся режим работы ускорителя SIS-18 с медленным выводом пучка. Длительность прохождения пучка протонов сквозь образец составляла 2 с. Высокая плотность исследуемого материала и высокий средний Z материала шарика позволили получить изображения с хорошим контрастом.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Протонно-радиографическое изображение формировалось на сцинтилляционном детекторе CsI:Tl в виде пластины  $120 \times 120$  мм<sup>2</sup> и толщиной 6 мм и регистрировалось с помощью цифровой камеры PCO DIMAX. Режим работы цифровой камеры позволял получить серию из 45 кадров с экспозицией 40 мс каждого кадра и временем задержки между кадрами 5 мс. При обработке экспериментальные данные брались из одного цикла нагрева. На рис. 3 показано несколько протонно-радиографических изображений, полученных в различные моменты времени от начала падения шарика в расплаве серы. Как видно из графика, приведенного на рис. 4, движение шарика носит равномерный характер.

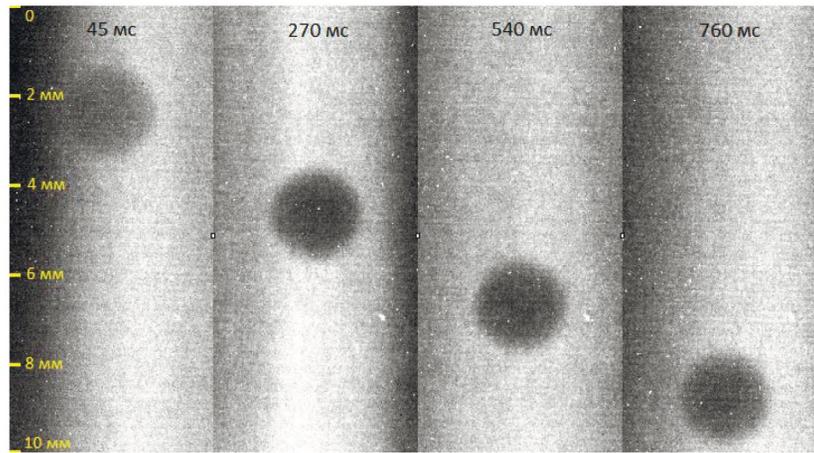


Рис. 3. Протонно-радиографические изображения шарика в расплаве серы в различные моменты времени. Температура расплава серы 286 °С и давление 90 бар.

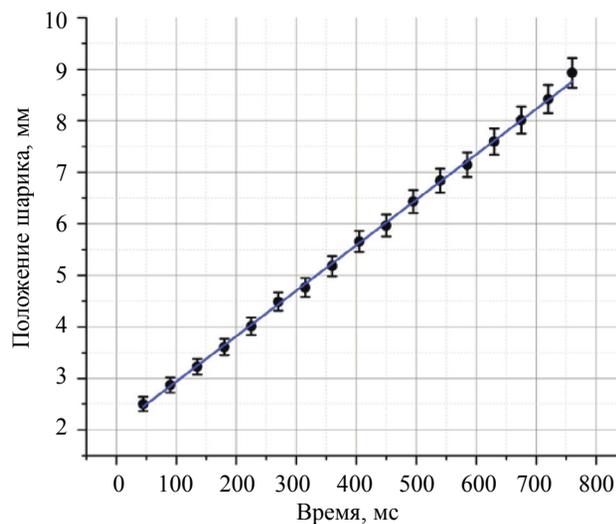


Рис. 4. Положение шарика из карбида вольфрама в расплаве серы в различные моменты времени. Температура расплава серы 286 °С и давление 90 бар.

После обработки полученных изображений была построена зависимость скорости падения шарика от температуры расплава серы (рис. 5).

При измерении вязкости серы методом Стокса будем использовать зависимость из работы [11]:

$$\eta = \frac{2gr_s^2(\rho_s - \rho_l)}{9v} \left[ \frac{1 - 2,104 \left(\frac{r_s}{r_c}\right) + 2,09 \left(\frac{r_s}{r_c}\right)^3 - 0,95 \left(\frac{r_s}{r_c}\right)^5}{1 + 3,3 \left(\frac{r_s}{h}\right)} \right], \quad (1)$$

где  $r_s$  — радиус шарика;  $r_c$  — радиус трубки;  $h$  — высота трубки;  $\rho_s$  — плотность шара;  $\rho_l$  — плотность расплава;  $v$  — скорость движения шара.

Поскольку при измерениях методом Стокса вязкость серы определяется через разность плотностей шарика ( $\rho_s = 15,77 \text{ г/см}^3$ ) и расплава ( $\rho_l = 1,6 - 1,9 \text{ г/см}^3$ ), то изменение плотности расплава серы вносит ошибку на уровне 1—1,5 %. На рис. 6 представлены полученные значения вязкости серы при давлении 90 бар в сравнении с экспериментальными данными из работы [3] при давлении 100 атм. и расчетом по аналитической модели, предложенной в работе [14].

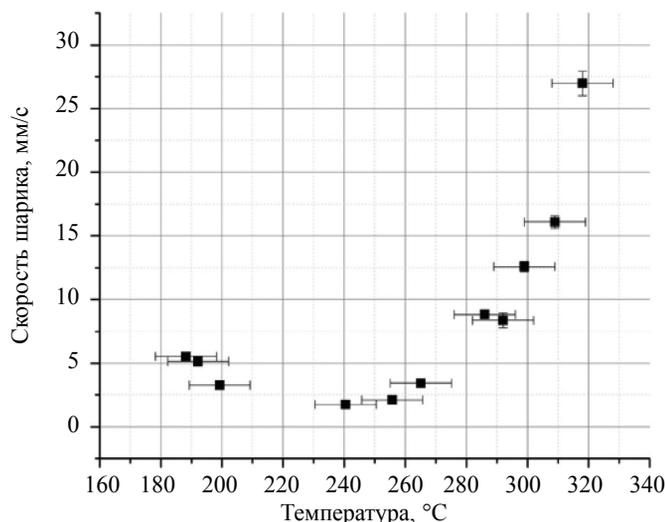


Рис. 5. Скорость падения шарика в зависимости от температуры расплава серы при давлении 90 бар.

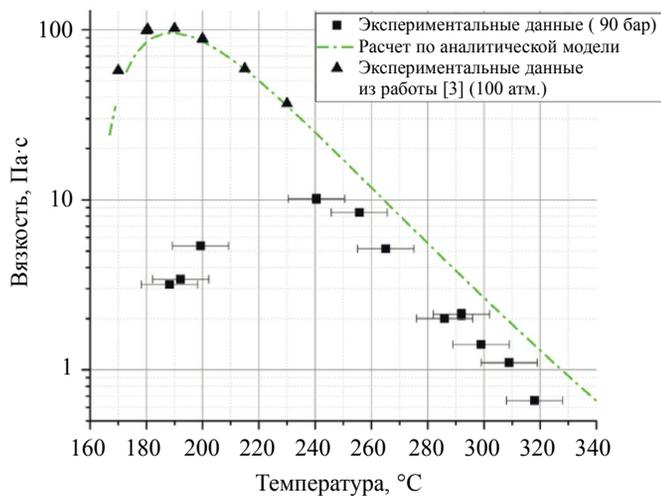


Рис. 6. Вязкость расплава серы в зависимости от температуры. Черные квадраты — экспериментальные данные, полученные в данной работе при давлении 90 бар; черные треугольники — экспериментальные данные из работы [3] при давлении 100 атм.; штрихпунктирная кривая — расчет по аналитической модели из работы [14].

Из рис. 6 видно, что значения полученных экспериментальных данных находятся ниже расчетных значений вязкости серы. Кроме того, полученное максимальное значение вязкости смещено в сторону более высоких температур по сравнению с расчетным значением. Известно [14—16], что на вязкость серы большое влияние имеют различные примеси. Примеси в расплавленной сере могут быть как продуктом элементов загрязнения стенок сосуда, так и сероводородом. Последний является продуктом дегидрирования углеводородов, когда дирадикалы серы вступают в химическую реакцию с углеводородами из стандартного остатка. Реакция серы с алифатическими углеводородами происходит при температурах выше 160 °C. На рис. 7 представлено два протонно-радиографических изображения расплава серы с шариком из карбида вольфрама в различные моменты времени. На изображениях можно заметить границу, предположительно пузыря сероводорода или аргона, движение которого направлено противоположно направлению движения шарика.

В работе [15] была предложена модифицированная аналитическая модель из работы [14] для расчета вязкости серы, которая учитывает концентрацию примеси сероводорода в расплаве:

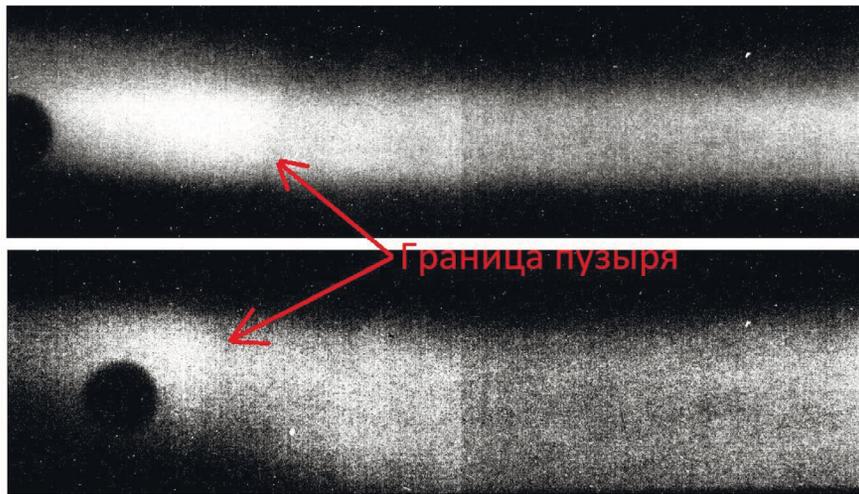


Рис. 7. Протонно-радиографические изображения расплава серы в различные моменты времени. Стрелками обозначены граница пузыря.

$$\eta = \varphi^2 RT \left( 1 - \frac{2}{\varphi N} \right) \sqrt{N \exp \left( a_2 + \frac{a_3}{T} \right)}, \quad (2)$$

где  $a_2 = -47,49$  и  $a_3 = 22827$  — коэффициенты, используемые для представления константы трения при движении Рауза и константы скорости первого порядка разрыва связей S—S;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — температура расплава;  $N$  — средний коэффициент полимеризации:

$$\ln N = \frac{7550}{T} - 4,14 + \ln \varphi; \quad (3)$$

$$\varphi = \left( 1 - \exp \left( -1610 \left[ \frac{1}{432} - \frac{1}{T} \right] \right) \right) f(T)_{\text{CDF}}; \quad (4)$$

$$f(T)_{\text{CDF}} = 1 - \exp \left( - \left[ \frac{T - 432}{\beta} \right]^\alpha \right), \quad (5)$$

где  $\varphi$  — объемная доля длинных полимерных цепочек серы;  $f(T)_{\text{CDF}}$  — функция распределения Вейбулла.

$$\alpha = p_1 \ln(W_{\text{H}_2\text{S}} + p_2) - p_3; \quad (6)$$

$$\beta = q_1 \ln(W_{\text{H}_2\text{S}} + q_2) - q_3, \quad (7)$$

где  $p_1 = 0,709$ ;  $p_2 = 117$ ;  $p_3 = 2,51$ ;  $q_1 = 101,2$ ;  $q_2 = 142,56$ ;  $q_3 = 496,9$ ;  $W_{\text{H}_2\text{S}}$  — концентрация сероводорода. Точные значения коэффициентов получены в работе [15].

Экспериментальные значения вязкости серы в сравнении с аналитической моделью [15] представлены на рис. 8.

Расчеты, проведенные с помощью вышеприведенной аналитической модели, показали, что наилучшее согласие с полученными экспериментальными данными достигается при массовой доле сероводорода  $W_{\text{H}_2\text{S}} = 140$  ppmw. Расхождение экспериментальных данных с расчетной кривой при температурах выше 280 °C можно объяснить тем, что существует градиент температуры между термопарой, титановой трубкой и самой серой. Максимальная вязкость, измеренная в проведенных экспериментах, составила  $\eta_{\text{max}} = (10,2 \pm 0,6)$  Па·с.

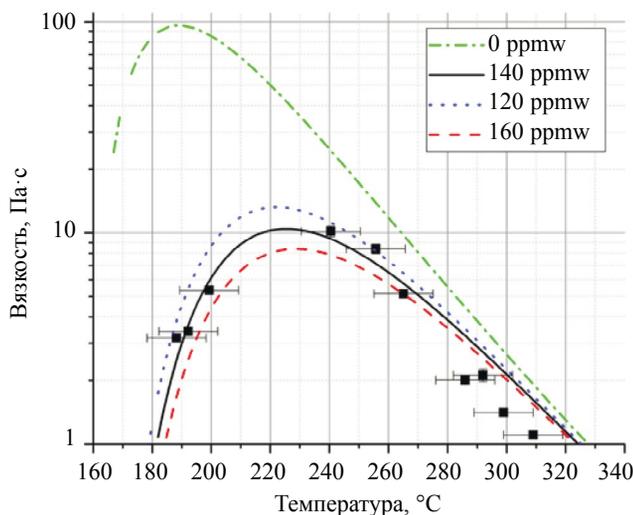


Рис. 8. Вязкость расплава серы в зависимости от температуры при давлении 90 бар. Черные точки — экспериментальные данные. Линии соответствуют теоретическим расчетам [14]: сплошная — массовой доле сероводорода 140 ppmw; пунктирная — 120 ppmw; штриховая — 160 ppmw; штрихпунктирная — вязкости серы без примесей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты измерения вязкости расплава серы в диапазоне температур 190—320 °С и давлении 90 бар методом Стокса. Измерения проводились на установке по протонной радиографии с использованием медленного вывода пучка протонов с длительностью импульса 2 с при энергии протонов 2,5 ГэВ с синхротрона SIS-18. Полученная экспериментальная зависимость вязкости серы от температуры согласуется с расчетными значениями при массовой доле сероводорода в расплаве в количестве 140 ppmw. Максимальное значение вязкости серы составило  $\eta_{\max} = (10,2 \pm 0,6)$  Па·с при давлении 90 бар и при температуре расплава серы 240 °С. Проведенный эксперимент показывает перспективность методики протонной микроскопии при изучении медленных динамических процессов.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» и ФИЦ ПХФиМХ (регистрационный номер 124020600049-8).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sofekun G.O. Rheometric Properties of Pure Liquid Elemental Sulfur. Master's thesis. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017.
2. Steudel R. Liquid sulfur // Top. Curr. Chem. 2003. No. 230. P. 81—116.
3. Doi T. Physico-chemical properties of sulfur. 1. Pressure effects on viscosity of liquid // Rev. Phys. Chem. Jap. 1963. No. 33. P. 41—52.
4. Tobolsky A.V., Eisenberg A. Equilibrium Polymerization of Sulfur // J. Am. Chem. Soc. 1959. V. 81. P. 780—782.
5. Touro F.J., Wiewiorowski T.K. Viscosity-chain length relationship in molten sulfur system // J. Phys. Chem. 1966. V. 70. P. 239—241.
6. Eisenberg A. The viscosity of liquid sulfur: A mechanistic reinterpretation // Macromolecules. 1968. No. 2. P. 44—48.
7. Cates M.E. Theory of the viscosity of polymeric liquid sulfur // Europhys. Lett. 1987. No. 4. P. 497—502.
8. Bacon R., Fanelli R. The viscosity of sulfur // J. Am. Chem. Soc. 1943. V. 65. P. 639—648.
9. Terasaki H., Kato T., Funakoshi K., Suzuki A., Urakawa S. Viscosity of sulfur under high pressure // J. Phys., Condens. Matt. 2004. V. 16. P. 1707—1714.
10. Powell E., Eyring H. The properties of liquid sulfur // J. Am. Chem. Soc. 1943. V. 65. P. 648—654.
11. Sukara Reynold E., Secco Richard A. Viscosity of liquid sulfur at 4.5 GPa in the L and L' regions // High Pressure Research: An International Journal. 2012. No. 32:4. P. 451—456.
12. Kantsyrev A.V., Golubev A.A., Bogdanov A.V., Demidov V.S., Demidova E.V., Ladygina E.M., Markov N.V., Skachkov V.S., Smirnov G.N., Rudskoy I.V., Kuznetsov A.P., Khudomyasov A.V., Sharikov B.Yu., Dudin S.V., Kolesnikov S.A., Mintsev V.B., Nikolaev D.N., Ternovoi V.Ya., Utkin A.V., Yuriev D.S.,

*Shilkin N.S., Fortov V.E., Turtikov V.I., Burtsev V.V., Zhernokletov M.V., Zavialov N.V., Kartanov S.A., Mikhailov A.L., Rudnev A.V., Tatsenko M.V., Varentsov D.V., Shestov L.M.* TWAC-ITEP Proton Microscopy Facility // *Instruments and Experimental Techniques*. 2014. V. 57. No. 1. P. 1—10.

13. *Varentsov D., Antonov O., Bakhmutova A., Barnes C.W., Bogdanov A., Danly C.R., Efimov S., Endres M., Fertman A., Golubev A.A., Hoffmann D.H.H., Ionita B., Kantsyrev A., Krasik Ya.E., Lang P.M., Lomonosov I., Mariam F.G., Markov N., Merrill F.E., Mintsev V.B., Nikolaev D., Panyushkin V., Rodionova M., Schanz M., Schoenberg K., Semennikov A., Shestov L., Skachkov V.S., Turtikov V., Udrea S., Vasylyev O., Weyrich K., Wilde C., Zubareva A.* Commissioning of the PRIOR proton microscope // *Review of Scientific Instruments*. 2016. V. 87. Is. 2. P. 023303/1—023303/8.

14. *Sofekun G.O., Evoy E., Lesage K.L., Chou N., Marriot R.A.* The rheology of liquid elemental sulfur across the  $\lambda$ -transition // *Journal of Rheology*. 2018. V. 62. P. 469—476.

15. *Stashick M.J., Sofekun G.O., Marriot R.A.* Modifying effects of hydrogen sulfide on the rheometric properties of liquid elemental sulfur // *AIChE J.* 2020. V. 66. Is. 6.

16. *Тимрот Д.Л., Середницкая М.А., Медведицков А.Н.* Экспериментальное исследование вязкости бинарной системы сера — йод в диапазоне температур 360—900 К // *Теплофизика высоких температур*. 1985. Т. 23. № 5. С. 882—889.

## REFERENCES

1. *Sofekun G.O.* Rheometric Properties of Pure Liquid Elemental Sulfur. Master's thesis. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017.

2. *Studel R.* Liquid sulfur // *Top. Curr. Chem.* 2003. No. 230. P. 81—116.

3. *Doi T.* Physico-chemical properties of sulfur, 1. Pressure effects on viscosity of liquid // *Rev. Phys. Chem. Jap.* 1963. No. 33. P. 41—52.

4. *Tobolsky A.V., Eisenberg A.* Equilibrium Polymerization of Sulfur // *J. Am. Chem. Soc.* 1959. V. 81. P. 780—782.

5. *Touro F.J., Wiewiorowski T.K.* Viscosity-chain length relationship in molten sulfur system // *J. Phys. Chem.* 1966. V. 70. P. 239—241.

6. *Eisenberg A.* The viscosity of liquid sulfur: A mechanistic reinterpretation // *Macromolecules*. 1968. No. 2. P. 44—48.

7. *Cates M.E.* Theory of the viscosity of polymeric liquid sulfur // *Europhys. Lett.* 1987. No. 4. P. 497—502.

8. *Bacon R., Fanelli R.* The viscosity of sulfur // *J. Am. Chem. Soc.* 1943. V. 65. P. 639—648.

9. *Terasaki H., Kato T., Funakoshi K., Suzuki A., Urakawa S.* Viscosity of sulfur under high pressure // *J. Phys., Condens. Matt.* 2004. V. 16. P. 1707—1714.

10. *Powell E., Eyring H.* The properties of liquid sulfur // *J. Am. Chem. Soc.* 1943. No. 4. V. 65. P. 648—654.

11. *Sukara Reynold E., Secco Richard A.* Viscosity of liquid sulfur at 4.5 GPa in the L and L' regions // *High Pressure Research: An International Journal*. 2012. No. 32:4. P. 451—456.

12. *Kantsyrev A.V., Golubev A.A., Bogdanov A.V., Demidov V.S., Demidova E.V., Ladygina E.M., Markov N.V., Skachkov V.S., Smirnov G.N., Rudskoy I.V., Kuznetsov A.P., Khudomyasov A.V., Sharikov B.Yu., Dudin S.V., Kolesnikov S.A., Mintsev V.B., Nikolaev D.N., Ternovoi V.Ya., Utkin A.V., Yuriev D.S., Shilkin N.S., Fortov V.E., Turtikov V.I., Burtsev V.V., Zhernokletov M.V., Zavialov N.V., Kartanov S.A., Mikhailov A.L., Rudnev A.V., Tatsenko M.V., Varentsov D.V., Shestov L.M.* TWAC-ITEP Proton Microscopy Facility // *Instruments and Experimental Techniques*. 2014. V. 57. No. 1. P. 1—10.

13. *Varentsov D., Antonov O., Bakhmutova A., Barnes C.W., Bogdanov A., Danly C.R., Efimov S., Endres M., Fertman A., Golubev A.A., Hoffmann D.H.H., Ionita B., Kantsyrev A., Krasik Ya.E., Lang P.M., Lomonosov I., Mariam F.G., Markov N., Merrill F.E., Mintsev V.B., Nikolaev D., Panyushkin V., Rodionova M., Schanz M., Schoenberg K., Semennikov A., Shestov L., Skachkov V.S., Turtikov V., Udrea S., Vasylyev O., Weyrich K., Wilde C., Zubareva A.* Commissioning of the PRIOR proton microscope // *Review of Scientific Instruments*. 2016. V. 87. Is. 2. P. 023303/1—023303/8.

14. *Sofekun G.O., Evoy E., Lesage K.L., Chou N., Marriot R.A.* The rheology of liquid elemental sulfur across the  $\lambda$ -transition // *Journal of Rheology*. 2018. V. 62. P. 469—476.

15. *Stashick M.J., Sofekun G.O., Marriot R.A.* Modifying effects of hydrogen sulfide on the rheometric properties of liquid elemental sulfur // *AIChE J.* 2020. V. 66. Is. 6.

16. *Timrot D.L., Serednitskaya M.A., Medveditskov A.N.* Experimental study of the viscosity of the binary system sulfur — iodine in the temperature range of 360—900 K // *High Temperature Thermal Physics*. 1985. V. 23. No. 5. P. 882—889.

