

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и  
инновационной деятельности

ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный университет»,  
канд. техн. наук, доцент



Мимнев Алексей Леонидович

« 24 » ноября 2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Тюменский индустриальный университет»

Диссертация Соколова Романа Александровича «Разработка метода контроля локальных неоднородностей коррозионных и механических свойств металлических конструкций, оборудования и сооружений по характеристикам петли магнитного гистерезиса» выполнена на кафедре физики и приборостроения института промышленных технологий и инжиниринга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

В период подготовки диссертации соискатель Соколов Р.А. работал в должности ассистента кафедры физики, методов контроля и диагностики (с 1 сентября 2023 года физики и приборостроения) ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и продолжает работать по настоящее время.

В 2018 году окончил с отличием магистратуру в ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» по направлению подготовки 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов.

В 2023 году Соколов Р.А. закончил аспирантуру Тюменского индустриального университета по направлению 22.06.01 Технологии материалов (направленность Материаловедение в машиностроении).

В связи с изменением научной направленности исследований (протокол заседания ученого совета ИПТИ №8 от 12.07.2023г.) изменена научная специальность диссертации Соколова Романа Александровича на специальность 2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Справка о сданных кандидатских экзаменах выдана ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». (Приказ о прикреплении № 261-31/с от 18.09.2023г.).

Научный руководитель – Муратов Камиль Рахимчанович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики и приборостроения ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

### **Актуальность темы исследования**

Дефекты, возникающие при эксплуатации промышленных объектов, определяют срок их эксплуатации. Достигая определенных размеров дефекты становятся критическими и эксплуатация, и использование объекта становится невозможным. Интенсификация процессов разрушения происходит при работе металлических объектов с агрессивными средами. Контакт с такой средой вызывает бурный процесс коррозионного разрушения материала, который совместно с ослаблением конструкций приводит к возникновению аварии.

Количество аварийных ситуаций, возможно уменьшить за счет более полного контроля металла.

Основная идея проведенных исследований заключается в разработке инструмента оптимизации потребления такого ресурса как железо и сплавы на его основе и сокращение количества техногенных катастроф, возникающих из-за механического и коррозионного разрушения оборудования.

Таким образом представленные в диссертационной работе результаты имеют важное теоретическое и прикладное значение и направлены на решение актуальной проблемы.

### **Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации**

В диссертационной работе Соколова Р.А. рассмотрены вопросы применения магнитных характеристик вещества в целях определения физико-механических свойств сталей различных марок.

Автором разработан алгоритм Фурье-разложения петли магнитного гистерезиса в псевдовременном виде с учетом влияния шага дискретизации данных;

На примере модельной петли гистерезиса установлен качественный характер влияния основных магнитных параметров на амплитуды гармоник спектрального разложения петли гистерезиса;

Автором показано, что по сравнению с коэрцитивной силой гармонические составляющие разложения петли магнитного гистерезиса для широкого спектра сталей имеют более однозначную связь с твердостью;

Предложен комплексный параметр, имеющий высокую корреляцию с твердостью и пределом прочности для широкого спектра сталей и их состояния;

Предложенный автором комплексный параметр имеет хорошую корреляцию со скоростью коррозии в различных коррозионных средах.

## **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность научных положений и результатов обеспечивается используемой методологической базой и применением современных программных комплексов при обработке данных; подтверждается их соответствием ранее проведенным исследованиям в области магнитных методов контроля.

Основные результаты диссертации были доложены автором и обсуждены на российских и международных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2019» (ICMTMTE 2020-2022) (г. Севастополь, 2019- 2022 гг.); Научно-практическая конференция с международным участием «Нефть и газ: технологии и инновации» (г. Тюмень, 2019- 2021 гг.); Международная научно-практическая конференция молодых исследователей имени Д.И. Менделеева (г. Тюмень, 2019-2022 гг.); Конгресс молодых ученых-2020 (г. Санкт-Петербург, 2020-2023 гг.); XVIII Всероссийская конференция - конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2020, 2021 гг.); Международная молодежная научная конференция Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2020, ФТИ-2022 (г. Екатеринбург, 2020, 2022 гг.); Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» (г. Тюмень, 2020, 2022 гг.); Международная научно-техническая конференция «Транспорт и хранение углеводородного сырья» (г. Тюмень, 2020, 2021 гг.); Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (г. Томск, 2020 г.); VII Всероссийская конференция безопасность и мониторинг природных и техногенных систем (г. Кемерово, 2020 г.); Международная мультидисциплинарная конференция

