

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.310.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 22 декабря 2023 г., № 12

О присуждении Богайчуку Александру Вячеславовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Корреляционный метод оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации и аппаратный комплекс ЯМР-релаксометрии для анализа твердотельных полимеров» по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды принята к защите 11 октября 2023 г. (протокол заседания № 8) диссертационным советом 24.2.310.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, приказ № 717/нк от 09.11.2012 г.

Соискатель Богайчук Александр Вячеславович, 04 сентября 1991 года рождения,

В 2013 году соискатель окончил ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по специальности «Радиофизика и электроника»;

в 2017 году окончил очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Балтийский

федеральный университет имени Иммануила Канта» по специальности 01.04.03 «Радиофизика»;

с 05 мая по 05 сентября 2023 года был прикреплен в качестве соискателя для сдачи кандидатского экзамена по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды к ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Работает в должности младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники им. С.А. Альтшулера Института физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в НИЛ магнитно-резонансных методов исследования вещества ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и на кафедре квантовой электроники и радиоспектроскопии Института физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Куприянова Галина Сергеевна, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», образовательно-научный кластер «Институт высоких технологий», профессор.

Официальные оппоненты:

**1. Давыдов Вадим Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Высшая школа прикладной физики и космических технологий, профессор;

**2. Мурзакаев Владислав Марксович**, кандидат технических наук, Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина, г. Бугульма, отдел геофизических



исследований скважин и технологий в открытом стволе, начальник отдела, дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: ФГБУН «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева» Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, в своем положительном отзыве, подписанном Оглобличевым Василием Владимировичем, кандидатом физико-математических наук, лаборатория диффузии, ведущим научным сотрудником, и Михалевым Константином Николаевичем, доктором физико-математических наук, лаборатория кинетических явлений, главным научным сотрудником, указала, что диссертация Богайчука А.В. представляет собой законченное исследование, результаты которого могут быть полезны специалистам, занимающимся исследованием твердотельных диамагнетиков или разработками оборудования для ЯМР-релаксометрии. Научные положения, основные результаты и выводы, изложенные в работе, аргументированы и достоверны. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. В диссертации содержится решение задачи, имеющей значение для развития практики применения методов ЯМР-релаксометрии при исследованиях диамагнетиков, и может помочь в анализе и улучшении свойств полимерных материалов, а также оптимизации процессов их производства. Диссертационная работа по объему выполненного исследования, его актуальности, новизне и значимости полученных результатов соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор, 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.

Соискатель имеет 14 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 9 работ общим объёмом 3,29 п.л. и авторским вкладом 1,86 п.л.: работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и/или SCOPUS (и приравненных

к публикациям в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК) – 4, общим объемом 2,69 п.л. и авторским вкладом 1,48 п.л.; патентов на изобретение – 1, объемом 0,19 п.л. и авторским вкладом 0,1 п.л.; тезисов докладов научных конференций – 4, общим объемом 0,41 п.л. и авторским вкладом 0,28 п.л.

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

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Bogaychuk, A.V. Accounting for material imperfections in the design and optimization of low cost Halbach magnets / A.V. Bogaychuk, V.V. Kuzmin // Review of Scientific Instruments. – 2020. – V. 91. – No. 10. – P. 103904. DOI: 10.1063/5.0013274 (статья в зарубежном рецензируемом научном издании МБД Q2, вклад соискателя 85%).

2. Kuzmin, V.V. The home-built high-field multifunctional pulsed NMR spectrometer / V.V. Kuzmin, A.V. Bogaychuk, I.K. Nekrasov, K.R. Safiullin, M.H. Salakhov, E.M. Alakshin, A.V. Klochkov, M.S. Tagirov // Magnetic Resonance in Solids. – 2019. – V. 21. – No. 1. – P. 19104. DOI: 10.26907/mrsej-19104 (статья в отечественном рецензируемом научном издании МБД, приравнено к ВАК К1, вклад соискателя – 16%).