## МЕТОД ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МИКРОТОМОГРАФИИ

© 2024 г. Сяоя Ян<sup>1,\*\*</sup>, Жишуай Чжэн<sup>2</sup>, Хуаньци Чжэн<sup>3</sup>, Сяопин Лю<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>Шаньдунский политехнический институт, Цзинань, Шаньдун, 250104, Китай

<sup>2</sup>Шаньдунский университет Цзяньчжэу, Цзинань, Шаньдун, 250101, Китай

<sup>3</sup>Шаньдунский институт контроля качества продукции, Цзинань, Шаньдун, 250102, Китай

<sup>4</sup>Хэнаньский технологический университет, Китай 450001, Чжэнчжоу, Зона высоких технологий,  
ул. Лянхуа, 100

E-mail: \*liuxiaoping@haut.edu.cn; \*\*yangxiaoxia8899@126.com

Поступила в редакцию 27.07.2024; после доработки 27.07.2024

Принята к публикации 27.08.2024

Корректная классификация ценных пород древесины имеет решающее значение для импортно-экспортной торговли и идентификации мебельных материалов. В данном исследовании используется метод неразрушающего контроля (микроскопическая компьютерная томография, микроКТ) для получения микроскопических изображений поперечных, радиальных и тангенциальных срезов 24 ценных пород древесины, что позволяет создать обширный набор данных. Разработана модель глубокого обучения SLConNet, повышающая точность распознавания за счет многомасштабной свертки и улучшенной структуры остаточных блоков. Результаты экспериментов показывают, что точность классификации поперечных, радиальных и тангенциальных срезов составляет 98,72, 96,75 и 95,36 % соответственно при значении коэффициента усиления 0,8. Модель превосходит такие традиционные модели, как Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception. Данное исследование подчеркивает эффективность неразрушающего контроля в получении большого количества микроскопических изображений древесины по сравнению с традиционными методами определения структуры анатомии. Модель SLConNet демонстрирует высокие показатели точности, запоминания и чувствительности, что указывает на ее потенциал для широкого применения в классификации древесины.

*Ключевые слова:* глубокое обучение, классификация и распознавание, неразрушающий контроль, древесина ценных пород.

## DEEP LEARNING METHOD OF PRECIOUS WOOD IMAGE CLASSIFICATION BASED ON MICROSCOPIC COMPUTED TOMOGRAPHY

© 2024 Xiaoxia Yang<sup>1,\*\*</sup>, Zhishuai Zheng<sup>2</sup>, Huanqi Zheng<sup>3</sup>, Xiaoping Liu<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>Shandong Polytechnic, Jinan, Shandong, 250104, China

<sup>2</sup>Shandong Jiaozhu University, Jinan, Shandong 250101, China

<sup>3</sup>Shandong Institute for Product Quality Inspection, Jinan, Shandong 250102, China

<sup>4</sup>Henan University of Technology,

No.100 Lianhua Street, High Tech Zone, Zhengzhou, 450001 China

E-mail: \*liuxiaoping@haut.edu.cn; \*\*yangxiaoxia8899@126.com

Correctly identifying precious wood species is crucial for import and export trade and furniture material identification. This study utilizes nondestructive testing (Microscopic Computed Tomography, Micro-CT) to capture microscopic images of the transverse, radial, and tangential sections of 24 precious wood species, creating a comprehensive dataset. The SLConNet deep learning model is developed, enhancing recognition accuracy through multi-scale convolution and an improved residual block structure. The experiment results show that the classification accuracy of the transverse, radial and tangential sections is 98.72, 96.75 and 95.36 % respectively when the gain value is 0.8. The model outperforms traditional models like Alexnet, ResNet50, Inception-V3, and Xception. This research highlights the efficiency of nondestructive testing in obtaining a large number of microscopic wood images, compared to traditional anatomical methods. The SLConNet model showcases high accuracy in precision, recall, and specificity, suggesting its potential for widespread applications in wood classification.

*Keywords:* deep learning, classification and recognition, nondestructive testing, precious wood.

DOI: 10.31857/S0130308224100044

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С быстрым развитием современной промышленности и повышением уровня жизни людей древесина, как возобновляемый ресурс биомассы, широко используется в таких развивающихся областях, как архитектура, мебель, ремесла, энергосберегающие здания и гибкая электроника [1, 2]. В связи с проблемой удовлетворения рыночного спроса на древесину внутри страны, значительное количество древесины приходится импортировать. Эффективная и точная идентифи-

кация импортируемой и экспортируемой древесины имеет решающее значение [3]. Традиционная классификация древесины в основном опирается на мнение опытных экспертов, изучающих макроскопическую и микроскопическую структуру древесины для определения ее типа. Хотя структура древесины обычно определяется с помощью срезов, которые обеспечивают высокую точность определения, они в значительной степени зависят от опыта экспертов, что приводит к увеличению производственных циклов при выполнении работ по срезам [4, 5]. Поэтому в данном исследовании используются методы неразрушающего контроля для получения многочисленных микроскопических изображений древесины с помощью микроКТ за один цикл, что экономит время и повышает эффективность. Данное исследование закладывает основу для использования компьютерного зрения в классификации древесины.

С развитием технологии компьютерного зрения для определения породы древесины перешли от таких традиционных методов, как химическая [6], ДНК [7], спектральная [8] и анатомическая идентификация [9], к автоматической идентификации древесины по компьютерным изображениям. Некоторые специалисты успешно применяют машинное обучение для классификации древесины на основе извлеченных макро- и микрохарактеристик изображений, что дает успешные результаты классификации [10]. Технология глубокого обучения, широко используемая в распознавании изображений и речи, также была применена для классификации древесины [11, 12]. В данном исследовании используются методы глубокого обучения для анализа 24 ценных пород древесины из схожих семейств и родов с целью повышения точности распознавания близкородственных видов.

Модель SLConNet, включающая многомасштабную сверточную обработку и слой усиления в остаточном блоке, эффективна для повышения точности идентификации модели путем настройки функции активации и значения усиления.

## 2. ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ

В сфере классификации древесины, наряду с традиционными химическими методами [6], методами идентификации по ДНК [7] и спектральными методами [8], большое внимание уделяется использованию макро- и микроизображений для идентификации древесины. Процесс изучения изображений древесины можно разделить на три этапа: распознавание анатомических структур древесины, применение алгоритмов машинного обучения для идентификации древесины и реализация алгоритмов глубокого обучения для классификации древесины.

### 2.1. Изучение анатомической структуры при классификации древесины

Анатомические методы идентификации обычно основаны на изучении макроскопических и микроскопических изображений поперечного сечения и радиальных тангенциальных изображений древесины квалифицированными специалистами для определения породы дерева. Макроскопическое распознавание выполняется с учетом цвета, запаха и особенностей древесины. Микроскопическая анатомическая идентификация включает анализ таких признаков, как поры, лучи древесины и осевая ткань паренхимы, для разделения типов материала [13—15]. Song и др. [16] использовали анатомические методы для сравнения различий между *Melia azedarach* и *Toona sinensis* с точки зрения изменений в ранних и поздних порах, осевой паренхиме, лучевой ткани и т.п. Liu и др. [17] изучили межвидовую и внутривидовую изменчивость трех выбранных видов *Swietenia*, сосредоточившись на ключевых количественных анатомических характеристиках, которые могут помочь в точной идентификации древесины на уровне вида.

### 2.2. Применение машинных алгоритмов для идентификации древесины

С развитием технологий искусственного интеллекта традиционные методы идентификации древесины переходят к автоматизированной идентификации с помощью генерируемых компьютером изображений. Этот подход предполагает извлечение характеристик древесины путем анализа изображений древесины для точного определения ее типа. Различные методы извлечения признаков древесины включают инвариантность Ху-момента, метод вейвлет-моментов [18], матрицу смежности уровней серого (МСУС) [19], метод извлечения признаков ЛБШ (локальные бинарные шаблоны) [20] и метод извлечения многомерных текстурных признаков [21]. Chao Xiaofei и др. [22] использовали методы ССПП («Статистические свойства распределения пор») и БМУС (Базовая матрица уровней серого) для извлечения признаков древесины в сочетании с классификаторами КБС (К-ближайших соседей) для эффективного распознавания особенностей древесины. Rosa и др. [23] применили метод

ЛБШ вместе с классификатором ближайших соседей для классификации микроскопических изображений 77 поперечных срезов древесины, достигнув точности внутривидовой идентификации 90 %. С помощью многомерных текстурных признаков было получено более 4200 изображений древесины 12 распространенных в Греции пород и классифицировано с помощью метода опорных векторов, причем точность классификации составила 91,47 % для поперечных сечений. Varmproutis и др. [24] также использовали метод многомерных текстурных признаков в сочетании с методом опорных векторов для классификации снимков 12 распространенных пород древесины в Греции, достигнув точности классификации 91,47 % для поперечных сечений, которая в целом была выше, чем для радиальных и тангенциальных сечений. Yadava и др. [25] усовершенствовали метод ЛБШ, используя ЕПЛБШТРХ (единный полный локальный бинарный шаблон текстурной размерной характеристики) для извлечения текстурных признаков из микроскопических изображений 72 видов широколиственных деревьев. Интегрировав этот метод с линейной классификацией методом опорных векторов, они достигли точности 97 %. Чжао и др. [26] предложили метод, объединяющий текстурные признаки и спектральные характеристики, в сочетании с методом опорных векторов для классификации поперечных срезов древесины. Эффективность классификации значительно повышается после объединения признаков по сравнению с использованием одного признака.

### 2.3. Применение глубокого обучения для идентификации древесины

С развитием технологий компьютерного зрения алгоритмы глубокого обучения все чаще используются для анализа и количественной оценки лесных ресурсов, направляя развитие лесного сектора в сторону интеллектуального анализа [27—29]. В отличие от традиционных подходов к машинному обучению, алгоритмы глубокого обучения не требуют ручной настройки признаков, что снижает общую рабочую нагрузку. Исследователи успешно применяют методы глубокого обучения для распознавания и классификации дефектов древесины. Например, Chen и др. [30] использовали метод СНС (сверточных нейронных сетей) для классификации четырех типов дефектов древесины, добившись точности классификации 99,3 %. Аналогичным образом Wang и др. [31] применили технологию цифровой обработки изображений и алгоритм быстрой идентификации и определения местоположения для выявления и маркировки дефектов поверхности древесины. Shi и др. [32] использовали метод многоканальной маски Р-СНС (Региональная-СНС) для классификации и определения местоположения дефектов в шпоне древесины, достигнув общей точности классификации 98,70 %. Помимо идентификации дефектов древесины, технология глубокого обучения также применялась для классификации и идентификации пород древесины. Yusof и др. и Wu и др. [33, 34] использовали методы трансферного обучения для классификации тропической древесины, продемонстрировав значительное повышение точности по сравнению с традиционными моделями. Ravindran и др. [35] подтвердили эти выводы, добившись высокой точности при классификации пород древесины с помощью VGG 16 для макроизображений 10 различных пород древесины. Кроме того, некоторые исследователи использовали независимые сетевые модели для классификации древесины. Briechle и др. [36] использовали модель сверточной нейронной сети Silvi net для классификации древесных пород, добившись точности классификации 96,1 %. С помощью сверточной модели нейронной сети InceptionV4\_ResNetV2 макроизображения 10 видов лиственных пород в Северной Америке были распознаны с точностью 92,60 % [37]. Wu и др. [38] использовали методы ResNet-50, DenseNet-121 и облегченный MobileNet-V2 для классификации 11 распространенных лиственных пород, достигнув точности распознавания 98,2 %. Zhao и др. [39] представили модель PWoodIDNet для классификации и идентификации 16 редких древесных пород, достигнув точности 99 %. Для повышения точности идентификации схожих пород деревьев из разных семейств и родов Кита и др. [40] объединили изображения УНМФ (угол наклона микрофибрил) и СНС для идентификации древесных пород семейства кипарисовых (Cupressaceae), достигнув точности 90 %.

## 3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДОЛОГИЯ

В данной статье представлены 24 вида ценных пород древесины, которые относятся к схожим семействам и родам. Для повышения точности идентификации схожих материалов построена модель SLConNet. Многомасштабная сверточная обработка используется для добавления слоя усиления на входе остаточного блока и после функции активации, а точность распознавания модели улучшается путем регулировки значения усиления.

### 3.1. Материалы эксперимента

В данной работе в качестве объектов исследования взяты 24 ценных вида деревьев, все из которых являются широколиственными и относятся к 2 семействам (Leguminosae и Ebenaceae) и 5 родам (*Pterocarpus*, *Dalbergia*, *Millettia*, *Senna* и *Diospyros*). Названия и сведения о семействах 24 видов красного дерева приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сведения, связанные с изучаемыми высокоценными лиственными породами

Номер	Ботаническое название	Семейство	Номер	Ботаническое название	Семейство
A	<i>Pterocarpus santalinus</i>	Leguminosae	M	<i>Dalbergia cochinchinensis</i>	Leguminosae
B	<i>Pterocarpus erinaceus</i>	Leguminosae	N	<i>Dalbergia frutescens</i>	Leguminosae
C	<i>Pterocarpus indicus</i>	Leguminosae	O	<i>Dalbergia granadillo Pittier</i>	Leguminosae
D	<i>Pterocarpus macrocarpus</i>	Leguminosae	P	<i>Dalbergia oliveri</i>	Leguminosae
E	<i>Dalbergia odorifera</i>	Leguminosae	Q	<i>Dalbergia retusa</i>	Leguminosae
F	<i>Dalbergia cultrata</i>	Leguminosae	R	<i>Millettia laurentii</i>	Leguminosae
G	<i>Dalbergia latifolia</i>	Leguminosae	S	<i>Millettia leucantha</i>	Leguminosae
H	<i>Dalbergia louvellii</i>	Leguminosae	T	<i>Senna siamea</i>	Leguminosae
I	<i>Dalbergia melanoxylon</i>	Leguminosae	U	<i>Diospyros ebenum J.</i>	Ebenaceae
J	<i>Dalbergia Stevensonii</i>	Leguminosae	V	<i>Diospyros crassiflora</i>	Ebenaceae
K	<i>Dalbergia bariensis</i>	Leguminosae	W	<i>Diospyros celebica</i>	Ebenaceae
L	<i>Dalbergia cearensis</i>	Leguminosae	X	<i>Diospyros philippinensis</i>	Ebenaceae

### 3.2. Получение изображений с микроскопа

Как показано на рис. 1, были получены микроскопические изображения (поперечные, радиальные и тангенциальные срезы) 24 ценных пород деревьев с помощью трехмерной рентгеновской микротомографии высокого разрешения. Процедура эксперимента включала несколько этапов.

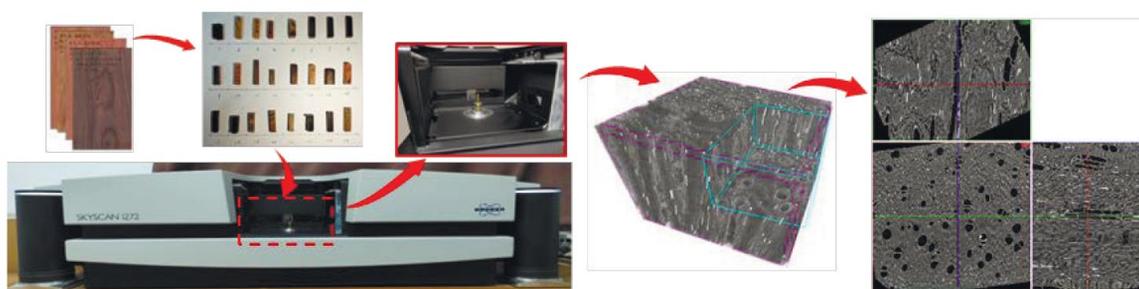


Рис. 1. МикроКТ, используемая для сканирования ценных пород древесины.

Шаг 1. Отобрать образцы сердцевины ценных пород деревьев по цвету, плотности и текстуре, обеспечив однородность и отсутствие дефектов, которые могли бы повлиять на идентификацию древесины.

Шаг 2. Подготовить образцы размером примерно 5 мм × 5 мм × 25 мм и поместить их в сканирующую камеру микротомографа (SKYSCAN1272) для сбора данных и реконструкции изображения.

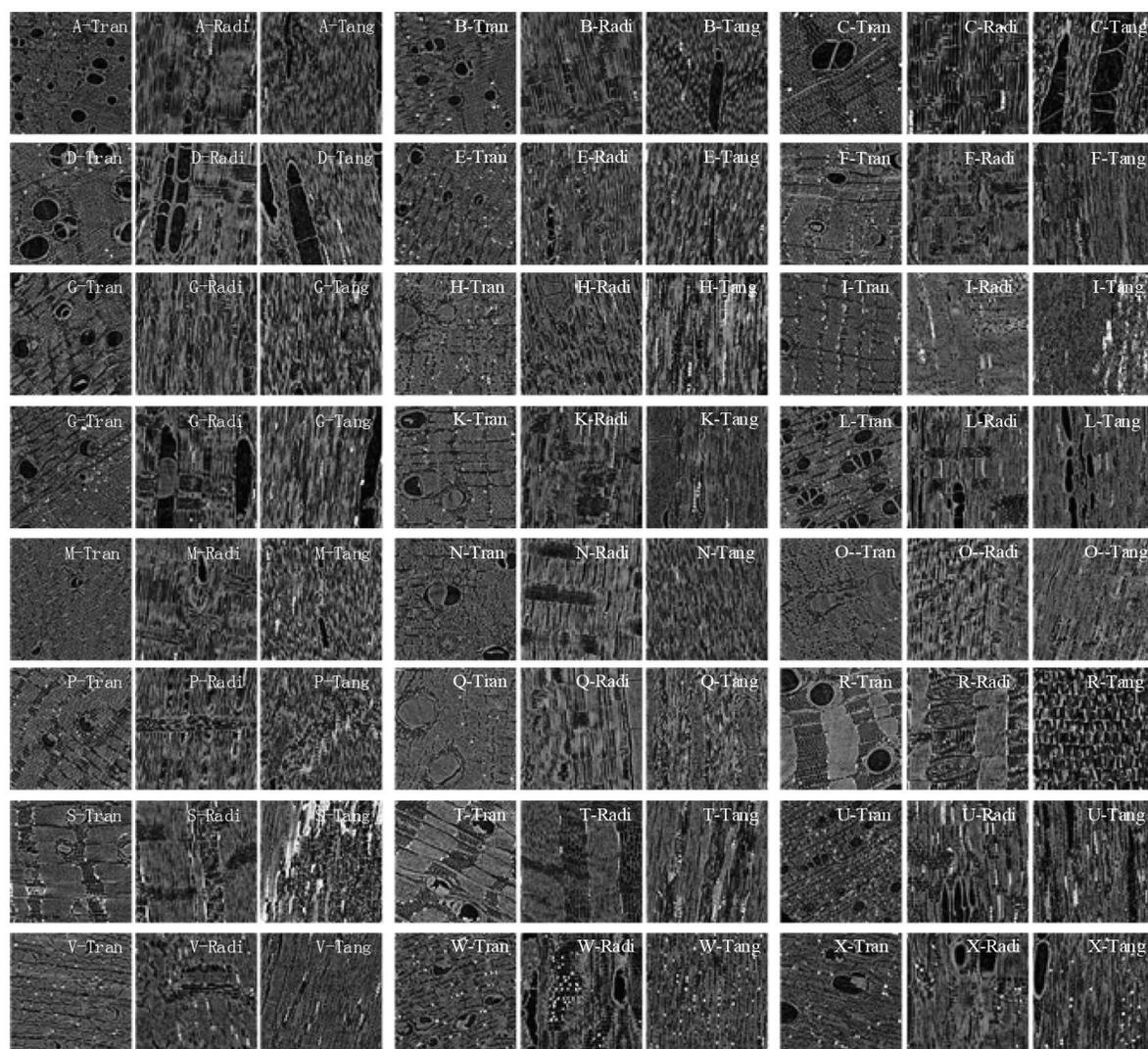


Рис. 2. Изображения поперечных, радиальных и тангенциальных сечений 24 видов ценных пород древесины.

Шаг 3. Выставить параметры для сканирования на микротомографе, включая напряжение и ток 50 кВ и 200 мА, разрешение 2 мкм для восстановленных изображений, высоту сканирования 10 мм и время сканирования около 100 мин.

Шаг 4. Собрать данные, используя установленные параметры сканирования. Задействовать алгоритм восстановления изображения для получения томографических изображений, т. е. изображений поперечного среза образца древесины.

Шаг 5. Получить изображения радиальных и тангенциальных сечений с помощью алгоритма обработки микротомографа. Обработать изображения поперечных, радиальных и тангенциальных срезов алгоритмами улучшения.

После восстановления отсканированных изображений было получено 3000 изображений для каждого образца. Из них 1000 изображений — для поперечных срезов, 1000 — для радиальных и 1000 — для тангенциальных срезов. Размер изображений составлял  $2042 \times 1640$  пикселей, разрешение — 2 мкм. На рис. 2 представлены изображения поперечных, радиальных и тангенциальных срезов 24 видов ценных пород древесины.

### 3.3. Структура модели

Новая модель под названием SLConNet разработана путем модификации модели ResNet. Модификации включают в себя добавление одного начального модуля после входного слоя и улучшение каждого остаточного блока. Начальный модуль состоит из одного сверточного ядра  $5 \times 5$ , двух сверточных ядер  $3 \times 3$  и пяти сверточных ядер  $1 \times 1$  (рис. 4). Каждый остаточный

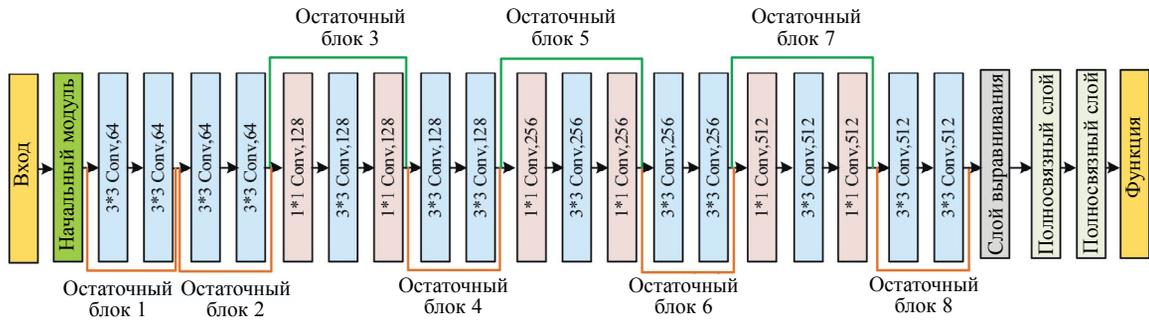


Рис. 3. Модель сверточной нейронной сети (SLConNet).

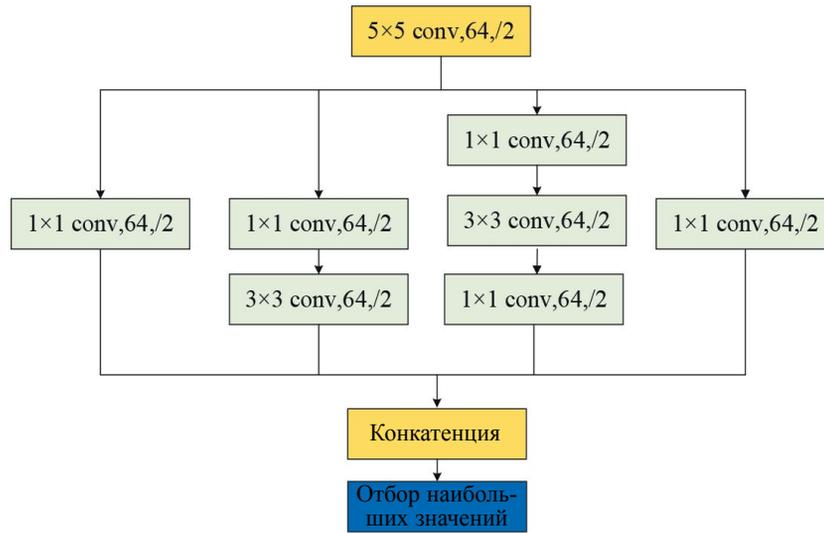


Рис. 4. Структура начального модуля.