по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon» (г. Владивосток, остров Русский, 2020 г.); Молодежная школа в рамках XXXII Уральской конференции с международным участием «Физические Методы Неразрушающего Контроля» (ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ) (г. Екатеринбург, 2020 г.); XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 2021, 2022 гг); VI Международная научная конференция Tatarstan UPEXPRO 2022 (г. Казань, 2022 г.); V Всероссийская научно-практическая конференция «Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии)» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); XXXIV Уральская конференция с международным участием «Физические Методы Неразрушающего Контроля (ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ) (г. Пермь, 2023 г).

### **Научная новизна результатов исследования**

1. Разработан способ разложения петли магнитного гистерезиса, включающий в себя ее преобразование в псевдовременной сигнал с применением методов численного интегрирования. Установлено, что такой подход дает возможность получить наименьшее искажение гармонических составляющих, вызванных вихревыми токами и дискретностью получаемых данных. Рассмотрены ограничения предлагаемого метода, связанные со способом спектральной математической обработки исходного массива данных и способом регистрации, петли магнитного гистерезиса. Отражены основные требования, предъявляемые при выполнении разрабатываемого метода контроля.

2. С помощью методики разделения в пространстве признаков (в диагностическом пространстве) и метода группового учета аргументов обнаружен комплексный параметр, который может быть использован, как основной критерий разрабатываемого метода, имеющего меньшую ошибку в определении механических свойств стали (твёрдость и предел прочности), чем коэрцитиметрический метод.

3. На примере модельной петли магнитного гистерезиса выявлен характер влияния величины магнитных параметров (коэрцитивная сила, остаточная индукция, индукция насыщения) на гармонический спектр, комплексный параметр и погрешность расчёта гармонических составляющих.

4. Выполнен поиск критериев контроля физико-механических свойств и скорости коррозии материала по спектральным характеристикам петли магнитного гистерезиса. Обнаружено, что наибольшей чувствительностью к изменению механических и коррозионных свойств обладают комплексные параметры, основанные на величине нескольких гармонических составляющих. Показана возможность применения комплексного параметра для определения скорости коррозии ферромагнитного материала в различных по составу и воздействию на параметры системы (материала) агрессивных средах с удовлетворительной точностью.

5. Разработано программное обеспечение, которое в совокупности с измерительной системой и изложенными в работе требованиями, позволит реализовать предлагаемый метод магнитного контроля.

### **Практическая значимость результатов**

Полученные результаты диссертационного исследования имеют практическое значение для повышения эффективности использования

промышленного оборудования за счет более детального определения физико-механических свойств материала в локальных областях оборудования. Применение разработанного метода позволяет снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций и увеличить время эксплуатации оборудования, тем самым снижая временные и финансовые издержки организаций на замену оборудования и ликвидацию аварийных ситуаций.

«Завод БКУ» - филиал ООО «Уралмаш НГО Холдинг» в Тюмени и филиал АО «Мостострой - 11» территориальная фирма «Мостоотряд-36» применяют предложенный автором комплексный параметр в работе.

Созданные методики реализованы в едином программном комплексе: получено 2 патента и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

### **Ценность научных работ**

Изложенный в работе алгоритм проведения процедуры обработки данных, извлечения гармонического спектра и определения комплексного параметра, совместно с приведенными зависимостями физико-механических свойств, включая коррозионные характеристики позволили разработать методику практического определения данных параметров вещества в локальной области с высокой достоверностью.

Научные труды Соколова Р.А. представляют обобщённое изложение результатов исследований, направленных на обеспечение устойчивой и бесперебойной работы промышленного оборудования, за счёт повышения мобильности проведения измерений, увеличения скорости определения свойств материала, без необходимости изготовления специализированных образцов и использования лабораторного оборудования предназначенных для проведения разрушающих и других видов испытаний.

## **Научная специальность, которой соответствует диссертация**

Представленная Соколовым Р.А. диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.2.8 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, в части:

п.1 «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды».

п.3 «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды».

п.4 «Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды».

