

ЗАКЛЮЧЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д002.034.01 НА БАЗЕ ИНСТИТУТА
АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РАН (ИАП РАН)
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 25.05.2018 № 2

о присуждении Давыдову Вадиму Владимировичу, гражданину Российской Федерации,
ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация: «Методы управления движением вектора ядерной намагниченности в текущей жидкости в спектрометрах и магнитометрах» по специальности: 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики» принята к защите 19.02.2018 г. протокол № 1 диссертационным советом Д002.034.01 на базе Института аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН), 190103, Санкт-Петербург, Рижский проспект, д. 26. Приказ о создании диссертационного совета № 714/нк от 02.11.2012 года.

Соискатель, Давыдов Вадим Владимирович, 1966 года рождения, защитил в 1997 году диссертацию «Датчики для измерения физических величин на основе ЯМР в текущей жидкости» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в диссертационном совете К063.38.11, созданном на базе Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Работает в должности доцента в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении Высшего образования «Санкт – Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», Федеральное Агентство Связи.

Научный консультант – доктор физико-математических наук Дудкин Валентин Иванович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего образования «Санкт – Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», кафедра «Фотоники и линий связи», профессор.

Официальные оппоненты:

Салихов Кев Минуллович – доктор физико-математических наук, профессор, Академик РАН, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН», научный руководитель. Представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. Поглощение переменного магнитного поля равно – MdB/dt (см. Ландау, Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, параграф 73), а не VdM/dt , как написано в диссертации (формула 1.23);

2. «... методика измерения скорости течения жидкости v заключалась в измерении фазы $\Delta\varphi$ ядерной намагниченности относительно неподвижной жидкости [98, 103]:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = v\tau^2\gamma\text{grad}B \quad (1.23)$$

где τ – временной интервал между импульсами, $\text{grad}B$ – градиент индукции магнитного поля, направленного вдоль течения жидкости.

Данный метод с использованием формулы (1.23) пытались применить для исследования пульсирующих потоков, распределение скорости крови в сосудах, в венах и других органах человека, но ничего не получилось». На мой взгляд, формула (1.23) неверная, сдвиг фазы должен быть в два раза меньше. Действительно, рассмотрим набег фазы прецессии в движущейся жидкости за счет постоянного градиента магнитного поля вдоль течения жидкости. В точке x магнитное поле равно $x\text{grad}B$, частота ларморовской прецессии в этой точке равна $\gamma x\text{grad}B$, $x = v t$. За интервал времени dt набегает фаза $d\Delta\varphi = \gamma v t \text{grad}B dt$. Интегрируя от нуля до τ , получаем $\Delta\varphi = v\tau^2\gamma\text{grad}B/2$.

Прошу диссертанта прокомментировать, не связана ли неудача применения, обсуждаемого в главе 1 метода измерения скорости течения жидкости, на что указано в диссертации. Еще одна потенциальная причина неудачи может быть связана с тем, что скорость течения жидкости разная на разных радиусах трубы, также разное время прохождения заданного расстояния;

3. В 3-й главе приведены измеренные автором диссертации времена парамагнитной релаксации T_1 и T_2 . Это полезный вклад в базу данных. Но в этой главе много места уделено переписыванию известной теории парамагнитной релаксации в жидкости. Непонятно, зачем было все это переписывать? Более попутно были сделаны ошибки в изложении этих теорий. Функция корреляции за счет релаксации диполь-дипольного взаимодействия, модулированного случайной взаимной поступательной диффузией взаимодействующих спинов, не описывается экспоненциальной зависимостью от времени, а выражается через функции Бесселя (см. Абрагам, Ядерный магнетизм, глава 8, ур. (8.112-8.114)). На стр. 116 при изложении теории релаксации поперечной намагниченности написано:

Так же как при расчете T_1 , вводят заселенности состояний $N_{\alpha\alpha}, N_{\alpha\beta}, N_{\beta\alpha}, N_{\beta\beta}$ и получают:

$$\frac{d\overline{I_{xj}}}{dt} = -(U_0 + 2U_1 + U_2)\overline{I_{xj}} - (U_2 - U_0)\overline{I_{xk}}$$

$$\frac{d\overline{I_{xk}}}{dt} = -(U_0 + 2U_1 + U_2)\overline{I_{xk}} - (U_2 - U_0)\overline{I_{xj}}$$

и далее на стр. 117 написано:

$$\frac{d(\overline{I_{xj}} + \overline{I_{xk}})}{dt} = -(U_1 + U_2)(\overline{I_{xj}} + \overline{I_{xk}})$$

В этом месте мой главный вопрос состоит в следующем. Релаксация поперечной намагниченности отражает декогеренцию спинов, т.е релаксацию недиагональных элементов спиновой матрицы плотности. Недиagonalные элементы матрицы плотности являются независимыми величинами параллельно с диагональными элементами, которые дают

населенности уровней энергии. Диссертант умудрился получить уравнения для релаксации когерентности, рассматривая только населенности. Справедливости ради надо сказать, что в этой задаче при изложении релаксации когерентности допущена ошибка и у Абрагама в книге. Но эта ошибка была замечена более 40 лет тому назад, и она связана у Абрагама с тем, что он отбросил не оправдано некоторые слагаемые в кинетическом уравнении. После всего этого вывод автора к этой главе «Из представленного в главе материала можно сделать следующий вывод: предложенный метод расчета T_1 и T_2 позволяет с высокой точностью оценить порядок значения констант релаксации» трудно комментировать. Оценить порядок времени парамагнитной релаксации спинов ядер в жидкости, можно и без этой сложной теории.

4. На стр. 137 написано: «Кроме того, перспективными представляются исследования по структуре льда, полученного с использованием разработанных методов из чистой воды.... Значительное уменьшение времени продольной релаксации T_1 в жидкой среде, связанное с увеличением вязкости среды, может вызвать изменения в кристаллической структуре льда. В настоящее время известны 3 аморфные разновидности и 15 кристаллических модификаций льда. Возможное появление новых модификаций льда представляет несомненный, как научный, так и практический интерес. Прошу диссертанта сообщить членам ученого совета хотя бы одно физическое рассуждение, показывающее перспективность его представлений. Управлять кристаллической структурой льда с помощью времени T_1 парамагнитной продольной релаксации – это ведь надо до такого додуматься.

5. Вот еще образец изложения, который оставляет желать лучшего. Написано: «Чтобы текущая жидкость полностью намагнитилась в поле магнита спектрометра должно выполняться следующее условие [19, 100, 105, 106, 107, 108, 119, 120]:

$$t_p \geq 3 \cdot T_1 \quad (4.1)$$

Тривиальнейшее очевидное утверждение! При этом дается ссылка на 10 работ, большинство своих. Больше пользы было бы для неспециалистов, если написать, что при помещении в поляризующее поле намагниченность описывается кинетикой $M_{\text{равн}} (1 - \exp(-t_p/T_1))$, Например, при $t_p = 3 \cdot T_1$, $(1 - \exp(-3)) = 0.95$, т.е. при выполнении условия (4.1) намагниченность достигает 95 % своего равновесного значения. Если подождать побольше, то намагниченность приблизится еще больше к 100 % равновесного значения. Но диссертант считает, что 95 % можно считать полной намагниченностью.