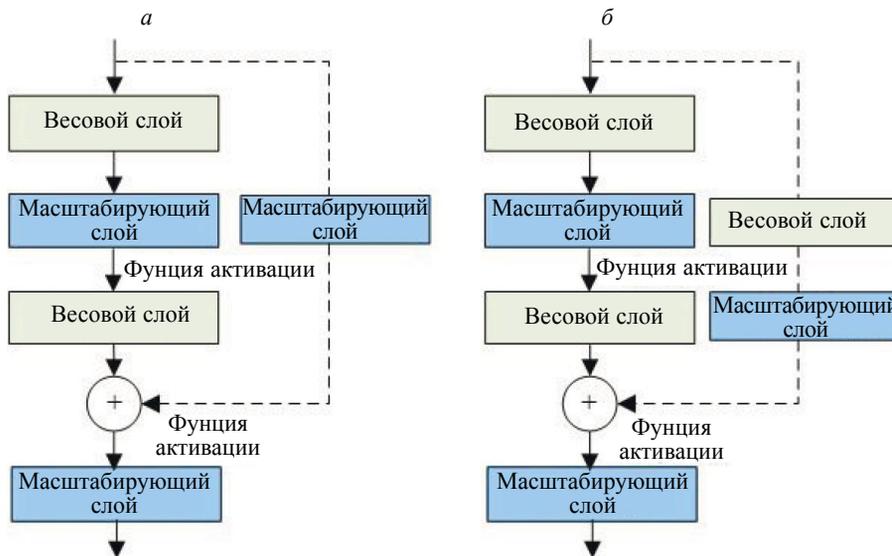


Рис. 5. Структура улучшенных остаточных блоков.

блок модифицируется путем вставки одного масштабирующего слоя на остаточную функцию, остаточную связь и после выхода остаточного блока (рис. 5). Полная структура модели SLConNet показана на рис. 3. На входной слой поступают RGB-изображения размером 224×224 пикселя.

### 3.4. Структура остаточных блоков с усилением

Модель SLConNet позволяет улучшить структуру остаточных блоков. Существующие остаточные блоки делятся на два типа: к одному типу относятся остаточные блоки 1, 2, 4, 6 и 8, которые характеризуются скачкообразным изменением структуры без внедрения сверточных или нормализующих слоев. Другой тип включает остаточные блоки 3, 5 и 7, в которые включены сверточные и нормализующие слои. Оба типа структур остаточных блоков улучшаются путем добавления масштабирующего слоя к остаточной функции, остаточной связи и выходу (см. рис. 5). Масштабирующий слой позволяет регулировать значение коэффициента усиления для оптимизации модели SLConNet. Исследование показало, что оптимальное значение коэффициента усиления для достижения наивысшей точности в 98,72 % составляет 0,80. В результате время обучения составило 11408 с, а время тестирования — 22,00 с, что свидетельствует о превосходной производительности модели. Влияние различных значений коэффициента усиления на точность представлено в табл. 2.

Таблица 2

Влияние различных полученных значений на точность обучения

Прирост	Точность	Время обучения, с	Время тестирования, с
0,20	82,79	9900	22,32
0,40	96,92	11400	22,37
0,60	95,87	11940	21,96
<b>0,80</b>	<b>98,72</b>	<b>11400</b>	<b>22,00</b>
1,00	97,05	11580	22,36
1,20	97,37	11460	23,19
1,40	95,26	11520	23,18
1,60	95,80	12360	23,87

Поэтому модель SLConNet обучается с коэффициентом усиления 0,8 для всех масштабируемых слоев. В следующем разделе результаты обучения сравниваются с моделями AlexNet [41, 42], ResNet50 [43], Inception-V3 [44] и Xception [45].

## 4. ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 4.1. Анализ результатов идентификации по трем сечениям

#### 4.1.1. Результаты идентификации поперечных сечений

Для оценки эффективности обучения модель SLConNet сравнивается с 4 классическими моделями: Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception. Результаты обучения по поперечным сечениям представлены на рис. 6. Как показано на рис. 6а, точность модели SLConNet стабилизируется примерно после 2000 итераций, демонстрируя быструю скорость сходимости и значительно более высокую точность по сравнению с другими 4 моделями. Тогда как Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception требуют около 5000 итераций для постепенной сходимости, что демонстрирует более медленную скорость сходимости. Кроме того, точность Alexnet и ResNet50 сильно колеблется, что заметно влияет на точность обучения по сравнению с моделью SLConNet.

Как показано на рис. 6б, значение уровня потерь для SLConNet постепенно сходится с высокой скоростью к 2000 итераций. В то время как Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception демонстрируют плавное схождение через 4000 итераций, а кривые потерь Alexnet и ResNet50 демонстрируют значительные колебания. Таким образом, при обучении поперечных сечений модель SLConNet демонстрирует более высокую производительность, показывая более высокую точность обучения и более низкие значения потерь по сравнению с другими моделями.

#### 4.1.2. Результаты идентификации радиальных сечений

Результаты обучения для радиальных участков показаны на рис. 7. Для проверки эффективности обучения модель SLConNet сравнивается с 4 классическими моделями. На рис. 7а видно,

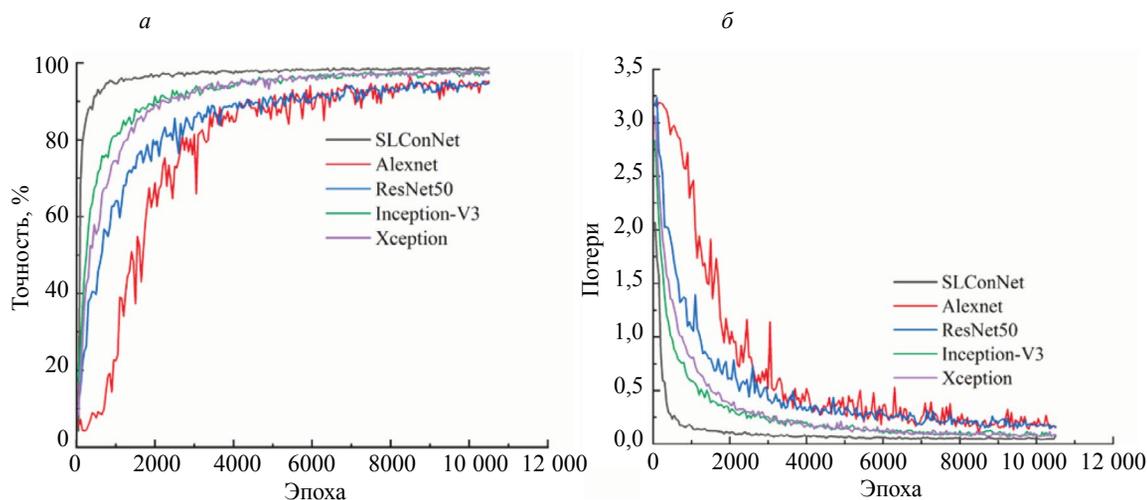


Рис. 6. Сравнение результатов идентификации поперечных сечений: точность (а); уровень потерь (б).

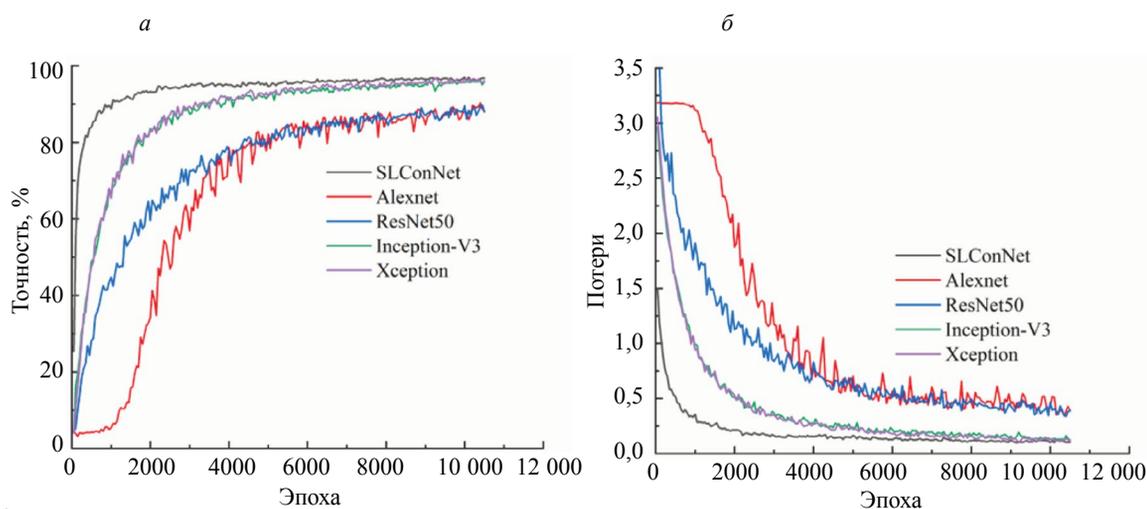


Рис. 7. Сравнение результатов идентификации радиальных сечений: точность (а); уровень потерь (б).

что точность модели SLConNet стабилизируется примерно после 1500 итераций, демонстрируя более высокую скорость сходимости и значительно более высокую точность по сравнению с другими четырьмя моделями. С другой стороны, AlexNet, ResNet50, Inception-V3 и Xception требуют около 5000 итераций для постепенной сходимости, при этом скорость сходимости ниже. На рис. 7б значения потерь для модели SLConNet достигают сходимости с высокой скоростью после 2000 итераций. Напротив, значения потерь для ResNet50, Inception-V3 и Xception постепенно сходятся после 4000 итераций, в то время как значения потерь для AlexNet и ResNet50 демонстрируют значительные колебания.

#### 4.1.3. Результаты идентификации тангенциальных сечений

Результаты обучения для тангенциальных сечений 24 пород ценных пород древесины представлены на рис. 8. Точность моделей показана на рис. 8а. SLConNet демонстрирует более высокую скорость сходимости и немного более высокую точность, чем Inception-V3 и Xception, и значительно превосходит Alexnet и ResNet50. Точность обучения для SLConNet остается стабильной с минимальными колебаниями. Значения потерь показаны на рис. 8б. SLConNet демонстрирует самое быстрое снижение значений потерь, стабильную кривую и эффективную сходимость, превосходя Alexnet и ResNet50. Напротив, значения потерь для Alexnet и ResNet50 медленно снижаются и сильно колеблются в процессе обучения. Модель SLConNet превосходит по скорости сходимости и величине потерь модели Inception-V3 и Xception.

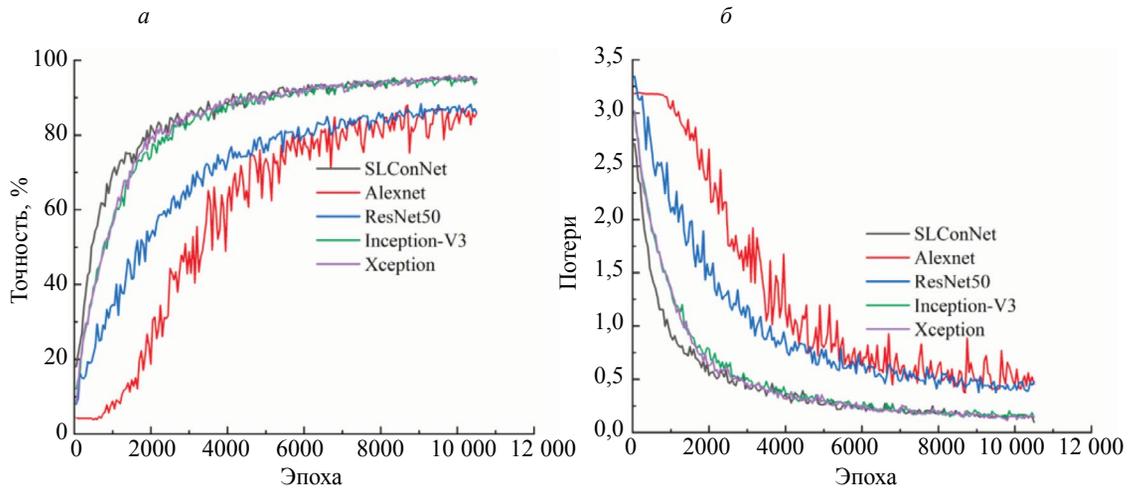


Рис. 8. Сравнение результатов идентификации тангенциальных сечений: точность (а); уровень потерь (б).

Результаты идентификации поперечного, радиального и тангенциального сечений представлены в табл. 3. Для идентификации поперечных сечений точность модели SLConNet составляет 98,72 %, превосходя Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception на 3,50, 3,90, 1,41 и 1,12 % соответственно. Для радиальных сечений модель SLConNet достигает точности 96,75 %, превосходя Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception на 7,93, 6,97, 1,74 и 1,21 % соответственно. По тангенциальным сечениям модель SLConNet достигает точности 95,36 %, превосходя Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception на 9,51, 9,22, 0,4 и 0,19 % соответственно. Значения потерь модели SLConNet для поперечного, радиального и тангенциального сечений составляют 0,0756, 0,1077 и 0,0962 соответственно, что значительно ниже, чем у других классических моделей.

Таблица 3

Сравнение и анализ результатов идентификации древесины по трем сечений

Модель	Поперечные сечения			Радиальные сечения			Тангенциальные сечения		
	Точность, %	Уровень потерь	Время обучения/тестирования, с	Точность, %	Уровень потерь	Время обучения/тестирования, с	Точность, %	Уровень потерь	Время обучения/тестирования, с
<b>SLConNet</b>	98,72	0,0756	<b>9075/109</b>	96,75	0,1077	<b>9620/117</b>	95,36	0,0962	<b>9980/119</b>
Alexnet	95,22	0,1539	45120/119	88,82	0,3871	46200/118	85,85	0,4582	46680/123
ResNet50	94,82	0,1611	20520/130	89,78	0,3908	21000/125	86,14	0,4757	21240/121
Inception-V3	97,31	0,0876	38400/121	95,01	0,1239	39000/129	94,96	0,1420	39540/119
Xception	97,60	0,0840	27420/119	95,54	0,1220	28140/119	95,17	0,1469	27900/120

Таким образом, очевидно, что модель SLConNet превосходит классические модели и демонстрирует явные преимущества при идентификации ценных пород древесины. Веса оптимизируются в процессе обучения, а затем применяются для тестирования 30 % оставшихся изображений. Этот процесс дает средние значения точности и потерь для тестового набора, которые приведены в табл. 3. Модель SLConNet демонстрирует более высокую точность распознавания поперечных, радиальных и тангенциальных разрезов по сравнению с моделями AlexNet, ResNet50, Inception-V3 и Xception. Кроме того, модель SLConNet демонстрирует наименьшие значения потерь и значительно превосходит другие модели по времени тестирования. В разделе 4.2 для дальнейшей оценки эффективности модели SLConNet используются дополнительные метрики, такие как PREC (точность), REC (чувствительность) и SPEC (специфичность).

## 4.2. Оценка модели

При сравнении с классическими моделями, такими как Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception4, модель SLConNet демонстрирует более высокую точность идентификации — 98,72, 96,75 и 95,36 % для поперечных, радиальных и тангенциальных сечений. Это преимущество можно объяснить включением масштабирующих слоев в выходные данные, остаточную функцию и остаточную связь остаточных блоков. Для дальнейшей оценки эффективности модели на основе результатов идентификации поперечного, радиального и тангенциального сечений была построена матрица путаницы, как показано на рис. 9.

Точность классификации для каждого из 24 видов на поперечных срезах составляет более 93,3% (на рис. 9а). Некоторые виды, например, А-тип *Pterocarpus santalinus*, легко спутать с другими, такими как F-*Dalbergia cultrata*. Аналогично, H-*Dalbergia louvellii* и I-*Dalbergia melanoxyton* могут быть приняты за K-*Dalbergia bariensis* из-за сходства типа пор сосудов, размера и распределения осевой паренхимы, что приводит к ошибочной классификации.

На рис. 9б видно, что точность классификации 24 видов в радиальных разрезах превышает 86,67 %. Некоторые виды, например, класс А-*Pterocarpus santalinus*, могут быть ошибочно приняты за класс G-*Dalbergia latifolia*, класс В-*Pterocarpus erinaceus* и класс С-*Pterocarpus indicus*. Кроме того, класс H-*Dalbergia louvellii* может быть ошибочно принят за класс K-*Dalbergia bariensis*, а класс J-*Dalbergia Stevensonii* — за класс N-*Dalbergia frutescens* из-за сходства микроструктуры, в частности, лежащей лучевой клетки и древесных лучей, что приводит к неправильной классификации.

Как показано на рис. 9в, классификация тангенциальных срезов 24 ценных пород древесины показала точность более 85,33 % для каждой категории. Примечательно, что у некоторых видов древесины риск ошибки выше, например, H-*Dalbergia louvellii* часто принимают за J-*Dalbergia Stevensonii*, класс J-*Dalbergia Stevensonii* часто путают с классом N-*Dalbergia frutescens*, а класс K-*Dalbergia bariensis* легко идентифицировать с E-*Dalbergia odorifera* и H-*Dalbergia louvellii*. Кроме того, класс Q-*Dalbergia retusa* легко спутать с O-*Dalbergia granadillo Pittier*, что объясняется структурным сходством в распределении и расположении лучевых клеток у этих видов.

Результаты матрицы путаницы на рис. 8 указывают на ошибки классификации в поперечном, радиальном и тангенциальном разрезах. Для точной оценки эффективности классификации используются такие параметры, как PREC, REC и SPEC, которые определяются:

$$\text{PREC} = \frac{\text{ИП}}{\text{ИП} + \text{ЛП}}; \quad (1)$$

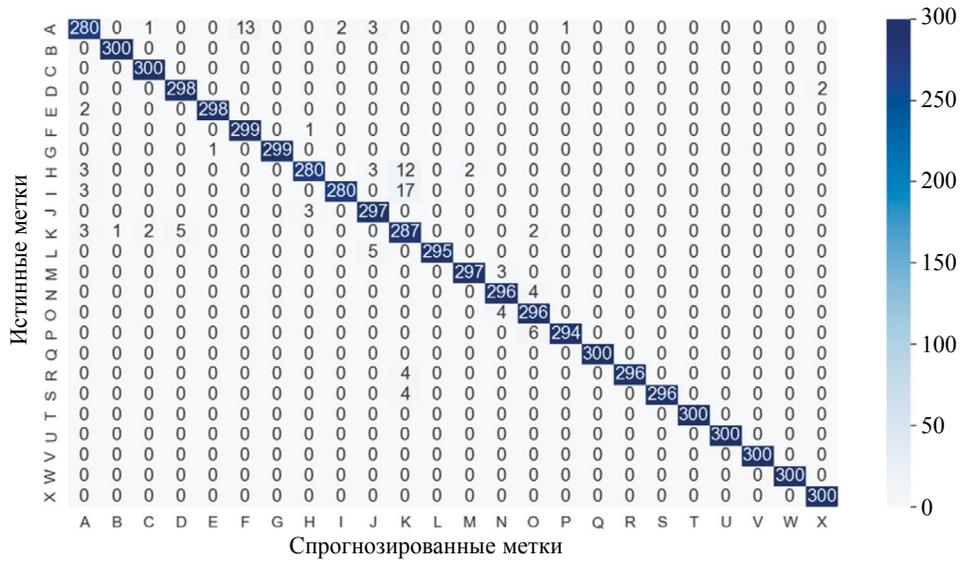
$$\text{REC} = \frac{\text{ИП}}{\text{ИП} + \text{ЛО}}; \quad (2)$$

$$\text{SPEC} = \frac{\text{ИО}}{\text{ИО} + \text{ЛП}}. \quad (3)$$

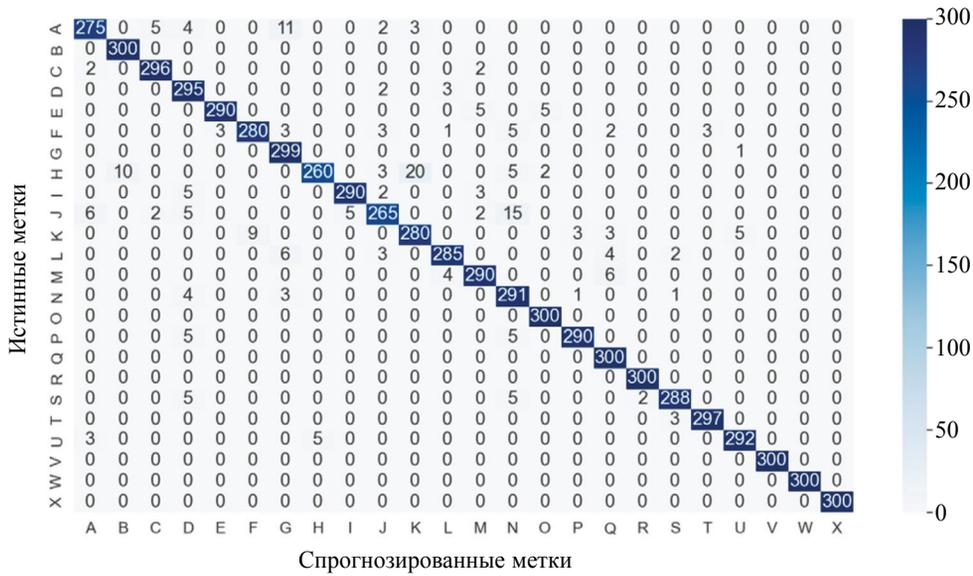
ИП (истинно-положительный) означает, что в реальной ситуации объект обладает искомым признаком, и прогнозируемый результат это подтверждает; ИО (истинно-отрицательный) означает, что в реальной ситуации объект не обладает искомым признаком, а прогнозируемый результат это подтверждает; ЛО (ложно-отрицательный) означает, что в реальной ситуации объект обладает искомым признаком, а прогнозируемый результат это отрицает; ЛП (ложно-положительный) означает, что в реальной ситуации объект не обладает искомым признаком, а прогнозируемый результат это отрицает.