## **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Научные результаты изложены в 40 научных публикациях по теме диссертации, из которых: 7 работ опубликовано в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 7 работ опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science. Получены 3 свидетельства о

государственной регистрации программы для ЭВМ и 2 патента на изобретение.

Общий объем опубликованных работ 12,71 п.л., (авторских 9,24 п.л.).

Среди публикаций можно выделить следующие.

**Публикации в отечественных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования:**

1. Определение коррозионной стойкости низколегированных сталей магнитным методом / В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов, Р. А. Соколов, В. П. Устинов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86, № 5. – С. 31-36. – DOI 10.26896/1028-6861-2020-86-5-31-36 (авторское участие 33%).

2. Определение взаимосвязи фактора разнородности и скорости коррозии конструкционной стали / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов, А. Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 106-125. – DOI 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125 (авторское участие 76%).

3. Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов, А. Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 93-110. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110 (авторское участие 79,6%).

4. Влияние термической обработки на образование соединения MNS в низкоуглеродистой конструкционной стали 09Г2С / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, И. М. Ковенский [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 113-126. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.4-113-126 (авторское участие 73,9%).

5. Соколов, Р. А. Исследование коррозионных свойств конструкционных сталей с использованием магнитных характеристик / Р. А.

Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88, № 12. – С. 44-50. – DOI 10.26896/1028-6861-2022-88-12-44-50 (авторское участие 79,5%).

6. Соколов, Р. А. Применение параметров спектральных характеристик кривой перемагничивания для определения твердости ферромагнитного материала / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков // Дефектоскопия. – 2023. – № 6. – С. 70-72. – DOI 10.31857/S0130308223060064 (авторское участие 78,9%).

**Публикации в научных изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science:**

7. A technique for predicting steel corrosion resistance / V. F. Novikov, R. A. Sokolov, D. F. Neradovskiy, K. R. Muratov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 6th International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing, Tomsk, 09–14 октября 2017 года. Vol. 289. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012013. – DOI 10.1088/1757-899X/289/1/012013 (авторское участие 78,9%).

8. Effect of Thermal Influence on Mechanical and Relaxation Magnetic Characteristics of St3 steel / R. Sokolov, V. Novikov, K. Sergei, A. Venedictov // Materials Today: Proceedings, Sevastopol, 10–14 сентября 2018 года. Vol. 11. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 169-174. – DOI 10.1016/j.matpr.2018.12.126. (авторское участие 78,9%).

9. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain sizes using X-ray diffractometry method / R. Sokolov, V. Novikov, K. Muratov, A. Venedictov // Materials Today: Proceedings: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 19. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 2584-2585. – DOI 10.1016/j.matpr.2019.09.015 (авторское участие 76,9%).

10. Application of magnetic hysteresis loop for analysis of corrosion properties of steel / R. Sokolov, V. Novikov, K. Muratov // AIP Conference Proceedings: 7, Ekaterinburg, 18–22 мая 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 060017. – DOI 10.1063/5.0032347 (авторское участие 78,9%).

11. Determination of influence of grain size factor on the corrosion speed of structural steel / V. F. Novikov, R. A. Sokolov, K. R. Muratov, A. N. Venediktov // Materials Today: Proceedings, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2021. – P. 1749-1751. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.250 (авторское участие 78,9%).

12. Dispersion of the Steel Structure and its Effect on Magnetic and Mechanical Properties of Steel / R. A. Sokolov, V. F. Novikov, K. R. Muratov // . – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 908-913. – DOI 10.4028/p-5p8b9u (авторское участие 78,9%).

#### **Публикации в прочих научных изданиях:**

13. Новиков, В. Ф. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали / В. Ф. Новиков, Д. Ф. Нерадовский, Р. А. Соколов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 38-49. – DOI 10.15593/2224-9877/2016.2.03 (авторское участие 50%).

14. Соколов, Р. А. Магнитный метод контроля предела прочности конструкционной стали применяемой при изготовлении вертикальных резервуаров / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов // Нефтегазовый терминал: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина, Тюмень, 15 марта 2020 года / Под общей редакцией М.А. Александрова. Том Выпуск 18. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. – С. 236-238 (авторское участие 78,9%).

15. Соколов, Р. А. Контроль механических свойств стали по параметрам предельной кривой перемагничивания / Р. А. Соколов // Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. Том 5. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 156-157 (авторское участие 100%).