6. На стр. 178 приведены модифицированные диссертантом уравнения Блоха. Видимо эти уравнения имеются в виду при формулировке второго вывода в диссертации: «Расширена и дополнена теория нутационной кинетики, описывающая движение вектора ядерной намагниченности в текущей жидкости». Я считаю модификацию уравнений Блоха для данной задачи непригодной. Прежде всего, они не учитывают того, что слои жидкости с разным радиусом проводят разное время в радиочастотном поле. Диссертант добавил в уравнения Блоха слагаемое, призванное учесть неоднородность магнитного поля. Неоднородное поле, по модели диссертанта, вносится постоянным градиентом вдоль

течения жидкости. На самом деле никакого постоянного градиента поля в экспериментах диссертант не использовал. Его модель могла бы годиться для задачи, в которой напряженность магнитного поля «протягивается» вдоль течения жидкости (аналогично протяжки поля при регистрации спектров ЭПР). Поэтому, все что связано в диссертации с симуляцией с помощью уравнений (4.9, 5.14) не вызывает у меня доверия. Поэтому я считаю вывод 2 диссертации несостоятельным.

Неронов Юрий Ильич – доктор физико–математических наук, профессор, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», главный научный сотрудник. Представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

В таблицах диссертации постоянные T_1 и T_2 для воды при 20 °С представлены следующими числовыми значениями: 3.61 сек и 1.97 сек (таблица 2.2, для чистой воды); 1.18 сек и 0.92 сек (таблица 2.1, для фильтрованной водопроводной воды); 1.678(8) сек и 1.052(5) сек (таблица 4.2).

Замечание первое: «Очень жаль, что соискатель лишь в третьем варианте смог указать погрешность представленных данных».

Во-вторых, как видим, данные для T_2 в двух последних приведенных результатов отличается незначительно (на 14 %), тогда как для T_1 результаты отличаются на 42 %. Судя по данным для T_2 соискатель в третьем варианте так же использовал фильтрованную водопроводную воду. Однако, поскольку T_1 отличаются на 42 %, то следует предположение, что методика оценки T_1 , которую использовал соискатель, может содержать существенную систематическую погрешность.

Замечание третье, автор диссертации не представил в своей работе подробного описания методики определения T_1 и T_2 (и других определяемых параметров). Не представлены способы оценки случайной и систематической погрешности извлекаемых данных. В целом, остается впечатление, что метод с проточной жидкостью, на котором основывается работа соискателя, не столь пригодна для способов автоматизации регистрации T_1 и T_2 и их погрешностей, как это имеет место для стационарного образца и импульсной методики ЯМР. Что же касается метода определения магнитного поля в условиях наличия больших градиентов, то и в этом случае (как считает оппонент) импульсная методика со стационарным образцом так же имеет достаточно возможностей для успешной конкуренции с методом проточной жидкостью. Однако, измерительные приборы на основе ЯМР в текущей жидкости остаются весьма привлекательными для использования в ряде промышленных комплексов, где требуется учет расхода жидкостей.

Жерновой Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», профессор кафедры «Общей физики». Представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. В диссертации получена интересная зависимость времени продольной релаксации движущейся жидкости от напряженности внешнего электростатического поля, однако, механизм этой зависимости не объяснён.

2. Не рассмотрена поправка Блоха-Зигерта при измерении магнитных полей методом нутации.

3. В диссертации сказано, что сохраняется угол поворота намагниченности в меридиональной плоскости, но не уточняется, относительно какого направления этот угол отсчитывается.

4. В диссертации не рассматривается релаксационная погрешность ЯМР расходомеров.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (университет ИТМО), г. Санкт-Петербург, в своем положительном заключении, утвержденном Васильевым Владимиром Николаевичем, доктором технических наук, профессором, член-корр. РАН, ректором университета ИТМО и подписанном руководителем семинара, Алоджанцем Александром Павловичем, доктором физико-математических наук, профессором кафедры Лазерных технологий и систем и заведующим кафедры Лазерных технологий и систем Викторovým Евгением Анатольевичем, кандидатом физико-математических наук, указала, что диссертационная работа Давыдова В.В. «Методы управления движением вектора ядерной намагниченности в текущей жидкости в спектрометрах и магнитометрах» полностью удовлетворяет требованиям и критериям п. 9 О порядке присуждения ученых степеней (Утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (редакция от 28.08.2017)), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Давыдов Вадим Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики. В отзыве содержатся следующие замечания:

1. Первая глава диссертации «Краткий обзор методов исследования жидких сред и разработанных на их основе приборов» явно перегружена лишней информацией о всех существующих типах приборов для измерения расхода. Измерения на основе метода ЯМР являются бесконтактными, в этом его одно из преимуществ перед другими методами. Более рационально было бы остановиться в главе на рассмотрении только бесконтактных методов и разработанных на их основе расходомеров. Все остальные измерители расхода рассмотреть в одном параграфе, так как данные методы измерения расхода по сравнению с ЯМР принципиально отличаются.