В табл. 4 представлены значения оценок PREC, REC и SPEC для 24 ценных пород древесины. Средняя точность для поперечных сечений составляет 98,76, 98,77 и 99,94 % соответственно. Для радиальных сечений средняя точность составляет 96,71, 96,77 и 99,86 % соответственно. Средняя точность для тангенциальных сечений составляет 95,36, 95,39 и 99,80 % соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о том, что поперечные срезы имеют самую высокую точность идентификации. Более того, несколько ценных пород древесины демонстрируют точность идентификации на уровне 100 %, включая S-*Millettia leucantha*, T-*Senna siamea*, U-*Diospyros sp.*, V-*Diospyros crassiflora*, W-*Diospyros celebica* и X-*Diospyros sp.*

а



б



в

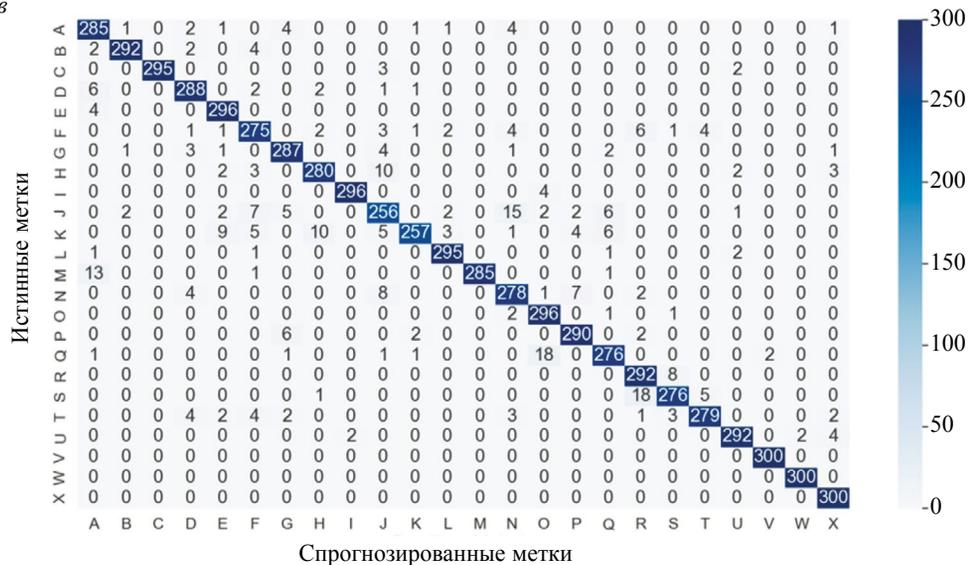


Рис. 9. Матрицы путаницы для различных сечений: продольное (а); радиальное (б); тангенциальное (в).

Таблица 4

## Эффективность классификации по трем сечениям

№	Поперечные сечения			Радиальные сечения			Тангенциальные сечения		
	PREC/%	REC/%	SPEC/%	PREC/%	REC/%	SPEC/%	PREC/%	REC/%	SPEC/%
A	97,22	97,20	99,71	91,67	96,15	99,64	95,00	91,35	99,78
B	99,67	99,67	100,00	100,00	96,77	100,00	97,33	97,99	99,88
C	99,01	99,01	100,00	98,67	97,69	99,94	98,33	100,00	99,93
D	98,35	98,34	99,97	98,33	91,33	99,93	96,00	94,74	99,83
E	99,67	99,67	99,97	96,67	98,98	99,86	98,67	94,27	99,94
F	95,83	95,81	99,99	93,33	96,89	99,71	91,67	91,06	99,64
G	99,01	99,01	99,99	99,67	92,86	99,99	95,67	94,10	99,81
H	99,64	99,64	99,71	86,67	98,11	99,42	93,33	94,92	99,71
I	97,70	97,70	99,96	96,67	98,31	99,86	98,67	99,33	99,94
J	95,35	95,47	99,81	88,33	94,64	99,49	85,33	87,97	99,36
K	96,09	96,09	99,93	93,33	92,41	99,71	85,67	97,72	99,38
L	100,00	100,00	99,96	95,00	97,27	99,78	98,33	97,36	99,93
M	97,05	97,05	99,94	96,67	96,03	99,86	95,00	100,00	99,78
N	96,10	96,10	99,94	97,00	89,26	99,87	92,67	90,26	99,68
O	100,00	100,00	99,91	100,00	97,72	100,00	98,67	92,21	99,94
P	99,67	99,67	100,00	96,67	98,64	99,86	96,67	95,71	99,86
Q	100,00	100,00	99,94	100,00	95,24	100,00	92,00	94,20	99,65
R	100,00	100,00	99,94	100,00	99,34	100,00	97,33	90,97	99,88
S	100,00	100,00	100,00	96,00	97,96	99,83	92,00	95,50	99,65
T	100,00	100,00	100,00	99,00	99,00	99,96	93,00	96,88	99,70
U	100,00	100,00	100,00	97,33	97,99	99,88	97,33	97,66	99,88
V	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,34	100,00
W	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,34	100,00
X	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,46	100,00
Среднее	<b>98,76</b>	<b>98,77</b>	<b>99,94</b>	<b>96,71</b>	<b>96,77</b>	<b>99,86</b>	<b>95,36</b>	<b>95,39</b>	<b>99,80</b>

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе эксперимента были проанализированы поперечные, радиальные и тангенциальные срезы 24 различных пород ценной древесины. Поперечные срезы показали заметно более высокую точность классификации по сравнению с двумя другими срезами, что, вероятно, связано с распределением микроскопических структурных особенностей, характерных только для поперечных срезов. Wangrou et al. [24] также получили аналогичные результаты при классификации поперечных, тангенциальных и радиальных срезов древесины с использованием набора данных WOOD-AUTH.

По сравнению с такими классическими моделями, как Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception4, модель SLConNet включает в себя остаточные структуры и модули Inception. Это не только повышает скорость сходимости и эффективность обучения сети, но и позволяет извлекать многомерную информацию из входных данных, что в конечном итоге улучшает эффективность классификации модели. Feng et al. [46] продемонстрировали повышение точности классификации гиперспектральных изображений за счет интеграции остаточных блочных структур

в сеть. Такая интеграция способствует лучшему обмену информацией между неглубокими и глубокими сетями, что приводит к извлечению глубоких характеристик из гиперспектральных изображений. Кроме того, Yao и др. [47] предложили многомасштабную SE (Squeeze and Excitation)-Residual Network с кодером преобразования (MRTNet) для повышения эффективности классификации за счет использования как глобальных, так и локальных особенностей сердцевинки.

В данном исследовании большое количество изображений было получено одновременно с помощью микротомографа, что дает значительные преимущества в поиске изображений древесины по сравнению с традиционными анатомическими методами. Однако наш эксперимент был направлен на сканирование и восстановление трех конкретных участков сердцевины из одного образца ценной древесины, что может ограничить обобщаемость наших результатов. Будущие исследования будут направлены на расширение диапазона категорий ценной древесины за счет включения образцов из различных источников одной и той же породы.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе для получения микроскопических изображений поперечных, радиальных и тангенциальных срезов древесины используется такой метод неразрушающего контроля, как микротомография. По сравнению с традиционными методами срезов он очень эффективен, поскольку за один раз можно получить тысячи микроскопических изображений, что закладывает основу для глубокого обучения.

В данном исследовании была разработана модель SLConNet для анализа микроскопических изображений поперечных, радиальных и тангенциальных срезов ценной древесины с использованием многомасштабных операций свертки для извлечения множества признаков. Результаты показывают, что точность идентификации по поперечным срезам значительно выше, чем по радиальным и тангенциальным, что объясняется большим количеством текстурной информации, присутствующей в поперечных срезах. Из 29 признанных видов ценных пород древесины в экспериментальный набор данных включены только 24 распространенных вида, что связано с редкостью некоторых видов на рынке. Результаты эксперимента показывают, что модель SLConNet превосходит такие традиционные модели, как Alexnet, ResNet50, Inception-V3 и Xception, в точности идентификации видов ценных пород древесины на основе поперечных, радиальных и тангенциальных сечений.

Представленная работа поддержана Фондом естественных наук провинции Шаньдун Китая (№ ZR2020QC174), Национальным фондом естественных наук Китая (№ 62173127, 62472143), Ключевыми специальными проектами НИОКР в провинции Хэнань (№ 241111521000), Фондом лучших молодых талантов Центральной равнины (№ (2023)11).

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов, о котором они могли бы сообщить в связи с настоящим исследованием.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang W., Li H.Q., Guan H. и др. Advances in functionalization and application of natural woods // *Materials Reports*. 2022. V. 36. No.18. P. 224—230.
2. Amini M.H.M., Temiz A., Hekimolu G. и др. Properties of scots pine wood impregnated with capric acid for potential energy saving building material // *Holzforschung*. 2022. V. 76. No. 8. P. 1.
3. Rojas J.A.M., Alpuente J., Postigo D., Rojas I.M., Vignote S. Wood species identification using stress-wave analysis in the audible range // *Appl Acoust*. 2011. V. 72. No.12. P. 934—942.
4. Jiao L., Lu Y., He T., Guo J., Yin Y. DNA barcoding for wood identification: global review of the last decade and future perspective // *IAWA Journal*. 2020. V. 41. No. 4. P. 620—643.
5. Wang C.K., Zhao P. Classification of wood species using spectral and texture features of transverse section // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2021. V. 79. P. 1283—1296.
6. Creydt M., Lautner S., Fromm J. и др. Wood profiling by non-targeted liquid chromatography high-resolution mass spectrometry: Part 2, Detection of the geographical origin of spruce wood (*Picea abies*) by determination of metabolite pattern // *Journal of chromatography*. 2021. V. 1663. P. 462737.
7. Jiao L., Yu M., Wiedenhoeft A.C. и др. DNA barcode authentication and library development for the wood of six commercial *Pterocarpus* species: the critical role of xylarium specimens // *Scientific Reports*. 2018. No. 8. P. 1945.
8. Sun X.D., Cui D.D., Shen Y. и др. Non-destructive detection for foreign bodies of tea stalks in finished tea products using terahertz spectroscopy and imaging // *Infrared Physics Technology*. 2022. No. 121. P. 04018.
9. Helmling S., Olbrich A., Heinz I. и др. Atlas of vessel elements // *IAWA Journal*. 2018. V. 39. No. 3. P. 249—352.

10. *Santosa S., Pramunendar R.A., Prabowo D.P.* и др. Wood types classification using back-propagation neural network based on Genetic algorithm with gray level co-occurrence matrix for features extraction // *IAENG International Journal of Computer Science*. 2019. V. 46. P. 149—155.
11. *Khalil R.A., Jones E., Babar M.I.* и др. Speech emotion recognition using deep learning techniques: A review // *IEEE Access*. 2019. V. 99. P. 1.
12. *Huang J.X., Lu X., Chen L.Y.* и др. Accurate identification of pine wood nematode disease with a deep convolution neural network // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. P. 913.
13. IAWA Committee. IAWA list of microscopic features for softwood identification // *IAWA Journal*. 2004. V. 25. No.1. P. 1—70.
14. *Wheeler E.A., Baas P., Gasson P.E.* и др. IAWA list of microscopic features for hardwood identification // *IAWA Journal*. 1989. V. 10. No. 3. P. 219—332.
15. *Helmling S., Olbrich A., Heinz I.* и др. Atlas of vessel elements // *IAWA Journal*. 2018. V. 39. No.3. P. 249—352.
16. *Song L.H., Lei F.J., Huang Y.H.* и др. Anatomical properties of melia azedarach and toona sinensis Woods // *Guangxi Forestry Science*. 2023. V. 52. No. 6. P. 781—786.
17. *Liu S.J., He T., Lu Y.* и др. Quantitative anatomy analysis on wood feature variability and wood identification of Swietenia Species // *Scientia Silvae Sinicae*. P. 1—11.
18. *Guo J.X., Hu M.* Features extraction and classification of wood defect based on hu invariant moment and wavelet moment and BP neural network / *The 12th International Symposium*, 2019.
19. *Riana D., Rahayu S., Hasan M. Anton V.D.H.* Comparison of segmentation and identification of swietenia mahagoni wood defects with augmentation images // *Heliyon*. 2021. V. 7. No. 6. P. 7417.
20. *Yang X.X., Gao Y.S., Zhang S.H.* Research on rosewood micro image classification method based on feature fusion and ELM // *Journal of Renewable Materials*. 2022. V. 10. No. 12. P. 3587—3598.
21. *Barmpoutis P., Dimitropoulos K., Barboutis I.* и др. Wood species recognition through multidimensional texture analysis // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. V. 144. P. 241—248.
22. *Chao X.F., Fan L.H., Cai C.* и др. Wood texture classification and identification based on multi-feature extraction and selection // *Modern Agricultural Science*. 2018. No. 18. P. 118—120.
23. *Rosa da Silva N., De Ridder M., Baetens J. M., Van den Bulcke J., Rousseau M.* и др. Automated classification of wood transverse cross-section micro-imagery from 77 commercial Central-African timber species // *Annals of Forest Science*. 2017. V. 74. No. 2. P. 30.
24. *Barmpoutis P., Dimitropoulos K., Barboutis I., Grammalidis N., Lefakis P.* Wood species recognition through multidimensional texture analysis // *Computers And Electronics In Agriculture*. 2018. V. 144. P. 241—248.
25. *Yusof R.A., Ahmad A.B., Khairuddin A.S.M.C.* Transfer learning approach in automatic tropical wood recognition system // *Computational and Experimental Simulations in Engineering*. 2020. V. 75. P. 1225—1233.
26. *Zhao P., Han J.C., Wang C.K.* Classification of wood species using hyperspectral microscopic imaging based on I-BGLAM texture and spectral fusion // *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2021. V. 41. No. 2. P. 599—605.
27. *Bruno O., Ribas L., Condori R. M., Scabini L. S., Bruno O., Ribas L.* и др. Evaluating deep convolutional neural networks as texture feature extractors // *International Conference on Image Analysis and Processing*, 2019.
28. *Fabijanska A., Danek M., Barniak J.* Wood species automatic identification from wood core images with a residual convolutional neural network // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. V. 181. P. 105941.
29. *Wang Y., Zhang W., Gao R., Jin Z., Wang X.H.* Recent advances in the application of deep learning methods to forestry // *Wood Science and Technology*. 2021. V. 55. No. 5. P. 1171—1202.
30. *Chen L.X., Ge Z.D., Luo R.* и др. Identification of CT image defects in wood based on convolution neural network // *Entia Silvae Sinicae*. 2018. V. 54. No. 11. P. 127—133.
31. *Wang H., Li Z., Zou X.* Wood surface defect detection based on adaboost and CNN (Article) // *Journal of System Simulation*. 2019. V. 31. No. 8. P. 1636—1645.
32. *Shi J., Li Z., Zhu T., Wang D., Ni C.* Defect detection of industry wood veneer based on NAS and multi-channel mask R-CNN // *Sensors*. 2020. V. 20. No.16. P. 4398.
33. *Yusof R.A., Ahmad A.B., Khairuddin A.S.M.C.* Transfer learning approach in automatic tropical wood recognition system // *Computational and Experimental Simulations in Engineering*. 2020. V. 75. P. 1225—1233.
34. *Wu F., Gazo R., Haviarova E., Benes B.* Wood identification based on longitudinal section images by using deep learning // *Wood Science and Technology*. 2021. V. 55. No. 2. P. 553—563.
35. *Ravindran P., Costa A., Soares R., Wiedenhoefst A.C.* Classification of CITES-listed and other neotropical Meliaceae wood images using convolutional neural networks // *Plant Methods*. 2018. V. 14. No. 1. P. 25.
36. *Briechele S., Krzystek P., Vosselman G.* Silvi-Net-A dual-CNN approach for combined classification of tree species and standing dead trees from remote sensing data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. V. 98. P. 102292.
37. *Verly Lopes D.J., Burgreen G.W., Entsminger E.D.* North American hardwoods identification using machine-learning // *Forests*. 2020. V. 11. No. 3. P. 298.

38. *Wu F., Gazo R., Haviarova E., Benes B.* Wood identification based on longitudinal section images by using deep learning // *Wood Science and Technology*. 2021. V. 55. No. 2. P. 553—563.
  39. *Zhao Z.Y., Yang X.X., Ge Z.D., Zhou Y.C.* Wood microscopic image identification method based on convolution neural network // *BioResources*. 2021. V. 16. No. 3. P. 4986—4999.
  40. *Kita Y., Sugiyama J.J.* Wood identification of two anatomically similar cupressaceae species based on two-dimensional microfibril angle mapping // *Holzforschung*. 2021. V. 75. No. 7. P. 591—602.
  41. *Shanthi T., Sabeenian R.S.* Modified Alexnet architecture for classification of diabetic retinopathy images // *Computers and Electrical Engineering*. 2019. V. 76. P. 56—64.
  42. *Unnikrishnan A., Sowmya V., Soman K.P.* Deep AlexNet with reduced number of trainable parameters for satellite image classification // *Procedia Computer Science*. 2018. V. 143. P. 931—938.
  43. *Paisitkriangkrai S., Shen C., Anton V.D.H.* Learning to rank in person re-identification with metric ensembles / *IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*. 2015.
  44. *Arredondo J.R.P., Tanscheit R., Monteiro E.C., da Silva E.C., de Sousa I.P.* Classification of mechanisms underlying cardiac arrhythmias by deep learning // *Research on Biomedical Engineering*. 2020. V. 36. No. 4. P. 475—487.
  45. *Polat Z.* Detection of Covid-19 from chest CT images using xception architecture: A deep transfer learning based approach // *Sakarya University Journal of Science*. 2021. V. 25. No. 3. P. 813—823.
  46. *Feng B., Liu Y., Chi H., Chen X.Z.* Hyperspectral remote sensing image classification based on residual generative adversarial neural networks // *Signal Processing*. 2023. V. 213. No. 9. P. 109202.
  47. *Yao Q.Y., Zhang L.M., Zheng W.G., Zhou Y.X.* Multi-scale SE-residual network with transformer encoder for myocardial infarction classification // *Applied Soft Computing*. 2023. V. 149. P. 110919.
-

## ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ОГНЕСТОЙКОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ФРОНТА НИЗОВОГО ПОЖАРА И ГОРЯЩИХ И ТЛЕЮЩИХ ЧАСТИЦ

© 2024 г. Д.П. Касымов<sup>1,2,\*</sup>, М.В. Агафонцев<sup>1,\*\*</sup>, В.А. Перминов<sup>2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 36

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

E-mail: \*denkasymov@gmail.com; \*\*kim75mva@gmail.com; \*\*\*perminov@tpu.ru

Поступила в редакцию 30.08.2024; после доработки 06.09.2024

Принята к публикации 06.09.2024

Экспериментально исследовано взаимодействие горящих и тлеющих частиц и лесного горючего материала с последующим воздействием на некоторые виды горючих строительных материалов и конструкций на основе древесины. Получены значения теплового потока, генерируемого тлеющими частицами, а также проанализировано поле температуры наиболее теплонапряженных участков исследуемых конструкций с применением бесконтактных методов ИК-диагностики в узких спектральных диапазонах инфракрасных длин волн. В инфракрасной области излучение поверхности образцов регистрировалось с помощью тепловизора JADE J530SB с применением оптического фильтра 2,5—2,7 мкм, который позволял измерять температуру в интервале 310—1500 К. Для интерпретации зарегистрированного излучения от исследуемого образца были использованы калибровки, поставляемые изготовителем узкополосного оптического фильтра.

*Ключевые слова:* инфракрасная термография, низовой пожар, темп нагрева, эксперимент, строительные конструкции.

## INFRARED THERMOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF WOOD FIRE RESISTANCE UNDER COMBINED THERMAL EFFECT CONDITIONS FROM A GROUND FIRE FRONT AND FIREBRANDS

© 2024 D.P. Kasymov<sup>1,2,\*</sup>, M.V. Agafontsev<sup>1,\*\*</sup>, V.A. Perminov<sup>2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Russia 634050 Tomsk, 36 Lenin Ave

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634050 Tomsk, 30 Lenin Ave

E-mail: \*denkasymov@gmail.com; \*\*kim75mva@gmail.com; \*\*\*perminov@tpu.ru

Experiments were conducted on certain types of combustible building materials and wood-based structures to determine the interaction between firebrands and forest fuel (FF). Using non-contact IR diagnostic methods in narrow spectral ranges of infrared wavelengths, the heat flux values generated by firebrands and the temperature field of the most heat-stressed sections of the structures under study were determined. Using a JADE J530SB thermal imager with an optical filter of 2,5—2,7 m, temperatures in the range 310—1500 K were measured in the infrared region. In order to interpret the recorded emission from the test sample, calibrations supplied by the narrowband optical filter manufacturer were used.

*Keywords:* infrared thermography, forest fire, heating rate, experiment, building structures, fire resistance.

DOI: 10.31857/S0130308224100058

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день при исследовании процессов горения и природных пожаров активно применяются современные методы инфракрасной (ИК) диагностики [1—8]. Выработан ряд рекомендаций по применению термографии при испытании древесины, строительных материалов на огнестойкость и пожарную опасность, однако имеющиеся данные требуют проведения дополнительных экспериментов по исследованию пожароопасных характеристик различных материалов, используемых в строительстве, методом ИК-диагностики. Применение данного метода позволяет оценить поле истинных температур в динамике при лабораторных и натурных огневых испытаниях элементов зданий и строительных сооружений из древесины [9, 10]. Разработка на основе этих данных методики испытания различных строительных конструкций, выполненных из древесины, на огнестойкость и пожарную опасность с применением термографии позволит снизить стоимость проведения такого рода работ при одновременном повышении оперативности получения данных, разрешающей способности и информативности результатов. Следует отметить, что задача не сводится лишь к практическим аспектам противо-

пожарной защиты зданий и сооружений на основе древесины, но является заделом для совершенствования физико-математической теории природных пожаров и позволяет продвинуться в понимании процессов образования, переноса горящих частиц и их потенциала воспламенить горючие материалы и инициировать пятнистые пожары.

Известно, что горящие частицы, образующиеся при лесном пожаре, а также горении различных конструкций, являются источником быстрого распространения пламени и вносят значительный вклад в распространение пожаров на природно-урбанизированной территории [11].

Вероятность возгорания конструкции зависит как от физических свойств материалов, так и от условий теплового воздействия. В научной литературе имеется ряд публикаций, посвященных непосредственному влиянию воздействия потока горящих и тлеющих частиц на воспламенение различных элементов строительных конструкций. В частности, в работах [12—14] изучалось взаимодействие потока частиц, генерируемых на специальных установках, с различными типами конструкций из древесины (терраса, вертикальная стенка, крыша здания и др.). Основной фокус исследований был направлен на оценку повреждений в результате аккумуляции частиц при их длительном воздействии, а также на понимание того, как внешние факторы, такие как скорость ветра, масса частиц и влагосодержание рассматриваемых образцов, влияют на характеристики зажигания и воспламенения.

Тем не менее, лишь в ограниченном числе работ ИК-термография применена в качестве измерительного метода. Так, в работе [15] авторы сосредоточились на рассмотрении влияния расстояния между несколькими горящими частицами и их способности к воспламенению конструкций из древесины при различной скорости воздушного потока в зоне их аккумуляции. Применение бесконтактной диагностики позволило оценить распределение температуры в зоне аккумуляции частиц, а также в динамике проанализировать развитие площади горения материала при различных параметрах эксперимента, не внося никаких возмущений.

В работах [16, 17] используется высокоскоростная цифровая камера, а также методы анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry — PIV) для изучения характеристик частиц и анализа процессов теплообмена в зоне контакта частиц и поверхности рассматриваемого образца. Кроме этого, ИК-камеры используют для косвенной регистрации тепловой картины в эксперименте, в частности, для оценки масштабов пламени [18]. Известно, что применение методов термографии связано с необходимостью выбора рабочего спектрального диапазона и определения коэффициента излучения пламени. Применение узкополосных фильтров в ИК-камере обусловлено следующими факторами: динамическим диапазоном матрицы ИК-детектора и спектром излучения пламени. Однако в вышеуказанных работах этим аспектам не уделено достаточного внимания.