3. Bogaychuk, A. Investigation of Polymer Degradation Using NMR Relaxometry with Inverse Laplace Transformation / A. Bogaychuk, N. Sinyavsky, G. Kupriyanova // Applied Magnetic Resonance – 2016. – V. 47. – No. 12. – P. 1409-1417. DOI: 10.1007/s00723-016-0833-1 (статья в отечественном рецензируемом научном издании МБД, приравнено к ВАК К1, вклад соискателя – 50%).

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов. Из них положительных – 7. С замечаниями – 6. Отзывы прислали:

1. Старший научный сотрудник лаборатории физики ферроиков и функциональных материалов Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения ФГБУН



«Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», кандидат физико-математических наук Вавилова Е.Л. Замечания: 1) было бы полезно указать в автореферате в изложении третьей главы диссертации физический смысл или практическое различие трех разных времен релаксации  $T_2$ . Импульсный метод корреляционной оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации выносится в качестве положения на защиту, поэтому на его основных параметрах, наверное, имело бы смысл остановиться в реферате подробнее; 2) в подписях осей абсцисс на рис. 2, в и 4, видимо, закралась ошибка: на оси отложена относительная величина поля в миллионных долях (ppm), поэтому и сама указанная физическая величина должна быть безразмерной:  $(B-B_0)/B_0$ .

2. Начальник лаборатории нейронной физики Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики ФГБУН «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, доктор физико-математических наук, профессор Джепаров Ф.С. Замечания: 1) среди методов физических исследований полимеров не упомянуто нейтронное рассеяние, которое, на мой взгляд, является самым мощным из имеющихся инструментов в этой и многих иных областях; 2) описание методов математической обработки результатов выглядит слишком кратким, было бы полезно изложить основные идеи, использованные здесь.

3. Заведующий лабораторией спиновой динамики и спинового компьютеринга ФГБУН «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН», г. Черноголовка Московской обл., доктор физико-математических наук, профессор Фельдман Э.Б. Замечания: 1) в автореферате не приведены данные о частоте заполнения импульсов и их длительности (рис. 5); 2) количество выводов можно было бы уменьшить, объединив некоторые из них, например, 5 и 6.

4. Заведующий лабораторией ЯМР спектроскопии растворов и флюидов ФГБУН «Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН», г. Иваново, доктор физико-математических наук, Ходов И.А. Замечаний нет.

5. Профессор кафедры ядерно-физических методов исследования ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», доктор физико-математических наук, профессор Чижик В.И. Замечания: 1) неудачно сформированы некоторые положения, выносимые на защиту: они написаны как перечень результатов (отсутствует необходимый признак потенциальной дискуссионности, то есть в них не отражены принципиальные преимущества или особенности предложенных подходов); 2) в автореферате нет определения, что понимается под важным для диссертации термином «время эффективной спин-спиновой релаксации  $T_{2эф}$ ». Требуется уточнения также обозначение  $T_2^*$ . В литературе по магнитному резонансу под этим обозначением обычно понимается «аппаратурное» время поперечной релаксации, поэтому странно, что его используют для корреляционных выводов о молекулярном строении объекта (ссылка на то, что кто-то так делает, не может быть доводом); 3) в автореферате имеются места с дефицитом информации. Например, недостаточно пояснена блок-схема релаксометра, представленная на рис. 1, не приведены его важные характеристики (длительность 90-градусного импульса; «мертвое время» приемного тракта, что особенно важно для низкочастотного диапазона регистрации сигнала ЯМР в твердой фазе; количество исследованных образцов каждого типа и т. п.). Не ясно, к какому образцу относятся данные, приведенные на рис. 6.

6. Профессор кафедры ядерно-физических методов исследования ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», доктор физико-математических наук, доцент Шеляпина М.Г. Замечание: в автореферате говорится, что в работе проанализировано влияние разрушающих факторов, таких как ультрафиолетовое излучение, воздействие озона и деформации растяжением на времена ЯМР релаксации различных твердотельных полимерных материалов: латекс, каучук и его производные. Но результаты или какие-то выводы в тексте автореферата не приводятся.