2. Во второй главе диссертации «Краткий обзор методов квантовой магнитометрии» явно не хватает параграфа, в котором были бы рассмотрены более обстоятельно другие методы измерения магнитных полей (кроме квантовых) и используемые на их основе магнитометры. Краткой информации, представленной об этом перед началом главы недостаточно, тем более что автор диссертации, полученные экспериментальные данные методом ЯМР о параметрах

магнитного поля сравнивает с результатами измерений, полученными магнитометрами на основе датчиков Холла или феррозондовыми.

3. В главе 6 подробно описан новый метод определения состава и концентрации компонент в смеси жидких сред при экспресс-контроле. Приведены результаты расчетов и экспериментальных измерений. Однако из графиков на рис. 6.11 не ясно насколько будет хорошее совпадение расчетных и измеряемых линий сигнала ЯМР при небольшой вариации соотношения между компонентами в смеси двух бензинов. В представленных графиках при значительных различиях между компонентами в смеси двух бензинов совпадение, необходимое для определения состава смеси и относительных концентраций, присутствует.

Соискатель имеет более **300 (трехсот)** опубликованных работ (в том числе по теме диссертации более **200 (двухсот)**), из них в рецензируемых научных изданиях, из перечня ВАК, опубликованы **82 (восемьдесят две)** работы, в том числе **65 (шестьдесят пять)** статей в журналах, которые входят в международные базы цитирования SCOPUS. В данных работах отражено содержание диссертации, представлены разработанные новые методы измерений параметров физических величин, приведены результаты экспериментальных исследований, структурные схемы экспериментальных установок и методики проведения экспериментов, проведено сравнение результатов экспериментов с теоретическими расчетами, выполненными на основе математических моделей, разработанных лично В.В. Давыдовым. Все экспериментальные результаты получены лично В.В. Давыдовым с коллегами и учениками, которые являются соавторами в статьях. Обработка полученных результатов на основе новых методик выполнены лично В.В. Давыдовым с коллегами и учениками. Вклад в проведения всех исследований и обработку полученных результатов В.В. Давыдова был решающим.

Наиболее значимые за последние годы работы соискателя, в наибольшей степени раскрывающие содержание диссертации:

1. **Давыдов В.В.,** Дудкин В.И., Мязин Н.С., Рудь В.Ю. О возможности исследования конденсированных сред в экспресс-режиме методом ядерного магнитного резонанса. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 127 – 135.
2. **Давыдов В.В.,** Величко Е.Н., Мязин Н.С., Рудь В.Ю. Метод исследования магнитной восприимчивости коллоидных растворов в феррофлюидных ячейках // ПТЭ. 2018. № 1. С. 102 – 108.
3. **Давыдов В.В.,** Мязин Н.С., Величко Е.Н. Некоторые особенности регистрации спектра конденсированной среды методом ядерного магнитного резонанса в слабом поле// ПЖТФ. 2017. Т.43. вып. 13. С.34-42.
4. **Давыдов В.В.,** Дудкин В.И., Мязин Н.С. Контур линии нутации для нестационарного режима работы ядерно – магнитных расходомеров – релаксометров //Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 10. С. 1026 – 1032.
5. **Давыдов В.В.**О некоторых особенностях исследования ядерным магнитным резонансом потоков жидких сред // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 121. № 1. С. 18 – 25.