Целью работы является физическое моделирование взаимодействия потока горящих и тлеющих частиц с некоторыми видами горючих строительных материалов и конструкций на основе древесины (на примере модели террасы, ограждения комбинированного типа, а также внутреннего угла) с последующей оценкой их теплофизических параметров (поле температуры, темп нагрева образца, тепловые потоки, а также времена задержки зажигания) на основе применения методов ИК-термографии.

## СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили в Большой аэрозольной камере (БАК) Института оптики атмосферы СО РАН, входящей в состав центра коллективного пользования «Атмосфера». Объем камеры составляет 2000 м<sup>3</sup>. Работа в этой камере позволяет избавиться от эффекта бокового и встречного ветра, неизбежно присутствующего при полевых работах и влияющего на характеристики летящих частиц. С целью дооснащения системы регистрации концентраций органического аэрозоля была модернизирована система принудительной вытяжки, а система забора атмосферного воздуха с последующей глубокой фильтрацией была дооснащена функцией подогрева поступающего в БАК воздуха с помощью электрического калорифера СФО-100 высокой мощности (90 кВт).

На рис. 1 представлена экспериментальная площадка с размещенным на ней оборудованием.

Для решения задач измерения теплофизических характеристик (ТФХ) древесных конструктивных элементов в данном исследовании применяли высокоточную ИК-камеру научного класса совместно с группой контактных датчиков, состоявшей из термопар и датчика теплового потока.

Экспериментальное оборудование включало: ИК-камеру JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром (рабочая длина волны 2,5—2,7 мкм), позволяющую регистрировать температуру в диапазоне 300—1500 °С, выбор которого обусловлен большой интенсивно-

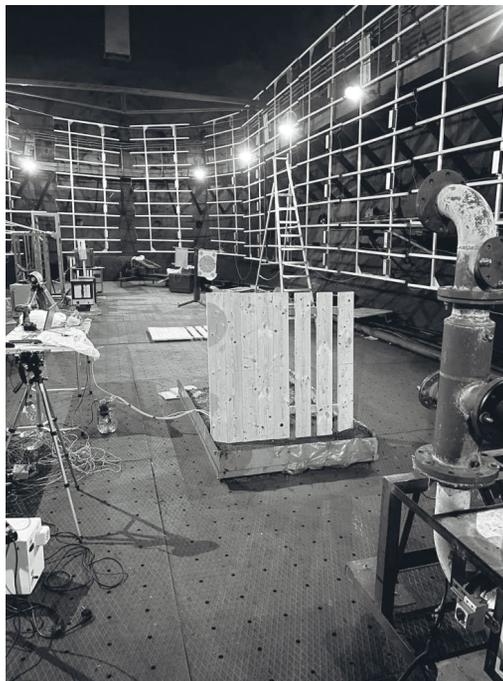


Рис. 1. Фотография экспериментального стенда непосредственно перед экспериментом.

стью излучения паров воды и углекислого газа в используемом спектральном диапазоне, а также объектив с фокусным расстоянием 50 мм. В установку также входили видеокамеры Canon LEGRIA HF R86 («Canon Inc.», Китай) и Sony FDR X3000 («Sony Group Corporation», Китай) для оценки задержки зажигания рассматриваемых образцов древесных строительных материалов и фиксации процесса генерации и переноса частиц; термопары типа К с диаметром спая 200 мкм для оценки поля температуры вблизи поверхности деревянных образцов; датчик теплового потока Hukseflux SBG01 с рабочим диапазоном 0—100 кВт/м<sup>2</sup>; прибор АКПП-74824А для регистрации термоЭДС; анализатор влажности AND MX-50 для контроля влагосодержания исследуемых образцов. Формат ИК-термограммы — 320 × 240 пикселей. Частота регистрации термограмм составляла 7 Гц. Расстояние от выходной части генератора частиц до тепловизора было равно 3 м. Физическая область, анализируемая ИК-камерой, составляла 0,71 × 0,53 м.



Рис. 2. Установка генерации горящих и тлеющих частиц [19].

Модель конструкции забора устанавливали на подложку, состоявшую из слоя земли, толщина которого составляла минимум 50 мм, а также слоя хвой сосны. Площадь участка земли, которая была покрыта хвоей, равна  $0,5 \text{ м}^2$ , высота слоя лесного горючего материала —  $0,03 \text{ м}$ . Запас хвой в эксперименте был равен  $0,4 \text{ кг/м}^3$ . Инициацию процесса зажигания подложки хвой производили при помощи генератора горящих и тлеющих частиц. В качестве частиц использовали сосновые пеллеты, представляющие собой спрессованную стружку хвойной породы древесины. Диаметр пеллет составлял от 5 до 6 мм, а длина — от 5 до 20 мм. Масса частиц, загружаемая в реактор генератора, не превышала 150 г.

Генератор горящих и тлеющих частиц позволял воспроизвести условия возникновения и переноса горящих и тлеющих частиц при лесных пожарах. Фотография установки представлена на рис. 2.

Установка имеет функциональную возможность длительной и непрерывной подачи горючего материала, для чего в канал подачи частиц установлен шнековый механизм, а также создания воздушной противодымовой завесы для более безопасной эксплуатации в закрытых помещениях [20].

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате регистрации процесса горения подложки с хвоей и локального перехода процесса на деревянную конструкцию были получены наборы термограмм, обработку которых осуществляли с помощью программного обеспечения «Altair». На термограмме устанавливали контрольные линии, расстояние между которыми составляло 50 мм, а затем для каждой из линий была получена усредненная температура. В случае модели конструкции забора с зазором (рис. 3б) усреднение производилось по дополнительным пяти линиям, находившимся на одной прямой.

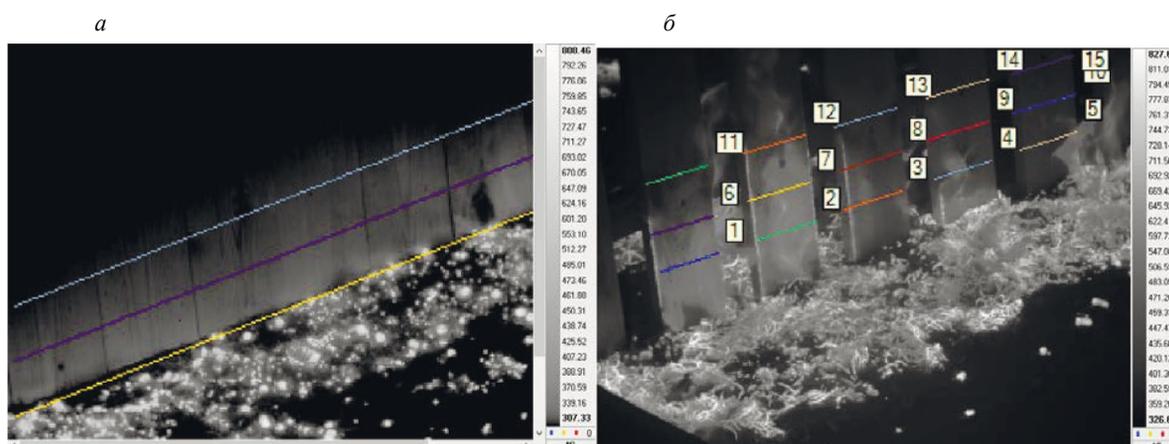


Рис. 3. Мгновенная термограмма процесса воздействия пламени на модельную конструкцию забора.

В результате были получены кривые, представляющие процесс нагрева поверхности исследуемых конструкций (рис. 4). Три линии, показанные на графиках, представляют собой изменение усредненной температуры, которая совпадает с соответствующей горизонтальной линией на термограмме (см. рис. 3). Область, закрашенная между линиями, показывает диапазон изменения температуры.

Анализируя графики, приведенные на рис. 4, можно сделать вывод, что конструкционный элемент забора сплошного типа подвержен более интенсивному нагреву, нежели продуваемая конструкция (см. рис. 3б).

Установлено, что температура поверхности сплошной конструкции (см. измерительные линии на рис. 3) в зоне последующего воспламенения достигает  $895\text{—}937 \text{ К}$ , что превышает примерно на 60 град температуру поверхности штакетника и является причиной воспламенения. Можно предположить, что в данном случае на рост температуры поверхности оказывает влияние сплошность щита и соответственно более продолжительное время его нагрева и воспламенения фронтом пожара. Геометрия элемента сплошного забора в эксперименте играла

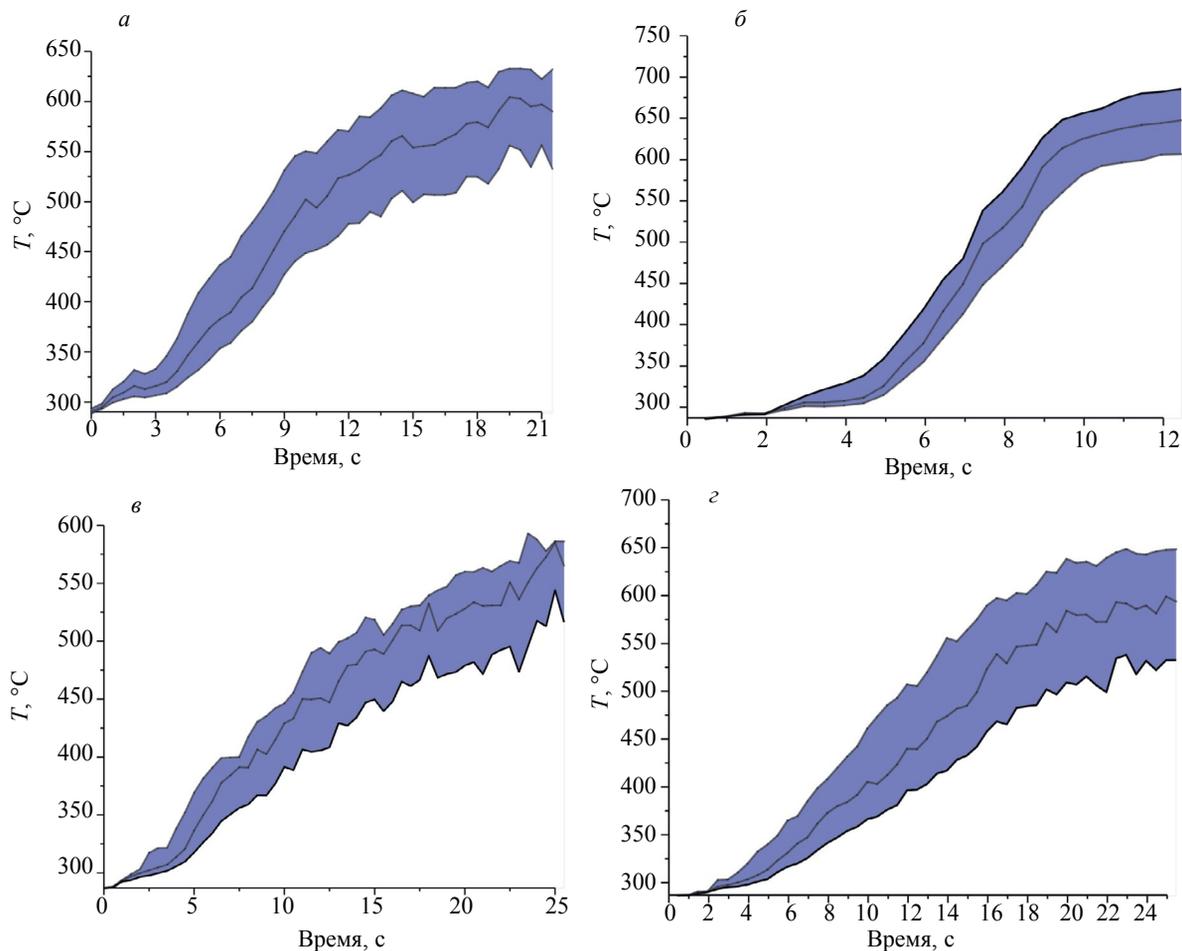


Рис. 4. Кривые распределения поля температуры поверхности рассматриваемых образцов из древесины во времени: а, б — сплошное ограждение; в, г — ограждение продуваемого типа (штaketник).

роль преграды, от которой частицы рикошетили, тем самым вероятность их аккумуляции непосредственно вблизи конструкции увеличивалась.

По результатам анализа полученных термограмм температура частиц в момент падения находилась в пределах 490—650 °С. При этом температура в момент выброса частиц из генератора составляла 750—800 °С, что согласуется с работой [21], в которой в лабораторных условиях анализировали ТФХ горящих и тлеющих частиц, образующихся при лесном пожаре.

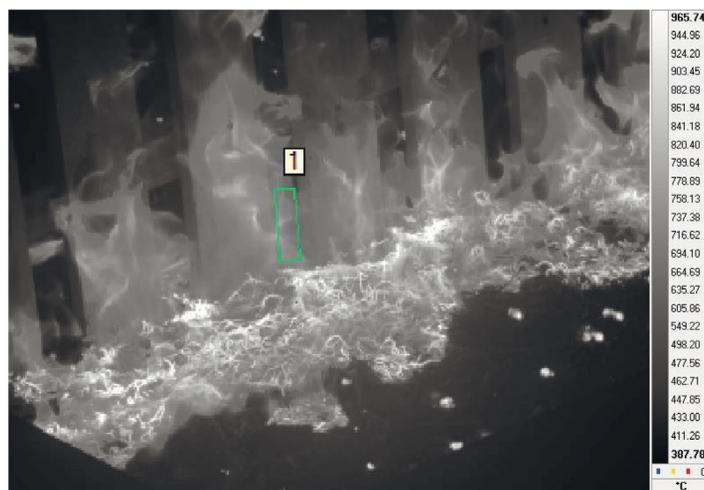


Рис. 5. Термограмма развития горения хвои сосны вблизи поверхности деревянного ограждения.

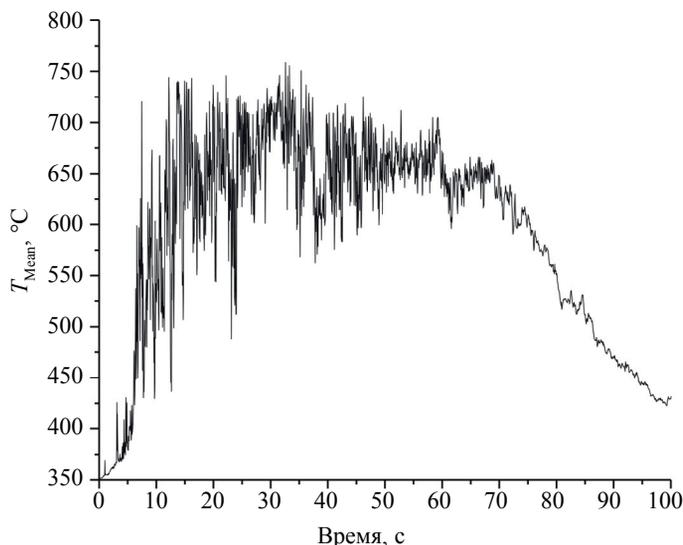


Рис. 6. Изменение температуры пламени при горении хвои: *a* — эксперимент с сплошным ограждением; *b* — ограждение продуваемого типа.

Использование метода ИК-термографии позволило оценить температуру пламени при горении хвои вблизи конструкции. Результаты представлены на рис. 5, 6.

Из рисунков видно, что температура в пламени достигает средних значений 990—1030 К, а температура поверхности штакетника достигает максимальных значений 826—920 К в выделенных областях 1—15 (см. рис. 3), что согласуется с данными работы [22—24]. По результатам анализа полученных данных можно сделать вывод, что при выбранных параметрах эксперимента забор продуваемого типа имеет более высокую склонность к воспламенению.

Кроме того, был определен тепловой поток при сгорании насыпки рассматриваемых в экспериментах лесных и степных горючих материалов.

## ВЫВОДЫ

Использование бесконтактного метода ИК-диагностики позволило экспериментально определить распределение температуры на поверхности образцов строительного материала в результате воздействия модельного очага горения. Применение методов ИК-термографии позволило идентифицировать теплонапряженные участки на поверхности моделей деревянных конструкций в результате воздействия фронта низового лесного пожара, а также оценить с высокой точностью их характерные размеры. В частности, температура частиц в момент падения находилась в пределах 490—650 °С. При этом температура в момент выброса частиц из генератора составляла 750—800 °С. Установлено, что температура поверхности сплошной конструкции в зоне последующего воспламенения достигает 895—937 К, что превышает примерно на 60 град температуру поверхности штакетника и является причиной воспламенения.

Таким образом, становится возможным осуществлять прогноз поведения материала в условиях теплового воздействия без внесения возмущений, что является важной задачей в области пожарно-технических испытаний строительных материалов и огнезащиты. Полученные результаты могут служить в качестве дополнительных рекомендаций при разработке методов испытаний строительных материалов и огнезащитных составов на пожарную опасность.

В качестве рекомендаций установлено, что непосредственное воздействие низового пожара слабой интенсивности на элементы конструкций из древесины не приводит к значительным повреждениям, а возгорание наблюдается лишь в некоторых случаях. Однако если на территории частного дома, в непосредственной близости от строения, есть мусор, он может воспламениться от падающих горящих частиц, и огонь перейдет на саму постройку. Противостоять такой проблеме поможет скашивание травы как на участке, так и за его пределами, причем необходимо производить скашивание по периметру объекта шириной не менее 5 м, с удалением скошенных растительных материалов. Важным мероприятием является организация пространства на участке (территории), где расположены потенциально горючие материалы в соответствии с правилами пожарной безопасности, а именно их хранение в специально отведенных для этого местах, обработка элементов конструкций специальными огнезащитными составами и др. Для снижения

риска воспламенения заборов от пожара следует выбирать ограждения продуваемого типа, а также использовать поверхностную огнезащитную обработку.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (No 24-21-00069).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suzuki S., Brown A., Manzello S.L., Suzuki J., Hayashi Y. Firebrands generated from a full-scale structure burning under well-controlled laboratory conditions // *Fire Saf. J.* 2014. V. 43—51. P. 43—51.
2. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing: development of conventional directions and new trends (a review) // *Rus. J. NDT.* 2023. V. 59. No. 6. P. 702—723.
3. O'Brien J.J., Loudermilk E.L., Hornsby B., Hudak A.T., Bright B.C., Dickinson M.B., Hiers J.K., Teske C., Ottmar R.D. High-resolution infrared thermography for capturing wildland fire behaviour: RxCADRE 2012 // *Int. J. of Wildland Fire.* 2016. V. 25. P. 62—75.
4. Rios O., Pastor E., Valero M.M., Planas E. Short-term fire front spread prediction using inverse modelling and airborne infrared images // *Int. J. of Wildland Fire.* 2016. V. 25. P. 1033—1047.
5. Filkov Alexander I., Tihay-Felicelli Virginie, Masoudvaziri Nima, Rush David, Valencia Andres, Wang Yu, Blunck David L., Valero Mario Miguel, Kempna Kamila, Smolka Jan, De Beer Jacques, Campbell-Lochrie Zakary, Centeno Felipe Roman, Ibrahim Muhammad Asim, Lemmertz Calisa Katuscia, Tam Wai Cheong. A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment // *Fire Saf. J.* 2023. V. 140. P. 103871.
6. Sofan P., Bruce D., Jones E., Marsden J. Detecting peatland combustion using shortwave and thermal infrared landsat-8 data // *Advan. in Forest Fire Res.* 2018. P. 969—979.
7. Beringer Elias D., Hodges Jonathan L., Yang Fengchang, Rippe Christian M., Lattimer Brian Y. Localized heat transfer from firebrands to surfaces // *Fire Saf. J.* 2021. V. 120. P. 103037.
8. Caton S.E., Hakes R.S.P., Gorham D.J., Zhou A., Gollner M.J. Review of pathways for building fire spread in the wildland urban interface part I: exposure conditions // *Fire Technol.* 2017. V. 53. P. 429—473.
9. Kasymov D., Agafontsev M., Perminov V., Martynov P., Reyno V., Loboda E. Experimental Investigation of the Effect of Heat Flux on the Fire Behavior of Engineered Wood Samples // *Fire.* 2020. V. 3. P. 61.
10. Aydin T.Y. Temperature Influenced Anisotropic Elastic Parameters of Red Pine // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2022. V. 58. P. 548—562.
11. Manzello S.L., Suzuki S., Gollner M.J., Fernandez-Pello A.C. Role of firebrand combustion in large outdoor fire spread // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2020. V. 76. P. 100—801.
12. Suzuki S., Manzello S.L. Ignition vulnerabilities of combustibles around houses to firebrand showers: further comparison of experiments // *Sustainability.* 2021. V. 13. P. 21—36.
13. Manzello S.L., Bianchi R., Gollner M.J., Gorham D., McAllister S., Pastor E., Planas E., Reszka P., Suzuki S. Summary of workshop large outdoor fires and the built environment // *Fire Saf. J.* 2018. V. 100. P. 76—92.
14. Bartlett A.I., Hadden R.M., Bisby L.A. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction // *Fire Technol.* 2019. V. 55. P. 1—49.
15. Kwon B., Liao Y.T. Ignition propensity of structural materials exposed to multiple firebrands in wildland-urban interface (WUI) fires: effects of firebrand distribution and ambient wind / *Conf. Spr. Techn. Meet. Cent. St. Sec. Comb. Inst. at: Detroit, Michigan.* 2022.
16. Baldwin J.H., Sunderland P.B. Ratio pyrometry of emulated firebrand streaks // *Fire Saf. J.* 2023. V. 136. P. 103746.
17. Abul-Huda Yasin M., Bouvet Nicolas. Thermal dynamics of deposited firebrands using phosphor thermometry // *Proc. Comb. Ins.* 2021. V. 38. No. 3. P. 4757—4765.
18. Lauterbach Alec, Lee Sangkyu, De Beer Jacques, Stoliarov Stanislav I., Sunderland Peter B., Gollner Michael J., Filkov Alexander I., Horn Gavin P. Ignition and combustion behavior of pressure treated wood and wood-plastic composite exposed to glowing firebrand piles: Impact of air flow velocity, firebrand coverage density and pile orientation // *Fire Saf. J.* 2024. V. 147. P. 104198.
19. Касымов Д.П., Перминов В.А., Рейно В.В., Фильков А.И., Лобода Е.Л. Экспериментальная установка по генерации горящих частиц для исследования распространения природного пожара // *Известия вузов. Физика.* 2017. Т. 60. № 12/2. С. 107—112.
20. Касымов Д.П., Перминов В.В., Фильков А.И., Агафонцев М.В., Рейно В.В., Лобода Е.Л. Генератор горящих и тлеющих частиц для плоховентилируемых помещений // *Патент РФ 199698 (опубл. 15.09.2020).*
21. Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Reyno V.V., Kozlov A.V., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I., Stolyarchuk N.D. A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition // *Int. J. Wild. Fire.* 2014. V. 23. P. 445—449.
22. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Tarakanova V.A., Loboda E.L., Martynov P.S., Orlov K.E., Reyno V.V. Effect of wood structure geometry during firebrand generation in laboratory scale and semi-field experiments // *J. of Phys.: Conf. S.* 2021. V. 1867.
23. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V., Loboda E.L., Loboda Yu.A., Reyno V.V., Orlov K.E. Ignition resistance of wood building structures exposed to a firebrand shower // *Combust. Explos. Shock Waves.* 2023. V. 59. P. 206—214.

