

Ученому секретарю диссертационного совета

24.2.310.01 Калимуллину Р.И.

420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51,

ФГБОУ ВО КГЭУ

ОТЗЫВ

официального оппонента

Мурзакаева Владислава Марковича

на диссертационную работу Богайчука Александра Вячеславовича «Корреляционный метод оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации и аппаратный комплекс ЯМР-релаксометрии для анализа твердотельных полимеров», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»

На оппонирование представлены: диссертационная работа общим объемом 143 страницы, в том числе 3 таблицы и 33 рисунка, а также автореферат диссертации объемом 19 страниц.

Актуальность темы диссертационного исследования

Полимеры – материалы с уникальными физическими свойствами, которые имеют большое практическое значение и широкое распространение в применении. Они используются в различных отраслях, таких как производство упаковки, автомобилестроение, здравоохранение и др. Чтобы улучшить продукты производства и анализировать деструкцию материалов, необходимо понимать их поведение и свойства на микроскопическом и макроскопическом уровне. Однако существующие методы анализа полимеров требуют разрушения материала или лабораторного использования, что затрудняет анализ в месте эксплуатации изделий. Релаксометрия ядерного магнитного резонанса может быть использована в качестве альтернативного метода анализа, так как она позволяет сохранить свойства материала и не требует разрушения изделия. Хотя ЯМР-релаксометрия применяется в основном как качественный метод, новые экспериментальные методики, а также современные подходы в обработке данных могут повысить информативность результатов и облегчить анализ полимеров.

Таким образом, актуальность данной диссертационной работы не вызывает сомнения.

Содержание и структура диссертационной работы

Диссертационная работа Богайчука А.В. включает введение, три главы, заключение, список литературы и приложение. Библиографический список содержит 221 источник.

Диссертация структурирована, логика изложения соответствует порядку достижения поставленной цели. Работа написана грамотным техническим языком. Выводы по разделам и заключение по работе отражают основные полученные результаты, иллюстрируют достижение цели исследования.

Во **введении** обоснована актуальность данной диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также основные положения, которые будут выноситься на защиту. Представлена научная новизна работы и ее практическая значимость.

Первая глава содержит обзор современных достижений в анализе твердотельных полимеров с использованием ЯМР-релаксометрии. В ней также выделены основные проблемы и нерешенные вопросы в этой области, а также определены наиболее значимые и актуальные аспекты для дальнейшего исследования. Кроме того, представлен краткий обзор истории развития ЯМР-релаксометров и современных портативных магнитных систем на основеборок Хальбаха.

Во **второй главе** описывается экспериментальное оборудование, разработанное автором для отработки экспериментальных методик на образцах твердотельных полимеров. В ней подробно описывается комплектация и работа представленного аппаратного комплекса ЯМР-релаксометра. Рассматриваются две магнитные системы для представленного ЯМР спектрометра: модернизированный сверхпроводящий магнит с возможностью варьирования магнитного поля от 0 до 8,5 Тл и разработанная автором компактная магнитная сборка Хальбаха со средним значением поля 0,6 Тл. Методика достижения улучшения однородности магнитного поля за счет учета неидеальности магнитных материалов также была продемонстрирована на последней.

В **третьей главе** рассмотрена возможность применения алгоритма обратного преобразования Лапласа для исследования твердотельных полимеров методами ЯМР-релаксометрии. Это было продемонстрировано на примере анализа воздействия разрушающих факторов на образцы латекса, каучука и его производных. Также в главе представлен новый корреляционный метод оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации, который был апробирован при анализе температурных переходов в образце поливинилхлорида. Результаты данного исследования показывают хорошее согласование с методами T_1 - T_2^* и дифференциальной сканирующей калориметрии, при этом представляя дополнительную информацию об изменениях времен корреляции в образцах. Демонстрация возможности применения корреляционных методик для разделения сигналов от многокомпонентной системы была также продемонстрирована на смеси образцов поливинилхлорида и полиэтилена в магнитной системе Хальбаха.

В **заключении** перечислены основные результаты исследования и сделаны выводы, подтверждающие решение поставленных задач в данной работе.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций диссертационного исследования

Цель диссертационного исследования и задачи позволили выстроить логику и структуру работы.

Представленные автором научные результаты диссертационного исследования корректно сформулированы и подкреплены необходимыми расчетами, таблицами и рисунками.