6. **Давыдов В.В.**, Дудкин В.И. О возможности определения термодинамической температуры коллоидных растворов методом ядерного магнитного резонанса. // ЖТФ. 2016. Т. 86. вып. 7. С. 154 – 158.
7. **Давыдов В.В.**, Дудкин В.И., Петров А.А., Мязин Н.С. О чувствительности ядерно-резонансных магнитометров с текущей жидкостью. // ПЖТФ. 2016. Т. 42. № 13. С. 64 – 71.
8. **Давыдов В.В.**, Дудкин В.И., Елисеев А.И. Уравнение поведения вектора ядерной намагниченности текущей жидкости в условиях модуляции магнитного поля в катушке нутации. // ПЖТФ. 2015. Т. 41. № 10. С. 15 – 23.
9. **Давыдов В.В.**, Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. Формирование линии нутации в ядерно – магнитных измерителях с текущим образцом. // ПЖТФ. 2015. Т. 41. № 7. С. 103 – 107.
10. **Давыдов В.В.**, Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. Ядерно – резонансный магнитометр с текущей жидкостью для измерения слабых полей. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 3. С. 138 – 143.
11. **Давыдов В.В.**, Величко Е.Н., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. Ядерно–магнитный релаксометр для экспресс–контроля состояния конденсированных сред. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 72 – 76.
12. **Давыдов В.В.**, Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. Уравнение движения вектора намагниченности в катушке нутации ядерно– магнитных измерителей с текущей жидкостью. // ПЖТФ. 2014. Т. 40. № 19. С. 96 – 104.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Московская область, Всероссийский научно-исследовательский институт Фитопатологии (ВНИИФ). Академик РАН, профессор, д.б.н. Михаил Сергеевич Соколов – научный руководитель ВНИИФ и профессор, д.с.-х.н. Алексей Павлович Глинушкин – директор ВНИИФ. **Отзыв положительный**, содержит следующее замечание. «В автореферате большое внимание уделено экологическому мониторингу территорий с использованием разработанного нового метода экспресс-контроля на основе ЯМР. Однако в качестве примеров, подтверждающих работу данного метода, представлены результаты исследования бензинов и их смесей, а не объектов экологического мониторинга»;
2. Город Йошкар-Ола. Республика Марий Эл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Поволжский государственный технологический университет, Член-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н. Дмитрий Владимирович Иванов – проректор по научной работе ФГБОУ ВО Поволжский государственный технологический университет. **Отзыв положительный**, содержит следующее замечание. «Несмотря на достаточно высокий уровень научной работы, следует отметить, что автореферат диссертации перегружен несущественной информацией, которая является объяснением принципов работы ЯМР измерителей на текущей жидкости, что достаточно важно, так как без опыта работы с этими устройствами сложно понять принцип их работы, но было бы целесообразнее