24. Arruda M.R.T., Cantor P., Bicelli A., Branco F. Thermal reaction of firebrand accumulation in construction materials // *Case Stud. Constr. Mater.* 2024. V. 20. P. e02985.

## REFERENCES

1. Suzuki S., Brown A., Manzello S.L., Suzuki J., Hayashi Y. Firebrands generated from a full-scale structure burning under well-controlled laboratory conditions // *Fire Saf. J.* 2014. V. 43—51. P. 43—51.
2. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing: development of conventional directions and new trends (a review) // *Rus. J. NDT.* 2023. V. 59. No. 6. P. 702—723.
3. O'Brien J.J., Loudermilk E.L., Hornsby B., Hudak A.T., Bright B.C., Dickinson M.B., Hiers J.K., Teske C., Ottmar R.D. High-resolution infrared thermography for capturing wildland fire behaviour: RxCADRE 2012 // *Int. J. of Wildland Fire.* 2016. V. 25. P. 62—75.
4. Rios O., Pastor E., Valero M.M., Planas E. Short-term fire front spread prediction using inverse modelling and airborne infrared images // *Int. J. of Wildland Fire.* 2016. V. 25. P. 1033—1047.
5. Filkov Alexander I., Tihay-Felicelli Virginie, Masoudvaziri Nima, Rush David, Valencia Andres, Wang Yu, Blunck David L., Valero Mario Miguel, Kempna Kamila, Smolka Jan, De Beer Jacques, Campbell-Lochrie Zakary, Centeno Felipe Roman, Ibrahim Muhammad Asim, Lemmert Calisa Katuscia, Tam Wai Cheong. A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment // *Fire Saf. J.* 2023. V. 140. P. 103871.
6. Sofan P., Bruce D., Jones E., Marsden J. Detecting peatland combustion using shortwave and thermal infrared landsat-8 data // *Advan. in Forest Fire Res.* 2018. P. 969—979.
7. Bearinger Elias D., Hodges Jonathan L., Yang Fengchang, Rippe Christian M., Lattimer Brian Y. Localized heat transfer from firebrands to surfaces // *Fire Saf. J.* 2021. V. 120. P. 103037.
8. Caton S.E., Hakes R.S.P., Gorham D.J., Zhou A., Gollner M.J. Review of pathways for building fire spread in the wildland urban interface part I: exposure conditions // *Fire Technol.* 2017. V. 53. P. 429—473.
9. Kasymov D., Agafontsev M., Perminov V., Martynov P., Reyno V., Loboda E. Experimental Investigation of the Effect of Heat Flux on the Fire Behavior of Engineered Wood Samples // *Fire.* 2020. V. 3. P. 61.
10. Aydin T.Y. Temperature Influenced Anisotropic Elastic Parameters of Red Pine // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2022. V. 58. P. 548—562.
11. Manzello S.L., Suzuki S., Gollner M.J., Fernandez-Pello A.C. Role of firebrand combustion in large outdoor fire spread // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2020. V. 76. P. 100—801.
12. Suzuki S., Manzello S.L. Ignition vulnerabilities of combustibles around houses to firebrand showers: further comparison of experiments // *Sustainability.* 2021. V. 13. P. 21—36.
13. Manzello S.L., Bianchi R., Gollner M.J., Gorham D., McAllister S., Pastor E., Planas E., Reszka P., Suzuki S. Summary of workshop large outdoor fires and the built environment // *Fire Saf. J.* 2018. V. 100. P. 76—92.
14. Bartlett A.I., Hadden R.M., Bisby L.A. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction // *Fire Technol.* 2019. V. 55. P. 1—49.
15. Kwon B., Liao Y.T. Ignition propensity of structural materials exposed to multiple firebrands in wildland-urban interface (WUI) fires: effects of firebrand distribution and ambient wind / *Conf. Spr. Techn. Meet. Cent. St. Sec. Comb. Inst. at: Detroit, Michigan.* 2022.
16. Baldwin J.H., Sunderland P.B. Ratio pyrometry of emulated firebrand streaks // *Fire Saf. J.* 2023. V. 136. P. 103746.
17. Abul-Huda Yasin M., Bouvet Nicolas. Thermal dynamics of deposited firebrands using phosphor thermometry // *Proc. Comb. Ins.* 2021. V. 38. No. 3. P. 4757—4765.
18. Lauterbach Alec, Lee Sangkyu, De Beer Jacques, Stolarov Stanislav I., Sunderland Peter B., Gollner Michael J., Filkov Alexander I., Horn Gavin P. Ignition and combustion behavior of pressure treated wood and wood-plastic composite exposed to glowing firebrand piles: Impact of air flow velocity, firebrand coverage density and pile orientation // *Fire Saf. J.* 2024. V. 147. P. 104198.
19. Kasymov D.P., Perminov V.V., Reyno V.V., Filkov A.I., Loboda E.L. An experimental apparatus for firebrand generation applied to wildland fire spread // *Russ. Phys. J.* 2017. V. 60. № 12/2. P. 107—112.
20. Kasymov D.P., Perminov V.V., Filkov A.I., Agafontsev M.V., Reyno V.V., Loboda E.L. Generator of firebrands for poorly ventilated areas / Patent of Russia 199698 (publ.15.09.2020).
21. Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Reyno V.V., Kozlov A.V., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I., Stolyarchuk N.D. A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition // *Int. J. Wild. Fire.* 2014. V. 23. P. 445—449.
22. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Tarakanova V.A., Loboda E.L., Martynov P.S., Orlov K.E., Reyno V.V. Effect of wood structure geometry during firebrand generation in laboratory scale and semi-field experiments // *J. of Phys.: Conf. S.* 2021. V. 1867.
23. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V., Loboda E.L., Loboda Yu.A., Reyno V.V., Orlov K.E. Ignition resistance of wood building structures exposed to a firebrand shower // *Combust. Explos. Shock Waves.* 2023. V. 59. P. 206—214.
24. Arruda M.R.T., Cantor P., Bicelli A., Branco F. Thermal reaction of firebrand accumulation in construction materials // *Case Stud. Constr. Mater.* 2024. V. 20. P. e02985.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КОНТРОЛЮ ТРЕЩИН НА РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

© 2024 г. Юбинь Чжан<sup>1</sup>, Чангханг Сюй<sup>1,\*</sup>, Пэнцянью Лю<sup>1</sup>, Руи Лю<sup>1</sup>, Цин Чжао<sup>1</sup>, Лонгбо Ванг<sup>1</sup>, Цзин Се<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Китайский нефтяной университет (Восточный Китай), Циндао, 266580, Китай  
E-mail: \*chxu@upc.edu.cn

Поступила в редакцию 16.07.2024; после доработки 16.07.2024  
Принята к публикации 13.08.2024

Резьбовые соединения, являясь важным типом соединений, в процессе производства и эксплуатации довольно часто оказываются подвержены образованию трещин на резьбовых поверхностях, что может привести к механическому разрушению. Сложная геометрия резьбовых соединений создает большие проблемы для традиционных методов неразрушающего контроля (НК). Таким образом, важным является разработка продвинутой и отвечающей современным требованиям методики неразрушающего контроля для обнаружения трещин на резьбовых поверхностях. В данном исследовании изучается применимость электромагнитной термографии (ЭМТ) для контроля трещин. Принцип контроля был рассмотрен на основе законов электромагнитной индукции и теплопроводности. Эксперименты проводились на четырех болтах с трещинами на резьбовых поверхностях с использованием методики ЭМТ. Эффективность ЭМТ была подтверждена анализом термограмм и температурных откликов. Кроме того, мы изучили влияние нескольких ключевых параметров, включая ориентацию катушки возбуждения, расположение катушки возбуждения, амплитуду тока возбуждения и размер трещины, на результаты контроля. Полученные результаты свидетельствуют о том, что ЭМТ представляет собой эффективный и практичный метод обнаружения трещин на резьбовых поверхностях.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, электромагнитная термография (ЭМТ), трещины, резьбовые поверхности.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE INSPECTION OF CRACKS ON THREADED SURFACES USING ELECTROMAGNETIC THERMOGRAPHY

© 2024 Yubin Zhang<sup>1</sup>, Changhang Xu<sup>1,\*</sup>, Pengqian Liu<sup>1</sup>, Rui Liu<sup>1</sup>, Qing Zhao<sup>1</sup>, Longbo Wang<sup>1</sup>, Jing Xie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China University of Petroleum (East China), Qingdao, 266580, China  
E-mail: \*chxu@upc.edu.cn

As an important connection type, threaded connections are very easily damaged by cracks on the threaded surfaces during the production and service period, which would lead to mechanical failure. The complicated geometry of threaded connections brings great challenges to conventional non-destructive testing (NDT) methods. Thus, it is important to develop an advanced and suitable NDT technology to detect cracks on threaded surfaces. This study investigates the applicability of electromagnetic thermography (ET) for crack inspection. The inspection principle was examined based on electromagnetic and thermal conduction laws. Experiments were conducted on four bolts with cracks on their threaded surfaces using ET technology. The effectiveness of ET was verified through the analysis of thermograms and temperature responses. In addition, we also study the influence of several key parameters, including excitation coil orientation, excitation coil location, the amplitude of excitation current, and crack size, on the detection results. The findings indicate that ET offers an efficient and practical method for inspecting cracks on threaded surfaces.

*Keywords:* nondestructive testing, electromagnetic thermography (ET), cracks, threaded surfaces.

DOI: 10.31857/S0130308224100067

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Являясь одним из надежных, безопасных и экономичных способов соединения механических компонентов, резьбовые соединения широко используются в различных областях техники, например, соединения болт — гайка в мостах и морских сооружениях, резьбовые трубы в нефтегазодобывающем оборудовании [1—3]. Однако под действием сложных напряжений резьбовое соединение обычно разрушается из-за появления трещин в течение эксплуатационного периода [4]. С ростом трещины прочность соединения резко снижается вплоть до серьезных происшествий [5]. Поэтому очень важно обнаруживать трещины на резьбовых поверхностях, чтобы избегать серьезных аварий.

Для обнаружения трещин на резьбовых поверхностях применяется несколько неразрушающих методов (НК), таких как магнитопорошковый контроль [6], ультразвуковой контроль

[7], контроль рассеяния магнитного потока [8], вихретоковый контроль [9], измерение поля переменного тока [10]. Однако эти методы все еще имеют множество ограничений. При проведении магнитопорошкового контроля необходимо тщательно очистить поверхность исследуемой резьбы, чтобы избежать ложных индикаций. Кроме того, для повышения чувствительности контроля к микротрещинам обычно требуется использование флуоресцентного магнитного порошка. В этом случае контроль должен проводиться в специальных условиях, что неудобно при контроле *in-situ*. При ультразвуковом контроле (УЗК) используется специальный датчик для контроля резьбы путем точечного сканирования поверхности резьбы, что приводит к низкой эффективности контроля. Кроме того, только глубокие трещины с большими продольными размерами могут быть успешно обнаружены с помощью этого метода, что объясняется принципом метода УЗК. Неглубокие трещины обычно не замечаются с помощью метода УЗК. Контроль утечки магнитного потока, в котором используются датчики Холла для контроля рассеивания потока на дефекте, не подходит для образцов со сложной геометрической формой. Для вихретоковых измерений сложная геометрия резьбы вызывает изменения в импедансе катушки, которые часто превышают влияние трещин на импеданс катушки, что может помешать результатам испытаний. Несмотря на то, что измерение поля переменного тока (ИППТ) также применяется для обнаружения трещин на резьбовых поверхностях, интерпретация результатов контроля требует от контролеров профессиональных знаний для получения правильного результата измерения. Таким образом, существует необходимость в разработке эффективной и практичной технологии неразрушающего контроля для контроля трещин на резьбовых поверхностях.

Как важный метод неразрушающего контроля (НК), активная инфракрасная термография (АИКТ) показала свои преимущества при исследовании поверхностных трещин на металлических деталях с помощью различных нагревательных воздействий. Эти преимущества включают бесконтактный контроль, высокую чувствительность и интуитивно понятные результаты контроля [11—14]. В АИКТ используются источники нагрева, обычно включающие свет [15—17], ультразвук [18—20], микроволны [21—23] и электромагнитное излучение [24—26]. В последние годы значительное внимание в области неразрушающего контроля привлекает электромагнитная термография (ЭМТ) как один из видов метода АИКТ. Благодаря своему уникальному принципу распознавания, она особенно хорошо подходит для контроля проводящих материалов. ЭМТ успешно применяется для контроля дефектов в различных проводящих материалах, таких как трещины в металле [27], коррозия стали [28, 29], дефекты в проволоках связи [30], усталость от контакта при прокатке [31], ударные повреждения и расслоение в полимере, армированном углеродным волокном (ПАУВ) [32—34]. Однако исследования по применению ЭМТ для контроля трещин на резьбовых поверхностях все еще очень малочисленны [35]. В данном исследовании в качестве образцов для исследования используются болты с трещинами на поверхности резьбы. Теоретический анализ и эксперименты позволяют проверить применимость ЭМТ для обнаружения трещин на резьбовых поверхностях. Исследование обеспечивает техническую поддержку безопасности конструкций с использованием резьбовых соединений.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ

Основываясь на принципах электромагнитной индукции, в болтах возникают вихревые токи при воздействии переменного магнитного поля, создаваемого катушками переменного тока. Эти вихревые токи ограничиваются поверхностью резьбы — явление, известное как скин-эффект. Глубина скин-слоя описывает это явление и определяется как глубина, на которой плотность вихревых токов уменьшается в  $e$  раз от их значения на поверхности, что может быть описано как

$$h = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}, \quad (1)$$

где  $h$  — глубина скин-слоя;  $f$  — частота тока возбуждения;  $\mu$  — магнитная проницаемость проводника;  $\sigma$  — электрическая проводимость.

Основываясь на явлении нагрева Джоуля, вихревые токи вызывают локальное увеличение температуры. Количество джоулевого тепла, генерируемое в образце наводимыми вихревыми токами, может быть выражено:

$$Q = \frac{1}{\sigma} |J_s|^2 = \frac{1}{\sigma} |\sigma E|^2, \quad (2)$$

где  $Q$  — джоулево тепло;  $J_s$  — плотность вихревых токов;  $E$  — напряженность электрического поля.

Согласно теории о проводимости тепла, тепло будет переноситься от нагретой области в скин-слое к другим областям пока не достигнется тепловое равновесие. Распределение температуры в образце изменяется во времени по следующему закону:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q(x, y, z, t) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

где  $T = T(x, y, z, t)$  — распределение температуры;  $k$  — теплопроводность материала;  $\rho$  — плотность;  $c_p$  — изобарная теплоемкость;  $q(x, y, z, t)$  — функция внутреннего теплового потока в единицу объема. В ходе процедуры по контролю дефектов трещины на резьбовой поверхности перераспределяют вихревые токи и потоки тепла. Это приводит к различным распределениям температуры на резьбовых поверхностях, которые могут зафиксированы с помощью инфракрасной (ИК) камеры.

На рис. 1 показана установка ЭМТ для контроля трещин на поверхности резьбы. Под влиянием расстояния между поверхностью резьбы и катушками возбуждения в выступе резьбы индуцируется больше вихревых токов, чем во впадине резьбы. Поэтому в выступе резьбы выделяется больше джоулева тепла. Соответственно, температура выступа резьбы должна быть выше, чем температура впадины резьбы. Таким образом, распределение температуры на поверхности представляет собой закономерность, согласно которой вдоль оси резьбы попеременно возникают области с высокой и низкой температурой. Однако наличие трещин может повлиять на распределение вихревых токов и теплопередачу, что приведет к аномальному распределению температуры на поверхности. Когда вихревой ток сталкивается с трещиной, он вынужден обходить ее, что приводит к увеличению плотности вихревого тока в области трещины. Таким образом, в области трещины генерируется больше тепловой энергии, что приводит к тому, что область трещины демонстрирует высокие температурные характеристики в течении периода нагрева при ЭМТ. Высокие температурные характеристики в области трещин могут быть зафиксированы ИК-камерой, что позволяет обнаружить дефекты. В течение процесса охлаждения температура резьбовой поверхности стремится к равномерному значению, пока в конце концов не возвращается к температуре окружающей среды.

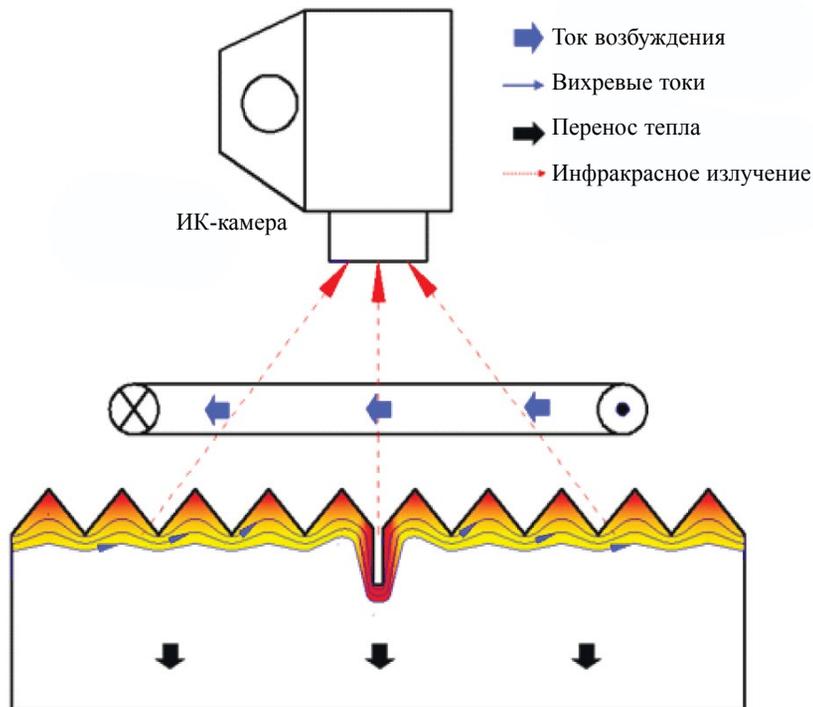


Рис. 1. Контроль трещин на резьбовой поверхности с использованием ЭМТ.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБРАЗЦЫ

Экспериментальная установка представлена на рис. 2. Она включает в себя систему индукционного нагрева (EasyHeat 0224), ИК-камеру (FLIR-T630sc) и компьютер. Система индукционного нагрева обеспечивает максимальную мощность нагрева 2,4 кВт, ток высокой частоты в диапазоне частот от 150 до 400 кГц, действующее значение максимального возможного тока возбуждения составило 400 А. ИК-камера регистрирует изменение температуры резьбовой поверхности с частотой 30 Гц и генерирует термограммы с разрешением 640×480 пикселей. Чувствительность и точность ИК-камеры составляют 30 мК и  $\pm 2\%$  соответственно.

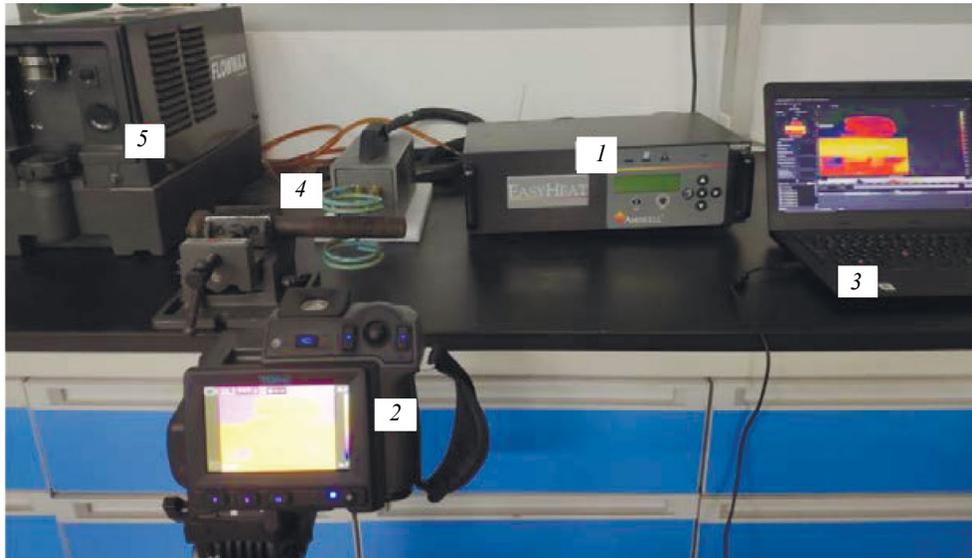


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 — система индукционного нагрева; 2 — ИК-камера; 3 — компьютер; 4 — катушки; 5 — воздуховодяной теплообменник.

Образцы, использованные в экспериментах, представлены на рис. 3. В данном исследовании рассматриваются четыре болта (обозначенные как болт А, болт В, болт С и болт D), которые использовались на морской платформе. На впадинах болтов А и В имеется несколько искусственных трещин разного размера, образованных с помощью электроэрозионной обработки (ЭЭО), но эти трещины практически незаметны. Трещины на впадинах болтов С и D являются

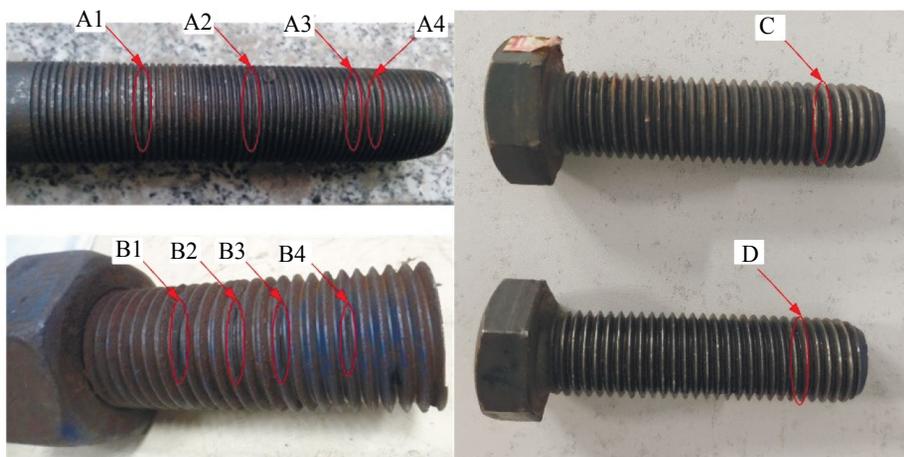


Рис. 3. Образцы.

