

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Давыдова Вадима Владимировича «Методы управления движением вектора ядерной намагниченности в текущей жидкости в спектрометрах и магнитометрах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

**1. Актуальность** представленной диссертационной работы не вызывает сомнений. Явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР) нашло большое число практических применений в различных областях фундаментальных научных исследований (разработка новых веществ, исследование строения структуры молекул и т.д.), а также в решениях многочисленных технических задач, связанных определением качества продуктов, медикаментов, различных химических и биологических веществ и т.д. Метод ЯМР в отличие от химических, оптических и других методов, обладает рядом уникальных преимуществ. Проведенные им исследования не вызывают изменений в структуре и химическом составе конденсированной среды. Поэтому пробу с данным веществом можно использовать как для последующих исследований на приборах других типов, так и для непосредственного применения по назначению или для дальнейших экспериментов. По регистрируемому спектру ЯМР можно определить с высокой точностью параметры структуры вещества, которые другими методами выявить крайне сложно. Метод ЯМР применяется для измерения констант релаксации конденсированной среды, которые являются характеристиками, позволяющими определять её текущее состояние, например, при экспресс-контроле. Одним из наиболее сложных разделов ЯМР является исследование потоков текущих сред. В данных условиях в отличие от сред, находящихся при исследованиях в стационарном состоянии, возникает много сложностей, связанных с ограничением времени на проведение исследований (поток может двигаться

с высокой скоростью и многочисленными нелинейными эффектами, особенно у стенок) и условиями регистрации сигнала ЯМР. Регистрация ЯМР спектра от текущей жидкой среды традиционными методами, которые используют в стационарных ЯМР спектрометрах, в данном случае крайне затруднена. Однако, использование современных ЯМР спектрометров, релаксометров, расходомеров и магнитометров, которые применяются для решения сложные научно-исследовательских и практических задач (в физике, биологии, химии, медицине, атомной энергетике и т.д.) требует постоянного совершенствования и поиску новых методов исследований и измерений параметров текущей жидкости. Особенно, если учесть, то обстоятельство, что в ряде случаев без использования ЯМР приборов некоторые задачи решить невозможно или крайне сложно (например, измерение сильных неоднородных полей в радиальной зоне ускорителей частиц, быстроменяющиеся расходы агрессивных сред и т.д.).

Кроме того, изменение практических применений различных сред, а также изменение условий эксплуатации измерительной аппаратуры, также требует совершенствования применяемых и поиску новых методов, основанных на явления ЯМР, для исследования жидких сред, находящихся как в текущем, так и в стационарном состоянии.

В диссертационной работе В.В. Давыдова на основе проведенных им исследований предложены оригинальные решения сложных экспериментальных задач для проведения исследований, которые позволили разработать новые методы измерения физических величин и найти оптимальные конструкторские решения для конструкций ЯМР спектрометров и магнитометров.

Отметим так же, что исследование механизмов ядерной магнитной релаксации конденсированных сред, находящихся как в стационарном, так и в текущем состоянии является одной из важных задач фундаментальной физики.

Решение задач по контролю параметров магнитного поля и исследованию его структуры, несмотря на разработку большого количества магнитометров различного типа, по-прежнему остаются актуальными. Многочисленные исследования структуры магнитных полей показали, что наиболее перспективными и востребованными являются квантовые магнитометры, к которым относятся ЯМР магнитометры на текущей жидкости. Причем ЯМР магнитометры на текущей жидкости занимают особую нишу среди квантовых магнитометров. С одной стороны, эти устройства достаточно просты в эксплуатации и обладают высокими характеристиками, с другой стороны, они позволяют решать задачи, недоступные другим моделям квантовых магнитометров. Совершенствование их конструкций, а также разработка новых методик измерения параметров магнитных полей остается актуальной задачей.

Специфические достоинства метода ЯМР по сравнению с другими методами, основанными на использовании других физических явлений, позволяют его использовать для решения различных задач экспресс-контроля состояния конденсированных сред, который в последние несколько десятков лет крайне востребован в экологии, различных отраслях производства, сфере услуг и т.д. Расширение числа используемых конденсированных сред, новые требования к точности и скорости измерений требуют постоянного совершенствования используемых и разработке новых конструкций приборов для экспресс-контроля состояния среды в месте взятия пробы. В диссертационной работе В.В. Давыдова представлены поиски решения актуальных задач, возникающих при экспресс-контроле конденсированных сред.