- отправить заинтересованных лиц по ссылкам на соответствующую литературу, а в автореферате разместить больше экспериментальных результатов»;
3. Город Казань. Казанский Федеральный университет, профессор, д.ф.–м.н. Мурат Салихович Тагиров – заведующий кафедрой Квантовой электроники и радиоспектроскопии. **Отзыв положительный**, существенных замечаний по содержанию автореферата в отзыве нет;
 4. Город Казань. Казанский Федеральный университет, профессор, д.ф.-м.н. Владимир Дмитриевич Скирда – заведующий кафедрой Физики молекулярных систем. **Отзыв положительный**, содержит следующее замечание. «К сожалению, для таких больших работ, как правило, характерна небрежность в описании результатов. Так, например, в тексте автореферата (стр. 13) в итоге не совсем ясно: какое же значение магнитного поля B_0 в результате использования частоты нутации $f_n = 0.482$ Гц (рис. 1)? С какой точностью оно измерено и чем это обусловлено? Надо сказать, что в авторской публикации (журнал Технической Физики, 2015, том 85, вып. 3, стр. 138-142) все изложено намного яснее. На стр. 15 в подписи к рис. 3 встречается непонятное определение образца – «модифицированный раствор». Ясно, что в таком виде оно не имеет никакой смысловой нагрузки, оно и нигде не расшифровано. Возможно, объяснение есть в тексте диссертации. Есть и другие мелкие замечания»;
 5. Город Москва. Государственный научный центр РФ, акционерного общества «Государственный научно-исследовательский институт химии и технологий элементоорганических органических соединений», Александр Вадимович Кисин, старший научный сотрудник, к.х.н., начальник лаборатории Спектральных исследований. **Отзыв положительный**, содержит следующее замечание. «Неоправданно много место в автореферате уделено второстепенным моментам научной работы (например, описаниям квантовых магнитометров, которые не использовались автором в его исследованиях). По моему мнению, было бы полезнее представить больше экспериментального материала, например, по исследованию потока жидкости на основе регистрируемых спектров ЯМР»;
 6. Город Санкт-Петербург, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», профессор, д.т.н. Анатолий Иванович Потапов – заведующий кафедрой Приборостроения. **Отзыв положительный**, содержит следующее замечание. «В автореферате очень мало информации о используемых в настоящее время различных моделях ЯМР приборов (спектрометров, расходомеров, релаксометров, магнитометров и т.д.) как для исследований, так и для промышленных измерений, выпускаемых различными фирмами. Упоминается только несколько приборов компании BRUKER, хотя существуют и другие производители данной продукции»;
 7. Город Санкт-Петербург, Акционерное Общество «Концерн «Гранит-Электрон», утвержден д.т.н. Юрием Федоровичем Подоплекиным - зам. директора по науке АО «Концерн «Гранит-Электрон». **Отзыв положительный**, содержит следующее замечание. «В отличие от измерителей других физических полей в формулы оценки

чувствительности магнитометра (3) - (5) на странице 11 входит параметр γ , название которого и физический смысл можно узнать только на странице 24. Это следует признать недостатком оформления автореферата»;

8. Город Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор, д.ф.-м.н. Никита Сергеевич Аверкиев - руководитель сектора Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. **Отзыв положительный**, содержит следующие замечания:
 1. Из автореферата неясно, какими вычислительными программами пользовался автор при решении уравнений Блоха;
 2. Не указаны методы повышения однородности магнитного поля в зазорах малогабаритных магнитных систем.
9. Город Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор, д.ф.-м.н. Александр Васильевич Бобыль – ведущий научный сотрудник лаборатории Квантовой электроники. **Отзыв положительный**, содержит следующие замечания:
 1. Экспериментальных результатов по сравнению с теоретическими приведено значительно больше, в некоторых случаях новый экспериментальный результат не сопровождается теоретическим расчетом. Например, отношение между напряженностями магнитных полей в катушке нутации;
 2. При анализе чувствительности аппаратуры полезно учитывать отношение сигнал-шум;
 3. Следует отметить высокое качество написания автореферата, однако, раздел практическая значимость, видимо, следовало разбить на подразделы, что способствовало его более убедительному восприятию;
10. Город Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, профессор, д.т.н. Александр Владимирович Полянский – заведующий кафедрой математики. **Отзыв положительный**, содержит следующее замечание. «В автореферате не ясно, на основании каких результатов автором была предложена система уравнений (19) для описания движения компонент вектора ядерной намагниченности в катушке нутации»;
11. Город Санкт-Петербург, Федеральное государственное унитарное предприятие центральный научно-исследовательский институт Конструкторских материалов «Прометей», д.т.н. Павел Алексеевич Кузнецов – начальник научно-исследовательского отдела «Наноматериалы и нанотехнологии». **Отзыв положительный**, содержит следующие замечания:
 1. Из реферата неясно, какими вычислительными программами пользовался автор при решении уравнений Блоха;
 2. Не указан материал, из которого изготовлены специальные вставки, размещенные на полюсных наконечниках магнитной системы. Написать «мягкий магнитный материал» недостаточно;