Таблица 1

Параметры образцов

Образец	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Шаг резьбы, мм	Номер дефекта	Глубина дефекта, мм	Ширина дефекта, мм
Образец А	29	28	2	A1	4	0,5
				A2	4	0,2
				A3	3	0,2
				A4	2	0,2
Образец В	48	42	4,9	B1	3,5	0,5
				B2	3,5	0,2
				B3	2,5	0,2
				B4	1,5	0,2
Образец С				С		
Образец D				D		

естественными трещинами, образовавшимися под действием усталостной нагрузки. Подробная информация об образцах и трещинах приведена в табл. 1.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Анализ термограмм

Во время проведения исследования методом ЭМТ для болта А ток возбуждения и длительность возбуждения были установлены равными 220 А и 300 мс. На рис. 4 представлены термограммы трещин А1, А2, А3 и А4, снятые через 0,3 с. Из рис. 4 видно, что резьбовая поверхность не демонстрирует явных признаков чередования высоких и низких температур из-за малого шага резьбы болта А. На рис. 4а можно четко определить наличие трещины А1. Наличие трещины приводит к появлению сильных искажений индуцированного вихревого тока, в результате чего в месте трещины возникает большое количество вихревого тока, что приводит к выделению большего количества джоулева тепла в месте трещины. Характер воздействия высокой температуры на трещину А2 не является очевидным по сравнению с трещиной А1. Трещины А3 и А4 на рис. 4б трудно различимы из-за меньшего размера дефекта.

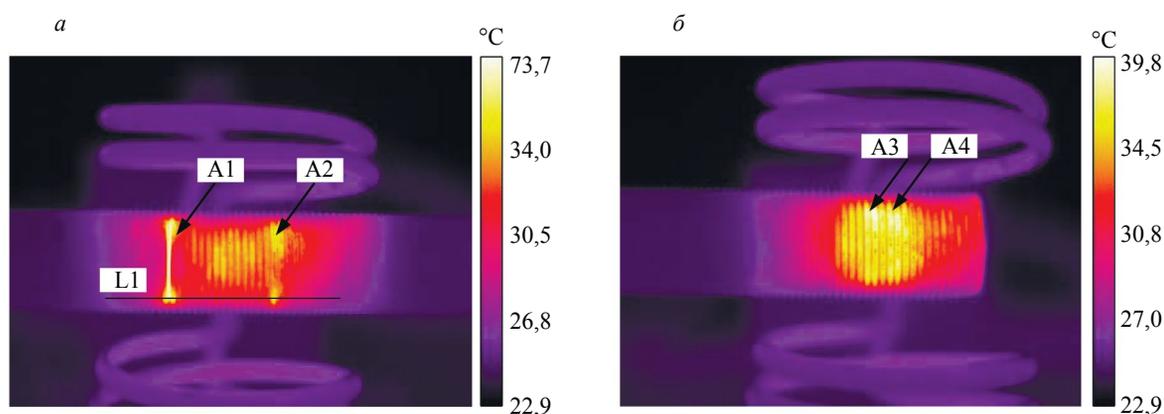


Рис. 4. Термограммы дефектов А1, А2, А3 и А4, зафиксированные на 0,3 с.

Для болта В ток возбуждения и длительность возбуждения были установлены равными 220 А и 300 мс. На рис. 5 представлены термограммы трещин В1, В2, В3 и В4, снятые через

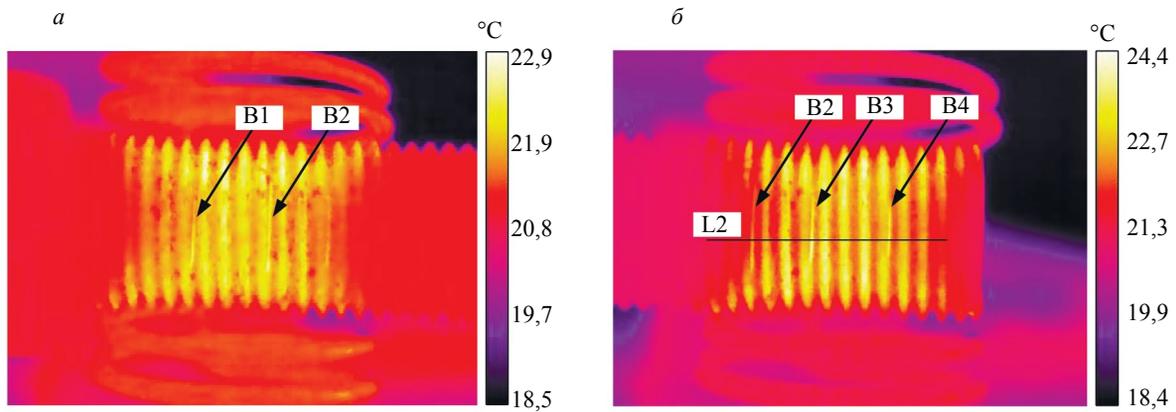


Рис. 5. Термограммы дефектов B1, B2, B3 и B4, зафиксированные на 0,3 с.

0,3 с. Из рис. 5 видно, что на поверхности резьбы наблюдается чередование относительно высоких и низких температур, т.е. выступы резьбы имеют более высокие температурные показатели, а впадины резьбы имеют низкие температурные показатели. Трещины B1, B2, B3 и B4 демонстрируют очевидные высокотемпературные показатели. Трещина B4 меньше, чем трещина A4, но ее все равно можно идентифицировать. Причина этого явления может заключаться в том, что болт В имеет больший шаг резьбы.

Для болтов С и D ток возбуждения и длительность возбуждения были заданы равными 220 А и 300 мс. На рис. 6 представлены термограммы трещин С и D, снятые через 0,3 с. Из рис. 6 видно, что в течение периода возбуждения распределение температуры на поверхности резьбы хорошо согласуется с выводами, полученными в результате теоретического анализа. Высокие и низкие температуры чередуются вдоль оси резьбовой части. Выступы резьбы представляют собой высокотемпературные области, а впадины резьбы — низкотемпературные. Видно, что хотя трещины С и D не могут быть четко идентифицированы, они все же демонстрируют более высокие температурные показатели по сравнению с окружающей зоной контроля.

Для более четкого отображения температурных характеристик резьбовой поверхности в процессе проведения измерений методом ЭМТ были получены данные о распределении температуры по линиям L1, отмеченной на рис. 4б, и L2, отмеченной на рис. 5б. Из рис. 7 видно, что распределение температуры образцов (болтов А и В) имеет выраженную закономерность. Характерные пики и впадины на рис. 7 соответствуют гребням и корням резьбы соответственно. Расстояние между соседними пиками или соседними впадинами — это шаг резьбы. В то же время в месте дефекта появляется явный единичный пик, который можно использовать как основу для обнаружения трещин.

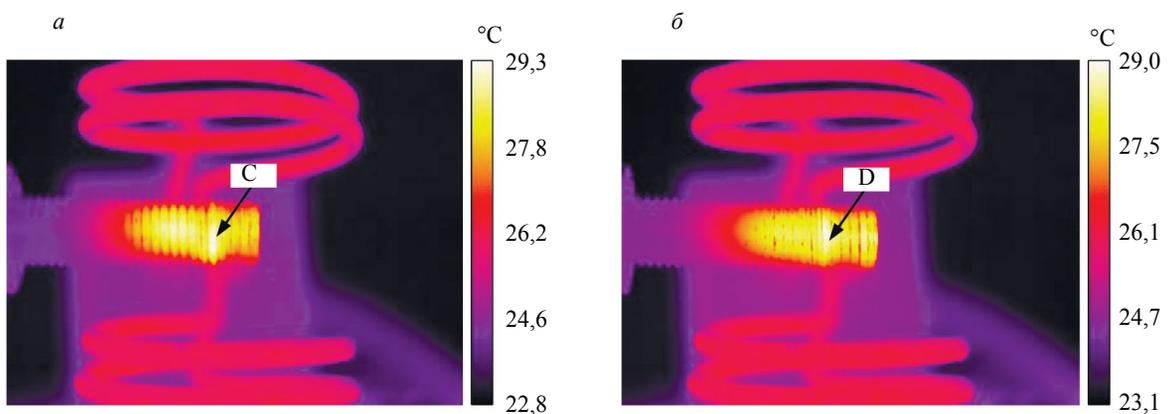


Рис. 6. Термограммы дефектов С и D, зафиксированная на 0,3 с.

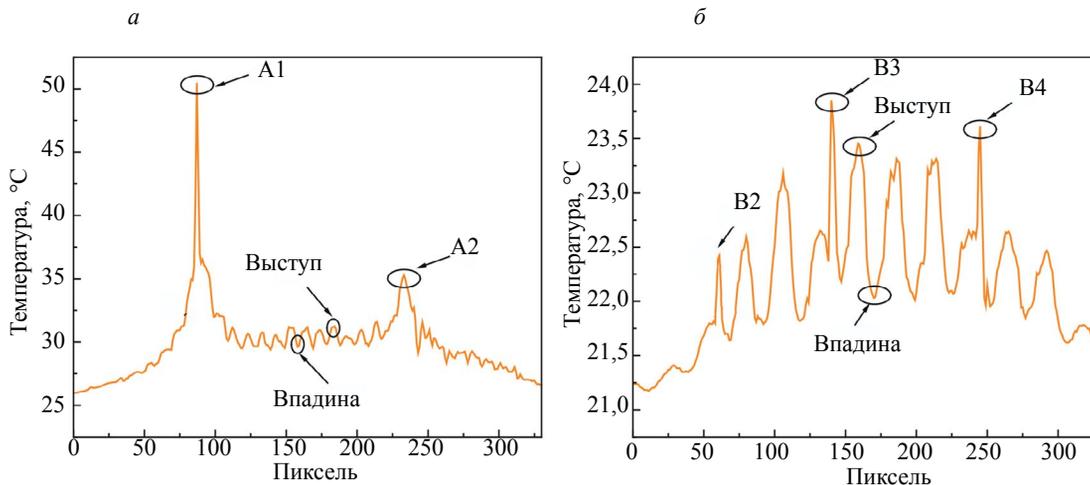


Рис. 7. Профиль температуры вдоль отмеченной линии для дефектов A1 и A2 (а); B2, B3 и B4 (б).

#### 4.2. Анализ динамики изменения температуры

Динамика изменения температуры в характерном месте на резьбовой поверхности болта А показана на рис. 8. Эти графики показывают изменение температуры с течением времени в области выступа резьбы, впадины резьбы и трещины соответственно. Можно заметить, что температуры имеют одинаковую тенденцию в течение всей процедуры контроля, но имеют разные пиковые значения. Все температуры продолжают расти в течение периода возбуждения, пока не достигнут пиковых значений примерно в конце возбуждения. Разница пиковых температур между областью трещины и выступом составляет  $3,26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура впадины резьбы меньше, чем температура области трещины на  $4,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Эта разница температур заметна на термограммах, что достаточно для явного указания на наличие трещин.

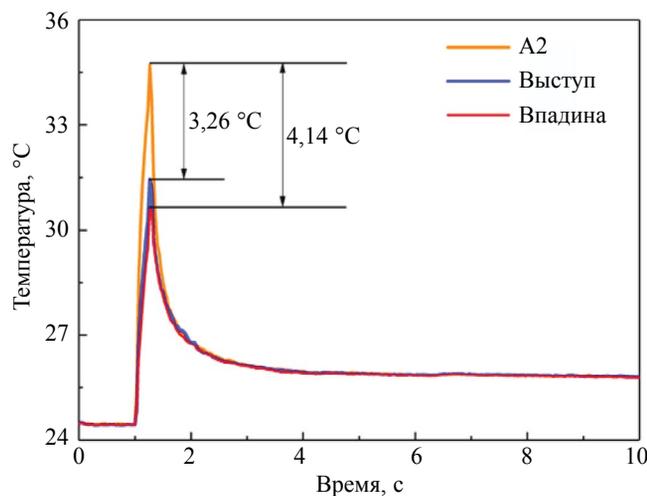


Рис. 8. Изменение температуры во времени на различных участках образца А.

Из приведенного выше анализа следует, что целесообразность контроля трещин на резьбовых поверхностях с помощью метода ЭМТ была подтверждена. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля, результаты контроля с помощью ЭМТ просты и легко интерпретируются. Кроме того, нагрев при ЭМТ длится очень короткое время, а весь процесс контроля занимает всего несколько секунд. Такая высокая эффективность контроля очень важна для контроля in-situ. Кроме того, для ЭМТ не требуется подготовка поверхности, а после кон-

троля не нужна дополнительная обработка. Важнейшим преимуществом этого метода является то, что заметная разница между областями трещин и бездефектными поверхностями резьбы является достаточно существенным доказательством для идентификации трещин. ЭМТ может точно обнаружить даже крошечные невидимые трещины, такие как в данном исследовании.

### 4.3. Анализ чувствительности к параметрам контроля

#### 4.3.1. Влияние взаимного расположения катушки и образца

На основе принципа электромагнитной индукции Фарадея вихревой ток, наведенный в исследуемом образце катушкой, имеет определенное направление. Трещины, перпендикулярные индуцированному вихревому току, сильно влияют на распределение тока. Напротив, трещины, параллельные вихревому току, почти не нарушают его распределения. Теоретически, метод контроля должен быть чувствителен к ориентации трещины.

Мы провели эксперименты с использованием метода ЭМТ на болте А, чтобы проверить влияние различных вариантов расположения катушки и образца. Эксперименты проводились в зависимости от того, что центральная ось катушки параллельна или перпендикулярна центральной оси болта. В экспериментах по диагностике методом ЭМТ параметры контроля были заданы одинаковыми. Ток возбуждения и длительность возбуждения составляли 300 А и 300 мс соответственно. Термограммы, записанные в конце возбуждения в двух экспериментах, показаны на рис. 9а и б.

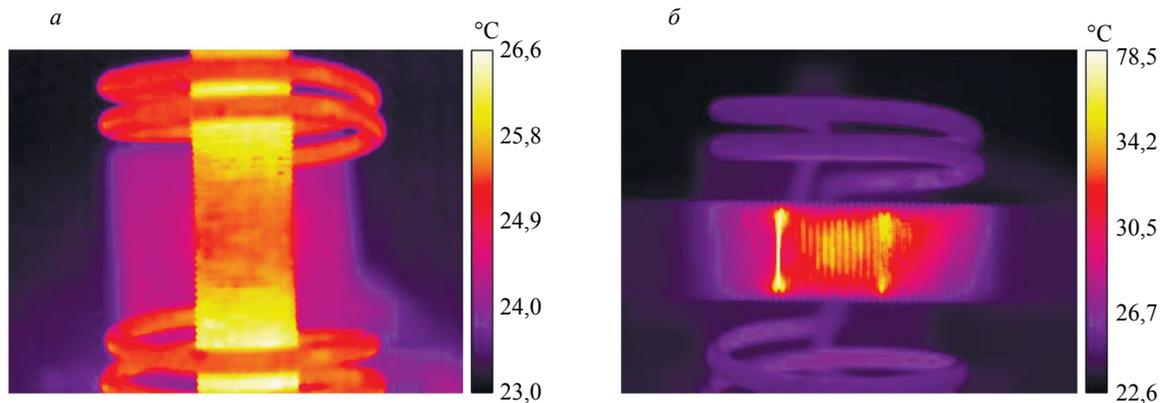


Рис. 9. Термограммы различно ориентированных катушки и образца: центральная ось катушки параллельна оси болта (а); центральная ось катушки перпендикулярна оси болта (б).

Из рис. 9а видно, что в случае, когда ось катушки параллельна оси болта, трещины на поверхности резьбы действительно не наблюдаются. В этом случае наведенные вихревые токи распространяются вдоль окружности болта. Поскольку трещины на образце также являются окружными вдоль витка резьбы, они параллельны наведенным вихревым токам. Поэтому трещина не мешает распределению вихревых токов, а на снятых термограммах не видно отклонения от нормы температуры в области трещины.

Термограмма, представленная на рис. 9б, четко указывает на наличие трещины. В данном случае ось катушки перпендикулярна оси болта, и наведенные вихревые токи распределяются в осевом направлении по поверхности резьбы. Таким образом, наличие трещин будет больше препятствовать распределению вихревых токов. В результате, плотность вихревых токов увеличивается в области трещин и выделяется больше джоулева тепла. При таких условиях трещины более четко видны на термограммах.

Экспериментальная проверка подтверждает, что контроль значительно чувствителен к ориентации трещин. Поэтому во время контроля необходимо следить за тем, чтобы распределение генерируемых вихревых токов было максимально перпендикулярно ориентации трещины.

#### 4.3.2. Влияние положения трещины

Точное определение эффективного участка контроля имеет большое значение для правильного результата обследования. Во-первых, был экспериментально исследован эффективный диапазон зоны контроля для катушки, используемой в данном исследовании. Затем было экспериментально изучено влияние расположения трещин на их индикацию на полученных термограммах.

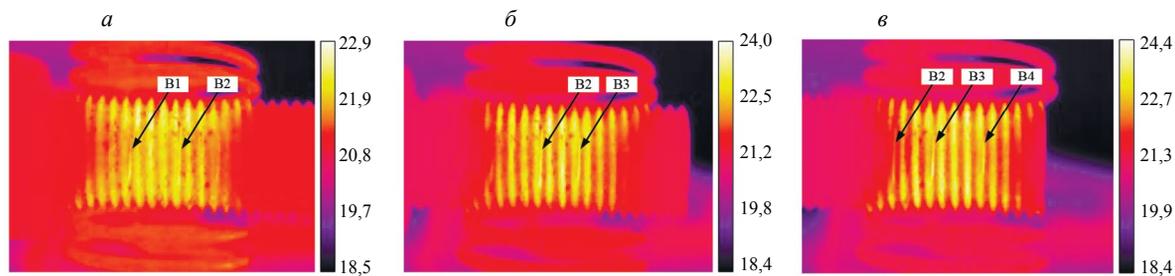


Рис. 10. Термограммы болта В при различных расположениях катушек.

Было экспериментально исследовано влияние расположения трещин на их обнаружение. В качестве объекта исследования был взят болт В с четырьмя трещинами на резьбовой поверхности. Расположив болт В так, чтобы его ось была перпендикулярна осевому направлению катушки, болт В был осмотрен три раза. Перемещая катушку от левого конца к правому концу болта В, возбуждали образец для получения термограмм, как показано на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что индикация трещины меняется в зависимости от положения, в котором она находится. Когда В3 располагался на краю диапазона эффективного возбуждения катушки, контраст между трещиной и окружающей ее поверхностью резьбы был очень слабым, как показано на рис. 10а. Однако, поскольку В1 и В2 находились в пределах эффективного диапазона возбуждения катушки, индикация была отчетливой. Когда катушка была перемещена в положение, показанное на рис. 9б, трещины В2 и В3 одновременно находились в пределах эффективного диапазона возбуждения катушки, поэтому на термограммах были видны явные признаки трещин. Когда катушка находится в положении, показанном на рис. 10в, трещины В2, В3 и В4 могут быть эффективно обнаружены. Видно, что трещины, расположенные в зоне эффективного воздействия катушки, можно легко обнаружить. Чем ближе к оси катушки (центральная область внутри катушки), тем лучше эффект обнаружения.

#### 4.3.3. Влияние амплитуды тока возбуждения

Амплитуда тока возбуждения определяет напряженность магнитного поля, возникающего в области контроля. Напряженность магнитного поля теоретически может влиять на интенсивность индуцированных вихревых токов и на индикацию трещин соответственно. В данном эксперименте были исследованы трещины А1 и А2 при одинаковой длительности нагрева, но с разными амплитудами токов возбуждения. Длительность возбуждения составляла 300 мс, а амплитуда тока возбуждения — 120, 140, 180, 220, 260 и 300 А соответственно. Термограммы, полученные по окончании возбуждения, представлены на рис. 11.

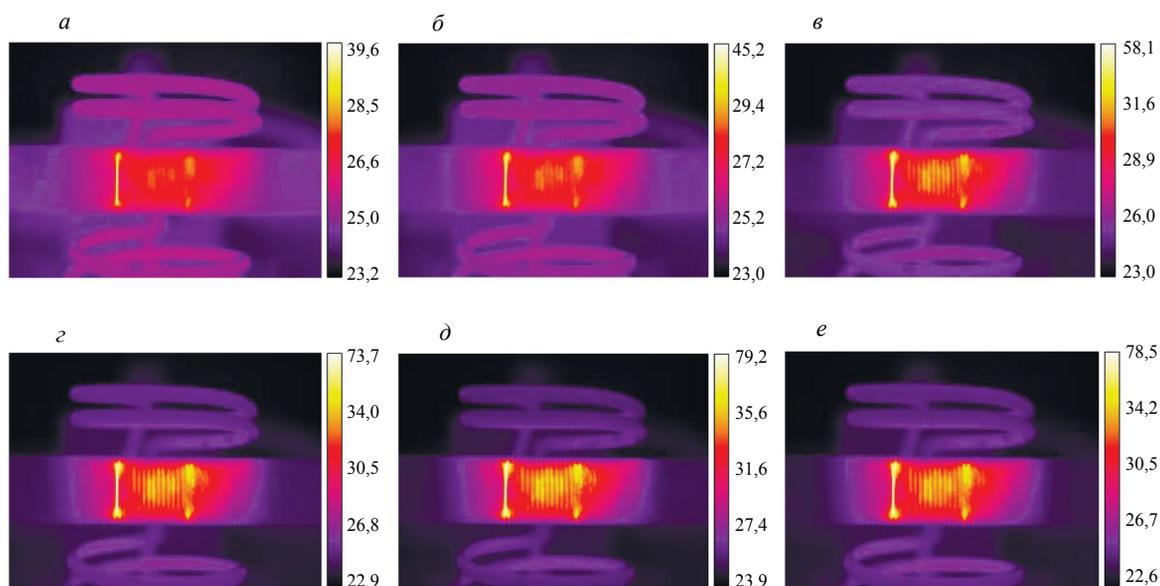


Рис. 11. Термограммы дефектов А1 и А2 с различными токами возбуждения при длительности нагрева 300 мс: 120 А (а); 140 А (б); 180 А (в); 220 А (г); 260 А (д); 300 А (е).

Из рис. 11а видно, что при токе возбуждения 120 А трещина А2 была слабо выражена. При увеличении амплитуды тока до 220 А индикация трещины А2 стала более четкой. В то же время эффект обнаружения трещины А1 также постепенно увеличивался. Однако при увеличении амплитуды тока возбуждения до 300 А индикация трещин не была значительно усилена.

Теоретически, амплитуда тока возбуждения определяет напряженность магнитного поля, генерируемого в зоне контроля. Напряженность магнитного поля может влиять на интенсивность индуцированных вихревых токов и, соответственно, на индикацию трещин. Поэтому, когда размер трещины мал, амплитуда тока возбуждения может быть соответствующим образом увеличена.

Для дальнейшего анализа влияния различных амплитуд токов возбуждения на результаты контроля используется коэффициент теплового контраста  $\alpha$ , который представляет собой тепловой контраст между трещиной и бездефектной областью:

$$\alpha = \frac{|T_2 - T_1|}{T_2}, \quad (4)$$

где  $T_1$  — тепловой отклик бездефектной области;  $T_2$  — тепловой отклик от концов трещины А1.

На рис. 12а показан тепловой контраст, полученный в каждом эксперименте. Из рисунка видно, что для токов возбуждения различной амплитуды время наступления максимального теплового контраста дефектов в основном совпадает. На рис. 12б показано изменение максимального теплового контраста трещины А1 в процессе контроля при различных токах возбуждения. На рисунке видно, что с увеличением амплитуды тока возбуждения максимальный тепловой контраст в целом имеет тенденцию к росту. Но при увеличении тока до 300 А (по сравнению с результатами исследования при 260 А) максимальный тепловой контраст практически не изменился. Результаты эксперимента показывают, что увеличение амплитуды тока возбуждения может в определенной степени улучшить визуализацию дефектов трещины на термограмме.