Диссертационная работа выполнена на требуемом научном и методическом уровне, характеризуется обоснованностью выводов и рекомендаций, что подтверждается:

- описанием материалов и методов исследований;
- критическим рассмотрением и оценкой достаточного количества литературных источников по теме исследования (список источников включает 221 наименование);
- сопоставлением полученных зависимостей и выводов с различными экспериментальными и практическими данными;
- основные положения и результаты работы прошли рецензирование и опубликованы в ведущих журналах. Автором опубликовано 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 4 доклада на международных конференциях, получен 1 патент на изобретение.

Научная новизна результатов исследования

К результатам исследований, обладающих научной новизной, следует отнести:

1. Новый аппаратный комплекс модульного исполнения для проведения экспериментов ЯМР с возможностью перестройки частоты от 0,5 до 500 МГц и цифровым квадратурным детектированием сигнала.
2. Новый способ улучшения однородности магнитного поля в сборке Хальбаха из постоянных магнитов за счет учета неидеальности магнитных материалов, без создания систем дополнительной подстройки поля или шиммирующих магнитных полей.
3. Новый корреляционный метод оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации.

Значимость полученных результатов для теории и практики

С теоретической точки зрения, расширены области исследования твердотельных диамагнетиков методами ЯМР-релаксометрии, а также конструирования портативных магнитныхборок.

Практическая значимость диссертационного исследования Богайчука А.В. связана с возможностью применения экспериментального

метода корреляционной оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации T_2 - $T_{2\text{эф}}$ для получения дополнительной информации об исследуемых образцах методами ЯМР-релаксометрии твердого тела; аппаратного комплекса, магнитной сборки Хальбаха, а также методики подборки конфигурации магнитов с учетом неидеальности материалов с целью достижения наилучшей возможной однородности магнитного поля внутри сборки Хальбаха для развития новых или уже существующих технологий и наукоёмких производств. Поэтому технические решения, предложенные автором работы, имеют перспективу дальнейшего развития и практического использования.

Представленный в работе код обратного преобразования Лапласа для обработки данных от двумерных корреляционных экспериментов ЯМР-релаксометрии на основе программы RILT может быть использован в исследованиях широкого спектра образцов методами ЯМР.

На обсуждение выносятся следующие основные **вопросы и замечания**:

1. В работе упоминается варьирование мощности импульсов в импульсной последовательности за счет изменения амплитуды импульса при сохранении его продолжительности. Данный подход действительно верен для случая твердых тел, так как происходит возбуждение одинакового среза в частотном диапазоне. Однако, в описании экспериментальной установки не представлена методика управления амплитудой импульсов.

2. Не совсем ясна причина использования постоянных магнитов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, а не SmCo , например. Последние обладают более высокой температурной стабильностью, что могло уменьшить влияние температурного дрейфа магнитов.

3. В тексте диссертации не указана причина выбора программного обеспечения FEMM 4.2 для расчета магнитных полей. Существует множество программных средств высокого уровня для моделирования магнитных систем любой сложности.

4. Некоторые грамматические и пунктуационные ошибки в тексте: стр. 32 - ошибка в фамилии Мейбум, стр.33 – пропущена запятая после союза «а», перед «во-вторых», стр.65 – установлена программное обеспечение, рис.2.4 пропущен Ъ в слове «Халбаха».

Указанные замечания и вопросы не изменяют положительной оценки работы в целом.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Богайчука Александра Вячеславовича «Корреляционный метод оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации и аппаратный комплекс ЯМР-релаксометрии для анализа твердотельных полимеров» посвящена актуальной задаче, имеющей значение для развития теории и практики контроля и исследования полимеров методами ЯМР-релаксометрии. Работа выполнена автором самостоятельно на требуемом научном уровне. Сформулированные в диссертационном

исследовании научные положения, выводы и рекомендации обоснованы. Представленные в работе результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью, а также отражают достижение поставленной цели. Основные результаты диссертационного исследования достаточно полно отражены в автореферате диссертации и публикациях автора.

Диссертация Богайчука А.В. соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук Положением о присуждении ученых степеней Российской Федерации, а также паспорту защищаемой специальности.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Богайчука Александра Вячеславовича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, а сам соискатель, Богайчук Александр Вячеславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Официальный оппонент:

Начальник отдела геофизических исследований скважин и технологий в открытом стволе Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина, кандидат технических наук



[Handwritten signature]

/Мурзакаев Владислав Маркович/

e-mail: Murzakaev VM@tatnipi.ru
Тел. +7 919 623-21-00

Сведения о месте работы:

Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина

Адрес: 423230, Республика Татарстан, г. Бугульма, ул. М. Джалиля, 32



Даринь Мурзакаев В.М. заверяю

и копию [Handwritten signature]

4.12.2023