12. Город Санкт-Петербург, Акционерное общество научно-исследовательский институт «Вектор», профессор, д.т.н. Александр Алексеевич Федотов - заместитель генерального директора НИИ по научно-исследовательскому развитию. **Отзыв положительный**, содержит следующие замечания:
1. Автореферат содержит значительное количество вспомогательной информации. При подготовке автореферата было целесообразно часть данной информации сократить и на её месте разместить результаты экспериментальных исследований;
 2. В автореферате не отмечено, при какой минимальной концентрации наночастиц в феррофлюидной ячейке можно проводить измерения магнитной восприимчивости, намагниченности насыщения, магнитного момента наночастиц и других параметров ферромагнитной жидкости методом ЯМР;
13. Город Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), д.ф.-м.н. Александр Иванович Мамыкин, профессор кафедры Физики. **Отзыв положительный**, содержит следующие замечания:
1. К сожалению, автореферат диссертации не свободен от некоторых недостатков, основные из которых проистекают из недостаточно тщательной редакции автореферата, несогласованность падежей и склонений в ряде мест, а также использование различных единиц для определения одинаковых физических величин (это угловая и линейная частоты и индукция и напряженность в описании ширины линии резонанса). Это несколько затрудняет восприятие материала;
 2. Из недостатков можно отметить ошибку в формуле (28). Из автореферата также неясны основания и критерии для включения дополнительных элементов в уравнения Блоха и методика выбора коэффициентов А и В в уравнениях (29);
14. Город Великий Новгород, Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, профессор, д.ф.-м.н. Дмитрий Александрович Филиппов – заведующий кафедрой «Технология машиностроения». **Отзыв положительный**, содержит следующие замечания:
1. Автореферат диссертации перегружен несущественной информацией, которая является объяснением принципов работы ЯМР измерителей на текущей жидкости, что достаточно важно, так как без опыта работы с этими устройствами сложно понять принцип работы, но было бы целесообразнее отправить заинтересованных лиц по ссылкам на соответствующую литературу, а в автореферате разместить больше результатов экспериментов;
 2. Также, на мой взгляд, не стоит размещать в автореферате весь список статей в изданиях, рецензируемых в ВАК, можно ограничиться наиболее существенными работами, а остальное место отвести на полученные экспериментальные результаты, которых у автора очень много.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что академик РАН К.М. Салихов является ведущим специалистом в мире в области ЯМР (главный редактор международного научного журнала Applied Magnetic Resonance, который признан во всем мире). Профессор Ю.И. Неронов - известный специалист в области ЯМР, в ВНИИМ им. Д.И. Менделеева возглавляет научное направление, связанное с ЯМР. Профессор А.И. Жерновой – один из первых ученых, которые открыли и описали явление ЯМР в текущей жидкости, автор монографий по ЯМР в текущей жидкости (данные монографии переведены во времена СССР на английский язык и изданы в США и странах Западной Европы). Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (университет ИТМО) является одним из лучших университетов РФ, научные работы ученых данного университета признаны во всем мире.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

впервые разработан метод измерения быстро меняющихся расходов жидкости с погрешностью менее 1 %, в котором исключено влияние на результат измерения амплитуды и фазы сигнала ЯМР при быстром их изменении;

разработаны новые методы измерения времени продольной релаксации, как в текущем потоке жидкости, так и при исследовании конденсированной среды в стационарном состоянии в слабом магнитном поле;

разработана новая методика определения состава и концентрации компонент в смеси, состоящей из сред, не вступивших между собой в химическую реакцию при экспресс-контроле её состояния методом ЯМР;

предложен новый метод оптимизации геометрических параметров измерительного датчика для ЯМР магнитометра на текущей жидкости;

впервые предложена методика оценки чувствительности ЯМР магнитометра на текущей жидкости;

доказано наличие соотношения между постоянным магнитным полем и переменным магнитным полем в катушке нутации, при выполнении которого обеспечивается максимальное значение амплитуды сигнала ЯМР с инверсией намагниченности;