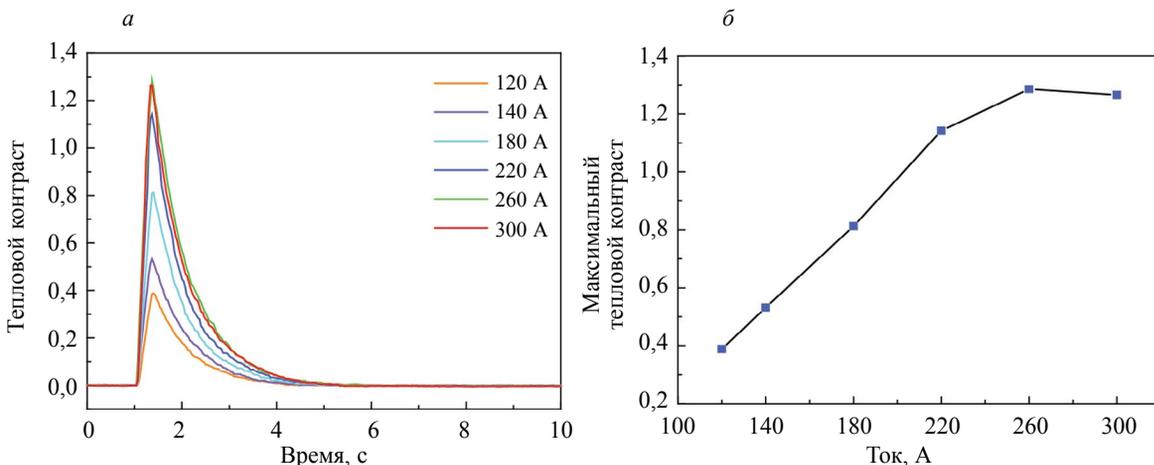


Рис. 12. Тепловой контраст (а) и максимальный тепловой контраст (б) при различных токах возбуждения.

#### 4.3.4. Влияние размера трещины

Чтобы изучить влияние размера трещины на ее индикацию был проведен контроль четырех трещин на поверхности болта А и оценена их различимость. Во время контроля амплитуда тока возбуждения была установлена на 220 А, а длительность нагрева — на 300 мс. Из рис. 13 видно, что трещина А1 с наибольшим размером может быть отчетливо распознана. Хотя характер контура трещины А2 не так очевиден, область дефекта все же демонстрирует высокие температурные показатели по сравнению с окружающей бездефектной областью. Но трещины А3 и А4 с меньшими размерами трудно идентифицировать.

Температурные данные о трещинах А1—А4 получают отдельно для дальнейшего количественного анализа характерных различий трещин разного размера. Были выбраны две репрезентативные точки в области трещин и в бездефектной области для исследования коэффициента теплового контраста. Как было описано ранее, трещины А1 и А2 имеют одинаковую глубину

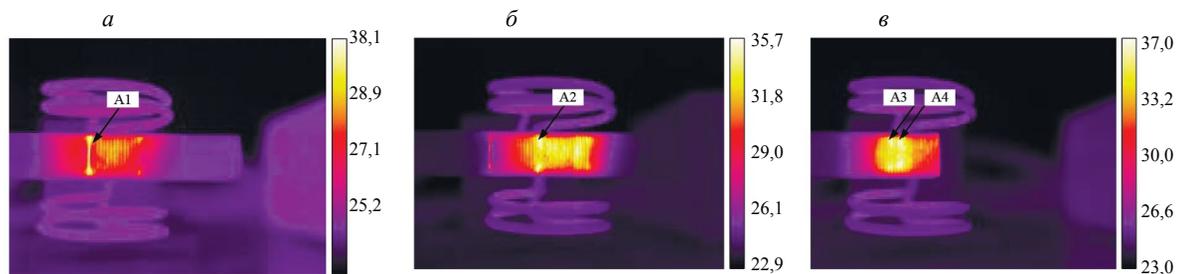


Рис. 13. Термограммы для трещин: A1 (а); A2 (б); A3, A4 (в).

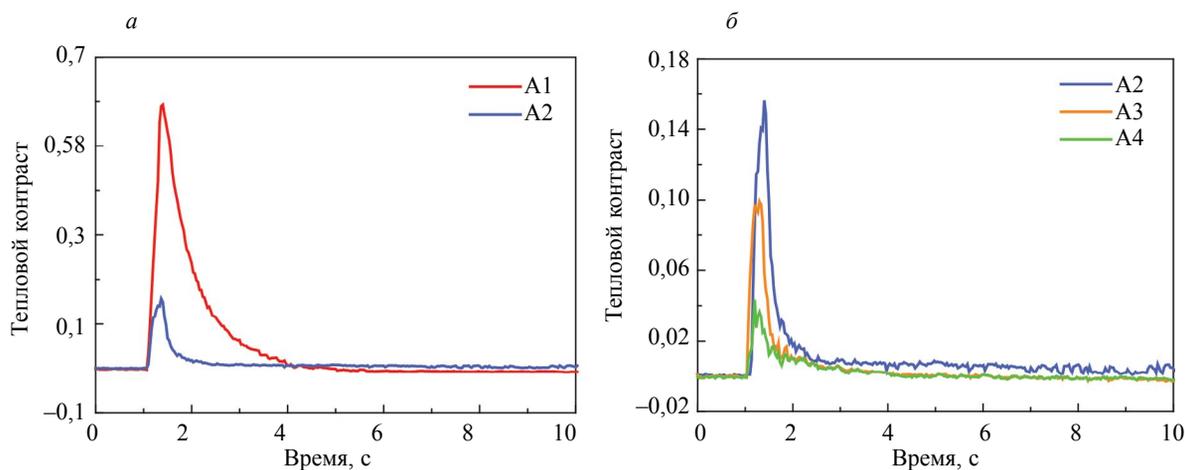


Рис. 14. Динамика изменения тепловых контрастов.

4 мм, но разную ширину (0,5 и 0,2 мм соответственно). Трещины A2, A3 и A4 имеют одинаковую ширину 0,2 мм, но разную глубину, которая составляет 4, 3 и 2 мм соответственно. Для трещин A1 и A2, которые имеют одинаковую глубину, но разную ширину, мы можем визуально определить, что более широкая трещина A1 показана более отчетливо, чем трещина A2 на рис. 14а. Для трещин A2, A3 и A4, которые имеют одинаковую ширину, но разную глубину, мы видим, что с увеличением глубины трещин трещины отображаются более отчетливо на полученных термограммах.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучается возможность использования метода ЭМТ для обнаружения трещин на резьбовой поверхности. В результате проведенных экспериментов с выявлением трещин и анализа термограмм и температурных данных, полученных в ходе эксперимента, были сделаны следующие выводы:

1. На основании термограмм и температурных данных, полученных в ходе эксперимента, видно, что резьбовая поверхность демонстрирует относительно высокотемпературный чередующийся характер распределения, то есть выступы резьбы демонстрируют высокие температурные характеристики, а впадины резьбы — низкие температурные характеристики. Однако наличие трещин на резьбовой поверхности может привести к появлению на термограммах единичных значений температуры, значительно отличающихся от вышеупомянутых стандартных характеристик, что может быть использовано в качестве основы для выявления трещин на резьбовой поверхности с помощью метода ЭМТ.

2. Экспериментально подтверждена целесообразность и применимость метода ЭМТ для распознавания трещин на резьбовой поверхности. Исследование показало, что метод ЭМТ может быстро и наглядно определить наличие и расположение нескольких трещин с различными характеристиками на резьбовой поверхности.

3. Проведен тщательный анализ влияния таких ключевых параметров, как ориентация катушки возбуждения, расположение катушки возбуждения, амплитуда тока возбуждения и размер трещины, на эффективность контроля. Исследование показало, что ориентация катушки

оптимальна, когда вихревой ток, генерируемый в образце, перпендикулярен трещине. Все трещины в пределах эффективного диапазона возбуждения катушки могут быть эффективно выявлены в одно и то же время. При дефектоскопии трещин амплитуда тока возбуждения должна быть выше соответствующего критического тока. Видимость трещин постепенно улучшается с увеличением глубины и ширины трещины.

В целом, результаты показывают, что метод ЭМТ является эффективным и практичным методом контроля трещин на резьбовых поверхностях. Он также применим к другому оборудованию с резьбовыми поверхностями в нефтегазовой промышленности (например, буровым инструментам, штангам и т. д.). Следующим шагом будет проектирование и разработка автоматической испытательной рамы для дальнейшего улучшения возможности применения метода ЭМТ для неразрушающего контроля оборудования нефтегазовой промышленности с резьбовыми поверхностями.

Работа финансово поддержана Национальной ключевой программой исследований и разработок Китая (2023YFC3009202).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Huang J., Liu J., Gong H., Deng X.* A comprehensive review of loosening detection methods for threaded fasteners // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. V. 168.
2. *Van Wittenberghe J., De Pauw J., De Baets P., De Waele W., Ost W., De Roeck G., Bui T.T.* Fatigue investigation of threaded pipe connections // *International Journal of Sustainable Construction and Design*. 2010. V. 1. No.1.
3. *Shahani A.R., Sharifi S.M.H.* Contact stress analysis and calculation of stress concentration factors at the tool joint of a drill pipe // *Materials & Design*. 2009. V. 30. P. 3615—3621.
4. *Lee H.-C., Choi J.-m., Lee B., Kim T.-G.* Failure analysis of stress corrosion cracking in aircraft bolts // *Engineering Failure Analysis*. 2007. V. 14. P. 209—217.
5. *Escobar J.A., Romero A.F., Lobo-Guerrero J.* Failure analysis of submersible pump system collapse caused by assembly bolt crack propagation by stress corrosion cracking // *Engineering Failure Analysis*. 2016. V. 60. P. 1—8.
6. *Uludag A.* The Magnetic Particle Inspection Examination of Aircraft Propeller Mounting Bolts // *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*. 2016. V. 3. No. 12.
7. *Chen J., He R., Kang X., Yang X.* Simulation and experiment for the inspection of stainless steel bolts in servicing using an ultrasonic phased array // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2015. V. 30. P. 373—386.
8. *Jinfeng D., Yihua K., Xinjun W.* Tubing thread inspection by magnetic flux leakage // *NDT & E International*. 2006. V. 39. P. 53—56.
9. *She S., Liu Y., Zhang S., Wen Y., Zhou Z., Liu X., Sui Z., Ren D., Zhang F., He Y.* Flexible Differential Butterfly-Shape Eddy Current Array Sensor for Defect Detection of Screw Thread // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. P. 20764—20777.
10. *Knight M.J., Brennan F.P., Dover W.D.* Effect of residual stress on ACFM crack measurements in drill collar threaded connections // *NDT & E International*. 2004. V. 37. P. 337—343.
11. *Zhang Y., Xu C., Liu P., Xie J., Han Y., Liu R., Chen L.* One-dimensional deep convolutional autoencoder active infrared thermography: Enhanced visualization of internal defects in FRP composites // *Composites Part B: Engineering*. 2024. V. 272.
12. *Wang F., Wang Y., Liu J., Wang Y.* The Feature Recognition of CFRP Subsurface Defects Using Low-Energy Chirp-Pulsed Radar Thermography // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. V. 16. P. 5160—5168.
13. *Liu P., Xu C., Zhang Y., Qin Y., Xu Y., Xie J., Song G.* Low-power vibrothermography detection technique for surface cracks on composite sucker rod // *Smart Materials and Structures*. 2023. V. 32.
14. *Luo Z., Wang H., Huang Y., Shen P., Zheng E., Zhang H.* Nondestructive detection of CFRP subsurface defects using transient lock-in thermography // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024.
15. *Li X., Wang H., He Y., Wang Y.* A Novel Methodology to Predict 3-D Surface Temperature Field on Delamination for Thermography // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. V. 20. P. 9670—9680.
16. *Liu G., Gao W., Liu W., Zou X., Xu J., Liu T.* Debonds and Water-Filled Defects Detection in Honeycomb Sandwich Composites Based on Pulse Infrared Thermography NDT Technique // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023. V. 59. P. 583—591.
17. *Wang F., Liu J., Song P., Gong J., Peng W., Liu G., Chen M., Wang Y.* Multimodal optical excitation pulsed thermography: Enhanced recognize debonding defects of the solid propellant rocket motor cladding layer // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. V. 163.
18. *Liu P., Xu C., Zhang Y., Chen L., Han Y., Liu R., Qin Y.* Detection and quantification of corrosion defects in CFRP-strengthened steel structures based on low-power vibrothermography // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2024. P. 1—25.
19. *Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Shagdyrov B.I., Vavilov V.P.* Method and Equipment for Infrared and Ultrasonic Thermographic Testing of Large-Sized Complex-Shaped Composite Products // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. P. 619—626.

20. Liu P., Xu C., Zhang Y., Chen L., Liu R., Wang L., Zhao Q. A combined inspection technique for debonding defects in CFRP-strengthened steel structures based on leaky Lamb wave and low-power vibrothermography // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024.
21. He H., Zhao Y., Lu B., He Y., Shen G., He Z., Wang H. Detection of Debonding Defects Between Radar Absorbing Material and CFRP Substrate by Microwave Thermography // *IEEE Sensors Journal*. 2022. V. 22. P. 4378—4385.
22. Wilcox L.M., Donnell K.M. Modified Thermographic Signal-to-Noise Ratio for Active Microwave Thermography // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024. V. 73. P. 1—10.
23. Li M., Wang L., Zou X. Nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-timber interfacial debonding using active microwave thermography (AMT) // *Construction and Building Materials*. 2024. V. 422.
24. Chen L., Zhang Y., Xie J., Liu P., Han Y., Liu R., Xu C., Song G. Simultaneous inspection of multi-kind defects in adhesively bonded CFRP/steel structures by inductive thermography // *Infrared Physics & Technology*. 2024. V. 138.
25. Wang F., Sheng J., Sfarra S., Zhou Y., Xu L., Liu L., Chen M., Yue H., Liu J. Multimode infrared thermal-wave imaging in non-destructive testing and evaluation (NDT&E): Physical principles, modulated waveform, and excitation heat source // *Infrared Physics & Technology*. 2023. V. 135.
26. Yang R., Du B., Duan P., He Y., Wang H., He Y., Zhang K. Electromagnetic Induction Heating and Image Fusion of Silicon Photovoltaic Cell Electrothermography and Electroluminescence // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. V. 16. P. 4413—4422.
27. Miao L., Gao B., Li H., Lu X., Liu L., Woo W.L., Wu J. Novel interventional electromagnetic thermography for subsurface defect detection // *International Journal of Thermal Sciences*. 2023. V. 184.
28. Ding S., Tian G., Zhu J., Chen X., Wang Y., Chen Y. Characterisation and evaluation of paint-coated marine corrosion in carbon steel using eddy current pulsed thermography // *NDT & E International*. 2022. V. 130.
29. He Y., Tian G.Y., Pan M., Chen D., Zhang H. An investigation into eddy current pulsed thermography for detection of corrosion blister // *Corrosion Science*. 2014. V. 78. P. 1—6.
30. Li K., Tian G.Y., Cheng L., Yin A., Cao W., Crichton S. State Detection of Bond Wires in IGBT Modules Using Eddy Current Pulsed Thermography // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. V. 29. P. 5000—5009.
31. Peng J., Tian G.Y., Wang L., Zhang Y., Li K., Gao X. Investigation into eddy current pulsed thermography for rolling contact fatigue detection and characterization // *NDT & E International*. 2015. V. 74. P. 72—80.
32. Cheng L., Gao B., Tian G.Y., Woo W.L., Berthiau G. Impact Damage Detection and Identification Using Eddy Current Pulsed Thermography Through Integration of PCA and ICA // *IEEE Sensors Journal*. 2014. V. 14. P. 1655—1663.
33. Yi Q., Tian G.Y., Malekmohammadi H., Zhu J., Laureti S., Ricci M. New features for delamination depth evaluation in carbon fiber reinforced plastic materials using eddy current pulse-compression thermography // *NDT & E International*. 2019. V. 102. P. 264—273.
34. Ren W., Liu J., Tian G.Y., Gao B., Cheng L., Yang H. Quantitative non-destructive evaluation method for impact damage using eddy current pulsed thermography // *Composites Part B: Engineering*. 2013. V. 54. P. 169—179.
35. Chen Y., Xu Z., Wu J., He S., Roskosz M., Xia H., Kang Y. A Scanning Induction Thermography System for Thread Defects of Drill Pipes // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. V. 71. P. 1—9.

## Уважаемые авторы и читатели!

В связи с распространением практики использования искусственного интеллекта при написании научных статей компания Springer Nature требует указывать при публикации сведения о применении технологий искусственного интеллекта.

С настоящего момента в информационном разделе Publishers note к каждой статье будет размещаться следующее уведомление: «**AI tools may have been used in the translation or editing of this article**» (При переводе или редактировании этой статьи могли использоваться инструменты искусственного интеллекта).

Также просим обращать внимание авторов на необходимость сообщать об использовании ими технологий искусственного интеллекта при работе над статьей и указывать данную информацию в разделе Additional Information.

Настоятельно рекомендуем ознакомиться с материалами по теме искусственного интеллекта:

<https://www.springer.com/gp/editorial-policies/artificial-intelligence--ai-/25428500>

<https://group.springernature.com/gp/group/ai/ai-principles>

<https://www.springernature.com/gp/policies/editorial-policies>

Редакция



## Состоялся Всероссийский конкурс по неразрушающему контролю Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике «Дефектоскопист 2024»

В Москве в рамках Международной специализированной выставки «Оборудование, технологии и материалы для процессов сварки и резки» 9—11 сентября прошел финал Всероссийского конкурса РОНКТД по неразрушающему контролю «Дефектоскопист 2024».

В течение полугода по всей стране проходили региональные этапы на базе аттестационных центров, где специалисты из различных предприятий региона боролись за право оказаться в финале. В отборочных этапах конкурса участвовало 430 специалистов из 231 организаций из 33 городов России и Республики Беларусь. Выйти в финал смогли 44 дефектоскописта. Конкурс проводился по 5 номинациям: (ВИК, УК, РК, МК, ПВК)) и мультиноминациях (ВИК+УК, ВИК+РК, ВИК+УК+РК). В этом году вне зачета были организованы соревнования в номинации «Электрический контроль» (ЭК).

«Дефектоскопист 2025» стартует уже 25 сентября 2024г., региональные этапы будут проходить до 7 марта 2025 г., а финал конкурса состоится 1—3 апреля 2025 года в рамках XII Международного промышленного конкурса «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика».

Напоминаем, что Форум представляет новейшие разработки в области неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга состояния. Международная площадка собирает лучшие технические решения, приложения для различной аппаратуры и, конечно, крупнейших специалистов отрасли!

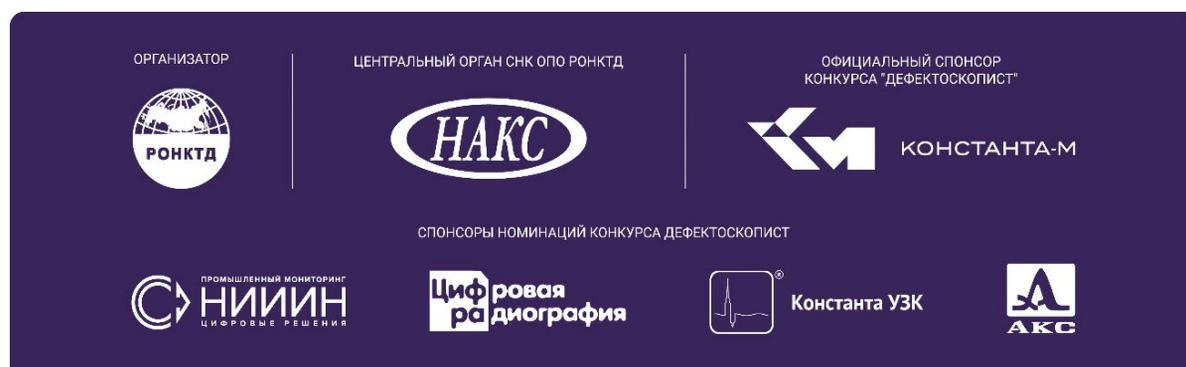
Также на Форуме состоится торжественное вручение Национальной премии в области неразрушающего контроля и технической диагностики, запланирована ежегодная Молодежная конференция и конкурс ВКР «Новая генерация».

Для желающих наглядно продемонстрировать возможности своего оборудования и программных продуктов действует коммерческое предложение по участию в Форуме. С ним вы можете ознакомиться на сайте Форума: <https://expo.ronktd.ru/participants/cost/>

А также по телефону: +7 (499) 245-56-56 или электронной почте [sankova@ronktd.ru](mailto:sankova@ronktd.ru)

Для посетителей вход на Форум остается бесплатным по предварительной регистрации на сайте.

Ждем Вас в ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне, в павильоне 2.6 с 1 по 3 апреля 2025 года.



19—20 сентября в Москве прошло заседание **Международной Ассоциации Академий наук (МААН)** посвященного 300-летию со дня основания Российской академии наук

В мероприятии приняли участие представители делегаций академий наук и научно-исследовательских и образовательных центров из России, Беларуси, Армении, Казахстана, Вьетнама, Кыргызстана, Узбекистана, Черногории, Азербайджана, Кубы и Китая наметили перспективы научного сотрудничества в рамках МААН.

С приветственным словом на заседании выступил министр науки и высшего образования Российской Федерации Валерий Фальков:

«Хочу поблагодарить уважаемых коллег из РАН за тесное конструктивное взаимодействие в части трансформации научного руководства РАН над научными организациями и университетами и за определение новых подходов распределения государственного задания. Это значимые шаги, которые позволят по-другому организовать работу над многотысячными коллективами».

Также он подчеркнул значимость развития международных коллабораций и пригласил членов МААН познакомиться с российской инфраструктурой класса мегасайенс, а молодых учёных стран-участниц Ассоциации присоединиться к Конгрессу молодых ученых.

Видеоприветствие в адрес гостей и участников совета направила председатель комитета по науке и образованию Совета Федерации Федерального собрания РФ Лилия Гумерова. Она отметила, что сегодня происходит активная интеграция РАН в процесс принятия государственных стратегических решений: «Совет Федерации успешно и конструктивно взаимодействует с РАН <...> Мы приняли постановление, направленное на нормативное закрепление принятых решений по усилению роли академии в научно-технологическом развитии России».

В ходе заседания президент РАН академик Геннадий Красников выступил с докладом «Юбилей Российской академии наук: 300 лет великих традиций», в котором рассказал о становлении Академии наук и ее роли в государственной научной политике современной России.

«Сегодня МААН под силу не просто развивать сотрудничество, но и формулировать собственную повестку, основываясь на наших исторических связях, традициях, технических, кадровых возможностях и, конечно, потребностях наших стран. Ассоциация должна быть инициатором эффективных решений, координатором взаимодействий крупных научных центров на территории наших государств», — председатель Президиума НАН Беларуси академик Владимир Гусаков.

С отчетом Объединенного совета по неразрушающему контролю и диагностике выступил президент РОНКТД д.т.н., профессор Владимир Сясько. Доклад был посвящен развитию и внедрению методов неразрушающего контроля на основе нейтронных измерительных технологий, их стандартизации и метрологическому обеспечению.

Редакция