## **2. Обоснованность и новизна научных результатов диссертационной работы.**

В диссертационной работе В.В. Давыдов проводил исследования, которые сочетали в себе как проведение экспериментов, так и теоретические рассуждения. Такой подход к исследованиям позволил ему получить ряд

результатов, которые дополнили некоторые разделы и позволили разработать методы измерения физических параметров конденсированных сред, находящихся как в стационарном, так и в текущем состоянии и магнитных полей. Из наиболее значимых полученных новых результатов В.В. Давыдовым, отметим следующие:

1. Измерения времен продольной  $T_1$  и поперечной  $T_2$  релаксации как в текущей, так стационарной жидкой среде в случае регистрации сигнала ЯМР с использованием модуляционной методики;
2. Разработку метода измерения расхода жидкой среды  $q$  с погрешностью измерения порядка 1 %, в котором уменьшено влияние погрешностей, связанных с изменением амплитуды и фазы регистрируемого сигнала ЯМР при быстром изменении  $q$  на результат измерения;
3. Определение соотношений между параметрами магнитных полей и временем их воздействия в катушке нутации на вектор ядерной намагниченности в текущей жидкости для формирования линии нутации в виде линии-спутников с последующим уменьшением их амплитуд к нулю;
4. Определение соотношения между параметрами магнитных полей в зоне размещения катушки нутации, которое позволяет получать максимальные значения инверсии намагниченности в текущей жидкости;
5. Установленные соотношения между параметрами магнитных полей и разработка конструкции малогабаритной магнитной системы для регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле от малого объема жидкой среды для решения задач экспресс-контроля;
6. Предложена методика определения состава и относительных концентраций компонент в среде при экспресс-контроле её состояния малогабаритных ЯМР спектрометром;
7. Разработка методики для определения чувствительности ЯМР магнитометра на текущей жидкости и экспериментальное;

8. Новый метод измерения параметров (магнитной восприимчивости, намагниченности насыщения, магнитного момента наночастиц и т.д.) ферромагнитной жидкости с использованием явления ЯМР.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждается научными публикациями в изданиях (SCOPUS, Web of Science, ВАК и т.д.). Обсуждения результатов диссертационной работы В.В. Давыдова на международных и всероссийских конференциях, семинарах и научных школах. Работы В.В. Давыдова и его учеников отмечены многочисленными наградами на выставках и конкурсах. Среди наград его учеников необходимо выделить медаль РАН в 2015 году «За лучшую научную работу» среди студентов и 3 медали Министерства Образования и Науки Российской Федерации всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов Вузов «За лучшую научную студенческую работу».

### **3. Научная ценность и практическая значимость результатов диссертационной работы.**

**Научная ценность** результатов работы заключается в том, что полученные автором новые результаты дополняют некоторые разделы физики, такие как нутационная кинетика, ядерная магнитная релаксация, физика магнитных явлений и гидродинамика, теоретическими соотношениями, позволяющими интерпретировать наблюдаемые в эксперименте физические явления. Предложенные автором новые методы измерения параметров текущих потоков, магнитных полей, ферромагнитных жидкостей, а также методики обработки результатов экспериментальных исследований с теоретическим их обоснованием расширяют возможности, как по проведению научных исследований, так и при решении прикладных задач, связанных с проведением исследований в других областях физики, химии, биологии и т.д. Полученные им результаты исследований релаксационных процессов в

текущей жидкости открывают дополнительные возможности по созданию новых конденсированных сред.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что её результаты применимы для:

1. Проведения научных исследований с использованием ЯМР с текущей жидкостью в различных разделах физики, химии, биологии и гидродинамики;
2. Разработки методов экспресс-контроля состояния конденсированных сред на основе явления ЯМР и их практической реализации в малогабаритных ЯМР спектрометрах и релаксометрах;
3. Модернизации действующих конструкций ЯМР расходомеров и магнитометров на текущей жидкости;
4. Для определения перспективных направлений развития измерительных приборов на основе ЯМР в текущей жидкости, а также малогабаритных ЯМР спектрометров с использованием модуляционной методики для регистрации сигналов ЯМР.

**4. По рецензируемой диссертации можно сделать 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 (уточним, что соискатель использует модуляционную методику для выявления ЯМР сигнала, однако подавляющее большинство современных специалистов используют импульсную методику). Что же касается метода определения магнитного поля в условиях наличия больших градиентов, то и в этом случае (как считает автор настоящего отзыва) 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.

Сделанные замечание не снижают значимость серии научных работ соискателя, которые лежат в основе представленной диссертации. Выполненные В.В. Давыдовым эксперименты и расчеты вызывают однозначное уважительное отношение.

Представленная им к защите диссертационная работа, являющаяся законченным научным исследованием. Результаты, полученные в работе и использованные методы решения поставленных задач, полностью

соответствуют специальности: 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Автореферат и публикации В.В. Давыдова отражают содержание диссертационной работы.

Диссертация В.В. Давыдова полностью удовлетворяет требованиям и критериям п. 9 Положения ВАК РФ «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.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник лаборатории прецизионной физики и метрологии простых атомных систем (лаборатория № 2023),  
Федеральное государственное унитарное предприятие  
"Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии  
им. Д.И. Менделеева" {ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева"},  
190005, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 19  
телефон: +7 812 251-76-01; E-mail: yineronov@yandex.ru

Доктор физико-математических наук,  
профессор

  
Неронов Юрий Ильич