7. Старший научный сотрудник ФГБУН «Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН», кандидат физико-математических наук Юдин А.Н.



Замечания: 1) на рис. 6 приведены температурные зависимости различных времен релаксации в образце ПВХ, но анализировать эти зависимости достаточно сложно ввиду малого изменения параметров при нагреве и из-за наличия больших ошибок (стандартных отклонений). Возможно, следовало увеличить точность измерений или выбрать в качестве образца иной объект, с более выраженными зависимостями приводимых параметров от температуры; 2) в тексте автореферата на с. 14 автор рассуждает о поведении отношения  $T_{2\text{эф}}/T_2$ , однако не приводит графика зависимости этого отношения (в том числе и в основном тексте диссертации), это усложняет для читателя возможность проследить за мыслью автора.

**Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается их известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.**

Оппонент Давыдов Вадим Владимирович является известным ученым в области научного приборостроения, аналитического и неразрушающего контроля различных веществ, в том числе методами ЯМР-спектроскопии и релаксометрии, разработки систем измерений, численных методов и комплексов программ, имеет соответствующие научные публикации.

Оппонент Мурзакаев Владислав Марксович является специалистом в области ЯМР-каротажа, разработки приборов ЯМР и методов обработки данных ЯМР, имеет соответствующие научные публикации и патенты.

Ведущая организация: ФГБУН «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН», г. Екатеринбург, является крупнейшим академическим институтом в Уральском федеральном округе и ведущим центром в России в области магнетизма, исследования физики магнитоупорядоченных материалов, металлических наноструктур, физического металловедения, углеродных наноматериалов, теории сильнокоррелированных электронных систем, радиационной физики твердого тела. В институте был разработан ряд уникальных экспериментальных аппаратных комплексов и

решений ЯМР для исследования твердого тела. Сотрудники лаборатории диффузии и лаборатории кинетических явлений занимаются исследованием методами ядерного магнитного резонанса различных твердых материалов и имеют соответствующие научные публикации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработаны** аппаратный комплекс модульного исполнения для проведения экспериментов ЯМР с возможностью перестройки частоты от 0,5 до 500 МГц и цифровым квадратурным детектированием сигнала; комплектация ЯМР спектрометра на основе сверхпроводящего магнита с возможностью варьирования магнитного поля от 0 до 8,5 Тл, а также температурным контролем от 1,65 до 300 К; методика 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; корреляционный метод оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации  $T_2$ - $T_{2\text{эф}}$ ;

**предложено** применение корреляционного метода оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации  $T_2$ - $T_{2\text{эф}}$  для анализа твердотельных полимеров; применение кода обратного преобразования Лапласа для обработки данных двумерных корреляционных экспериментов ЯМР-релаксометрии на основе программы RILT;

**доказана** перспективность применения корреляционного метода оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации  $T_2$ - $T_{2\text{эф}}$  для разделения сигналов многокомпонентной системы, а также анализа температурных переходов в образцах полимеров; применимость кода программы RILT для программной среды Matlab при анализе экспериментальных данных.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**предложена** методика 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;

**применительно к проблематике диссертации результативно** (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** комплекс существующих базовых методов анализа твердотельных полимеров, математические методы обработки данных;

**изложены** способы определения величины и однородности магнитного поля методами ЯМР, теоретической оценки влияния производственных дефектов постоянных магнитов на однородность магнитного поля внутри магнитной сборки Хальбаха;

**раскрыты** возможности и ограничения существующих методов для анализа твердотельных полимеров;

**изучены** изменения времен релаксации в образце промышленного поливинилхлорида ПВХ-Е-6602 С при нагреве от 30 до 100°C;