16. Соколов, Р. А. Магнитный метод контроля предела прочности конструкционной стали применяемой при изготовлении вертикальных резервуаров / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов // Нефтегазовый терминал: материалы Международной научно-технической конференции «Транспорт и хранение углеводородного сырья», Тюмень, 28–29 мая 2020 года / Под общей редакцией С. Ю. Подорожникова. Том Выпуск 19. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 382-384 (авторское участие 84,2%).

17. Sokolov, R. A. Control of the mechanical properties of steel according to the parameters of the limiting magnetization curve / R. A. Sokolov // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. Scientific conference abstracts, St Petersburg, 31 мая – 06 2021 года. Vol. 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – Р. 136-137 (авторское участие 100%).

18. Соколов, Р. А. Чувствительность к параметрам предельной кривой перемагничивания к изменению механических свойств стали / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности: Сборник научных трудов XI Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, Томск, 08–10 ноября 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 232-235 (авторское участие 80%).

19. Соколов, Р. А. Использование спектрального анализа магнитных параметров для определения структурных изменений в стали при термическом воздействии / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева: сборник статей Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева, Тюмень, 24–26 ноября 2022 года. Том 2. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 306-308 (авторское участие 78,9%).

20. Соколов, Р. А. Применение параметров спектральных характеристик кривой перемагничивания для определения твердости ферромагнитного материала / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков // Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения): Тезисы докладов XXXIV Уральской конференции с международным участием, Пермь, 20–21 апреля 2023 года. – Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 76-77 (авторское участие 76,9%).

#### **Патенты и свидетельства на РИД:**

1. Патент № 2777695 С1 Российская Федерация, МПК G01N 17/00. Способ оценки стойкости сталей и сплавов к коррозии: № 2021132922: заявл. 12.11.2021: опубл. 08.08.2022 / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов. (авторское участие 79,3%).

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612165 Российская Федерация. «COR.S.I.M» (Программа для анализа магнитных данных и определения скорости коррозии): № 2022610934: заявл. 25.01.2022: опубл. 08.02.2022 / Р. А. Соколов, В. В. Антипин. (авторское участие 50%).

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662386 Российская Федерация. Hysteresis: № 2022660697: заявл. 08.06.2022: опубл. 01.07.2022 / Р. А. Соколов. (авторское участие 100%).

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667731 Российская Федерация. Программа для определения гармонических составляющих дискретного сигнала «Спектр»: № 2022667054: заявл. 16.09.2022: опубл. 23.09.2022 / К. Р. Муратов, Р. А. Соколов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет». (авторское участие 83,3%).

5. Патент № 2805248 С1 Российская Федерация, МПК G01N 17/00. Устройство для измерения магнитных характеристик ферромагнетика: № 2022131599: заявл. 05.12.2022: опубл. 12.10.2023 / В. Ф. Новиков, С. М. Кулак, Р. А. Соколов, К.Р. Муратов (авторское участие 30%).

Текст диссертации представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора и (или) источник заимствования.

Соавторы не возражают против использования совместных исследований в диссертации соискателя.

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают её основные положения.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Оригинальность диссертационной работы с учётом самоцитирования более 80 %.

Диссертационная работа «Разработка метода контроля локальных неоднородностей коррозионных и механических свойств металлических конструкций, оборудования и сооружений по характеристикам петли магнитного гистерезиса», выполненная Соколовым Романом Александровичем является законченным научным исследованием и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических

наук по специальности 2.2.8 - Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры физики и приборостроения ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Присутствовало на заседании: всего - 17 чел., с правом голоса - 14 чел., (из них: два доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации).

Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол № 4 от 14.11.2023 года.

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Третьяков Петр Юрьевич,  
исполняющий обязанности  
заведующего кафедрой физики и  
приборостроения ФГБОУ ВО  
«Тюменский индустриальный  
университет», кандидат физико-  
математических наук, доцент.



Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Пахаруков Юрий Вавилович,  
профессор кафедры физики и  
приборостроения ФГБОУ ВО  
«Тюменский индустриальный  
университет», доктор физико-  
математических наук.



Подпись  
заверяю  
Ведущий документовед общего отдела ТИУ  
24.11.2023