установлены соотношения между временем воздействия поля модуляции на намагниченную жидкость в катушке нутации и его параметрами, при выполнении которых форма линии нутации преобразуется в структуру, состоящую из линий сателлитов. Амплитуды линий сателлитов можно изменять, управляя вектором намагниченности в текущей жидкости;

проведена модернизация конструкции магнитной системы малогабаритного ЯМР спектрометра для регистрации сигналов от малого объема конденсированных сред в слабых магнитных полях.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что раздел теории нутационной кинетики дополнен новыми соотношениями и уравнениями, которые позволяют установить связи между постоянным магнитным полем в зоне размещения катушки нутации, переменными магнитными полями и временем нахождения намагниченной текущей жидкости под действием переменных магнитных полей;

получено соотношение, позволяющее воспроизводить форму линии регистрируемого сигнала ЯМР в слабом магнитном поле с использованием модуляционной методики. В данном соотношении используются решения уравнений Блоха с новыми коэффициентами, которые учитывают особенности экспериментальных исследований конденсированных сред в слабых магнитных полях.

Применительно к проблематике диссертации результативно

использован новый подход, учитывающий пространственное разделение зон измерения магнитного поля и регистрации сигнала ЯМР, что позволяет определять чувствительность ЯМР магнитометра на текущей жидкости с учетом неоднородности измеряемого поля;

изучены процессы одновременного влияния на релаксационный механизм в текущей жидкости сильного неоднородного магнитного поля и сильного электрического поля;

подтверждены некоторые установленные ранее физические закономерности в потоке жидкой среды (в частности, наличие оптимального расхода жидкости соответствующего максимальному значению амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР, влияние релаксационных погрешностей на результат измерения расхода и т.д.).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики

подтверждается тем, что

разработан и внедрен новый универсальный метод измерения времени продольной релаксации, позволяющий проводить измерения в среде, находящейся как в текущем, так и в стационарном состоянии;

предложены и внедрены новые методы:

А) экспресс-контроля состояния конденсированных сред в месте взятия пробы;

Б) измерения расхода жидкости;

В) измерения неоднородности сильного магнитного поля;

количественно определена степень уменьшения зоны воздействия поля на характер движения вектора ядерной намагниченности текущей жидкости в катушке нутации, размещенной в сильном неоднородном поле. При заданном расходе и температуре жидкой среды использование этого эффекта позволяет реализовать предельную разрешающую способность и точность измерения в ЯМР магнетометре;

представлены рекомендации по дальнейшему проведению исследований для разработки новых моделей ЯМР расходомеров и магнитометров, а также малогабаритных ЯМР

спектрометров, в которых для регистрации сигнала ЯМР используется модуляционная методика.

Оценка достоверности результатов исследований выявила, что экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании; в диссертационной работе **показана** воспроизводимость результатов исследований в различных условиях. Теория **построена** на известных уравнениях Блоха. Полученные теоретические результаты **согласуются** с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации, полученными соискателем лично, а также другими учеными.

Личный вклад соискателя состоит в том, что он:

- принимал непосредственное участие в разработке и изготовлении экспериментальных установок;
- в проведении всех экспериментов;
- в обработке и интерпретации экспериментальных данных;
- в разработке теоретических моделей и проведении расчетов;
- лично участвовал в апробации экспериментальных и теоретических результатов исследований;
- занимался подготовкой всех основных публикаций по выполненным исследованиям, представленных в диссертационной работе.

На заседании 25 мая 2018 года диссертационный совет принял решение присудить **Давыдову Вадиму Владимировичу** ученую степень доктора физико-математических наук.

Для проведения тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 19 докторов наук, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 19, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель диссертационного
совета, д.т.н., профессор

В.Е. Курочкин

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.

А.Л. Буляница

Дата оформления заключения:

25 мая 2018 г.

М.П.