**проведена модернизация** кода программы RILT для применения к двумерным корреляционным методам ЯМР-релаксометрии.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработаны** аппаратный комплекс модульного исполнения для проведения экспериментов ЯМР с возможностью перестройки частоты от 0,5 до 500 МГц и цифровым квадратурным детектированием сигнала; магнитная сборка Хальбаха (размерами 40×40×102 мм<sup>3</sup> и весом 0,6 кг) на основе 8 постоянных магнитов в виде параллелепипедов с квадратным сечением с экспериментальными значениями магнитного поля в рабочей области цилиндрической формы диаметром 4 мм и высотой 10 мм: среднее значение магнитного поля 598 мТл, а ширина его распределения на полувысоте от максимума составила 227 млн.д.; методика подборки конфигурации магнитов с учетом неидеальности материалов с целью достижения наилучшей возможной однородности магнитного поля внутри сборки Хальбаха. Данные разработки

могут быть востребованы при создании новых или развитии уже существующих технологий и наукоёмких производств, например, таких как производство малогабаритных ЯМР-релаксометров;

**определены** перспективы практического применения разработанного корреляционного метода оценки времен спин-спиновой и эффективной спин-спиновой релаксации  $T_2$ - $T_{2\text{эф}}$ ;

**представлены** рекомендации по учету эффекта многоимпульсного спинового захвата при оценке времен спин-спиновой релаксации в твердых телах;

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

#### **Оценка достоверности результатов исследований выявила:**

**для экспериментальных работ** показана воспроизводимость результатов исследования в различных условиях; результаты температурного анализа получены на сертифицированном оборудовании;

**теория** анализа деструкции твердотельных полимеров и температурных изменений в образце поливинилхлорида не противоречит известным из литературы данным и согласуется с опубликованными теоретическими и экспериментальными результатами других авторов;

**идеи базируются** на обобщении передового опыта в построении магнитных систем Хальбаха и анализе практики создания аппаратных комплексов для проведения экспериментов ЯМР;

**использовано** сравнение данных, полученных предложенным корреляционным методом ЯМР  $T_2$ - $T_{2\text{эф}}$  и методами ЯМР  $T_1$ - $T_2^*$ , а также дифференциальной сканирующей калориметрии;

**установлена** непротиворечивость экспериментальных результатов, выводов и моделей известным теоретическим положениям, а также данным работ других исследователей в этой области;



**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации, измерительные приборы, прошедшие поверку.

**Личный вклад соискателя** состоит в реализации блока формирования импульсов и регистрации сигнала для аппаратного комплекса; разработке и реализации магнитной системы Хальбаха; моделировании и анализе полученных данных для методики улучшения однородности магнитного поля внутри магнитной сборки Хальбаха с учетом неидеальности магнитных материалов, а также проведении экспериментальных измерений и апробации методики; разработке и реализации экспериментального корреляционного метода  $T_2-T_{2эф}$  для ЯМР-релаксометрии твердого тела; проведении всех экспериментальных измерений, выполненных методами ЯМР; обработке полученных данных методами обратного преобразования Лапласа; участии в анализе и интерпретации данных, полученных из корреляционных экспериментов ЯМР, участии в представлении результатов на конференциях и в подготовке публикаций.

**Диссертационный совет рекомендует использование результатов** диссертационной работы в организациях и учреждениях, занимающихся исследованиями твердотельных полимеров: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН), а также разработками оборудования в области ЯМР-релаксометрии (например, ООО «Резонансные системы»).

**В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:**

1. Указанная в защищаемом положении №2 масса всего магнита – 0,6 кг – при таких его габаритах невозможна (*член совета Кашаев Р.С.*).

2. Температурные переходы промышленного ПВХ: вы не пробовали построить зависимости времен релаксации не от температуры, а от обратной

температуры, т.е. от  $1000/K$ ? Ведь вы пишете: «Эти зависимости указывают на увеличение молекулярных движений», без каких-либо количественных характеристик. Если вы построите зависимость от обратной температуры, то по наклону можно определить энергию активации молекулярных движений, и вы будете уже иметь количественное значение, увеличилась энергия активации или уменьшилась, т.е. увеличилось молекулярное движение или уменьшилось (член совета *Кашаев Р.С.*).

3. Одним из итогов диссертационной работы является разработка и создание компактной магнитной системы для проведения экспериментов ЯМР-релаксометрии в твердом теле. Хотелось бы увидеть хоть одну (несколько) фотографию созданного аппаратного комплекса в диссертационной работе (*ведущая организация*).

4. В диссертационной работе представлены подробные блок-схемы ЯМР-спектрометра. Однако не приведены схемы датчиков ЯМР. Желательно при описании импульсных последовательностей и ширины применяемых импульсов указывать мощность радиочастотного передатчика (*ведущая организация*).

5. Не приведена схема эксперимента по измерению распределений времен эффективной спин-спиновой релаксации при растяжении резины (каучука) в спектрометре ЯМР (глава 3.2) (*ведущая организация*).

6. Для технической работы нужны конкретные определения с числовыми параметрами, особенно когда речь идет о приборах. В параграфе 1.3 автор рассуждает о портативных ЯМР релаксометрах. В параграфе 1.3.1 «Параметры оценки приборов» нет ни одного числового значения. Какой вес соответствует портативным приборам, какой размер и прочие? Какая погрешность измерения  $T_1$  и  $T_2$  в портативных ЯМР релаксометрах? Более логично в диссертации использовать термины «настольный ЯМР релаксометр» или «мобильный ЯМР релаксометр» (*оппонент Давыдов В.В.*).

7. История развития ЯМР релаксометрии описана очень хорошо до современного уровня выпускаемых промышленных ЯМР релаксометров, в том



числе на магнитной сборке. Например, серия Minispec mq предлагает самый широкий диапазон частот измерений, с рабочей частотой от 7,5 МГц (с большим диаметром образца), 10 МГц, 20 МГц и 40 МГц, до рабочей частоты 60 МГц. Погрешность измерения зависит от числа накоплений сигнала ЯМР. Модели от других производителей, Xigo NMR или Spin Track, еще есть настольные ЯМР релаксометры компании Magritek, широко представленные на рынке. Они активно используются многими учеными. Для технических наук надо сравнить преимущества и недостатки этих приборов и что надо сделать, чтобы стало лучше в каком-то направлении исследований с их использованием (*оппонент Давыдов В.В.*).

8. В диссертации достаточно странно представлены погрешности измерения времен релаксации, как в целом, так и по фракциям от композитных веществ (ПВХ и ПЕ). Например, стр. 109 –  $T_1$  (ПВХ) =  $632 \pm 77$  мс,  $T_1$  (ПЕ) =  $148 \pm 5$  мс,  $T_2$  (ПВХ) =  $38,8 \pm 7,7$  мкс,  $T_2$  (ПЕ) =  $176,8 \pm 8,6$  мкс. В одном случае погрешность больше 10-12%, в другом она составляет менее 0,5% на одной и той же экспериментальной установке. В чем причина такой разницы? Объяснения в диссертации нет (*оппонент Давыдов В.В.*).

9. 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 (*оппонент Мурзакаев В.М.*).

10. Не совсем ясна причина использования постоянных магнитов  $Nd_2Fe_{14}B$ , а не  $SmCo$ , например. Последние обладают более высокой температурной стабильностью, что могло уменьшить влияние температурного дрейфа магнитов (*оппонент Мурзакаев В.М.*).

11. 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 (*оппонент Мурзакаев В.М.*).

**Соискатель** Богайчук А.В. **согласился** с замечаниями 3 и 5 и привел соответствующие слайды, а на остальные замечания **ответил** следующим образом:

1. На слайдах я приводил фотографию и чертеж представленной магнитной сборки. Она действительно весит 600 г с учетом всех 8 магнитов и формы, напечатанной на 3D-принтере. Размеры самих стержней магнитов, которые использовались, составляют  $10 \times 10 \times 100$  мм<sup>3</sup>.  $40 \times 40 \times 102$  мм<sup>3</sup> – это габариты всей магнитной сборки, а не одного магнитного блока.

2. Согласен, что данное представление может быть информативно. Однако в своем исследовании я опирался на проведенный литературный обзор источников, где данные о молекулярном движении полимеров достаточно хорошо описаны методами ЯМР-релаксометрии. Из него следует, что  $T_1$  коррелирует с торцевыми движениями молекул (порядка частот Ларморовской прецессии), а низкочастотные молекулярные движения коррелируют с параметром  $T_2$ .

4. На слайде приведены применяемые схемы для ЯМР датчиков. В зависимости от необходимых частот используется схема первого или второго типа: для частот менее 100 МГц – первого, для больших частот – второго.

В работе использовались коммерческие усилители мощности Rohde&Schwarz BBA100 – на 500 Вт для частот 9 кГц – 250 МГц и 125 Вт для 250 МГц – 1 ГГц, что отражено в тексте диссертации. Так как это коммерческие усилители и их техническая документация находится в открытом доступе, то было решено не акцентировать на них внимание в тексте. Тем не менее, на слайде представлен график зависимости выходной мощности усилителя на 500 Вт в зависимости от частоты.

6 и 7. Согласен с замечаниями. Обзор существующих коммерческих ЯМР-релаксометров, действительно, усилил бы работу. На представленном слайде отображен обзор некоторых моделей ЯМР-релаксометров и



соответствующие им габариты и параметры.

Отмечу, что не все представленные на рынке модели подходят для анализа твердых тел. Также замечу, что целью работы являлось не создание нового коммерческого прибора, а адаптация существующих или создание новых методик анализа полимеров для данных релаксометров. Нами была создана магнитная система для отработки методик в условиях, приближенных к реальным коммерческим решениям.

8. Одна из особенностей твердотельных полимеров – это наличие целого спектра частот молекулярных движений, а не одной величины. Таким образом, образец должен характеризоваться распределением времен релаксаций. В работе в качестве ошибки приводится коэффициент стандартного отклонения распределения времен релаксаций, а не экспериментальная ошибка. Ввиду разных распределений времен релаксаций для разных образцов, стандартные отклонения этих распределений могут сильно отличаться как по абсолютной, так и по относительной величине.

9. В качестве генератора радиочастотных (РЧ) импульсных последовательностей используется PulseBlasterDDS DDS-II-300. Он имеет два аналоговых выхода для генерации РЧ-сигналов произвольной формы. Также в нем имеется возможность управления не только формой, но амплитудой импульсов. Максимальное напряжение на выходе составляет 1,2 В при согласовании на 50 Ом. Таким образом варьируется амплитуда импульсов непосредственно на выходе генератора.

10. Данный выбор определяется исключительно ценовой составляющей. Стоимость неодимовых магнитов на порядок ниже, чем аналогичных самариевых. При этом на рынке можно найти очень широкий выбор форм и размеров неодимовых магнитов, в то время как самариевые магниты чаще всего изготавливаются под заказ.

11. FEMM 4.2 является общедоступным бесплатным программным обеспечением. Конечно, существуют другие бесплатные решения, которые могут быть более удобны для 3D моделирования. Например, библиотека

magpylib для python. Однако в нашей сборке Хальбаха элементы располагаются достаточно близко, чтобы могли начать сказываться локальные магнитные поля, наведенные от соседних элементов, на сами магнитные материалы. В данном случае программное обеспечение FEMM имеет возможность учета кривых намагничивания. Также стоит отметить возможность использования пакета OctaveFEMM для работы с программной средой MATLAB. По моему мнению, прямые вычисления без привлечения сторонних библиотек в данной среде более удобны, чем в python.

На заседании 22 декабря 2023 года **диссертационный совет принял решение** за решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, присудить Богайчуку Александру Вячеславовичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 14 против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета

Голенищев-Кутузов  
Вадим Алексеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Калимуллин Рустем Ирекович

22 декабря 2023 г.



Голенищев-Кутузова В.А., Калимуллин Р.И.  
Специалист Ох