

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».

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. Одним из наиболее сложных разделов ЯМР является исследование потоков текущих сред.

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.

1. Обоснованность и новизна научных результатов диссертационной работы.

В диссертационной работе В.В. Давыдов получил ряд результатов, которые позволили разработать ряд новых методов 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, я бы выделил следующие:

Установлено соотношение между постоянными и переменными магнитными полями в катушке нутации, позволяющее получить максимальный сигнал ЯМР с инверсией намагниченности и воспроизводить форму линии регистрируемого сигнала ЯМР с использованием модуляционной методики в слабом поле.

Разработан новый метод измерения расхода жидкости и создан лабораторный макет ЯМР расходомера с погрешностью измерения не более 1 %.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждается многочисленными научными публикациями в изданиях (SCOPUS, Web of Science, ВАК и т.д.). А также конкретными применениями её результатов, обсуждениями научных работ на конференциях различного уровня (в том числе и международных), а также наградами, полученными как лично В.В. Давыдовым, так и его учениками, особенно хочу среди наград выделить медаль РАН в 2015 году за лучшую студенческую научную работу.

2. Научная ценность и практическая значимость результатов диссертационной работы.

Научная ценность результатов работы заключается в том, что предложена и экспериментально реализована конструкция ЯМР спектрометра с двумя, либо несколькими соединительными патрубками с независимыми катушками нутации. Исследована зависимость диапазона измерения скоростей жидкостей в этих патрубках одним анализирующим устройством от различных параметров.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложены решения некоторых актуальных задач – быстрый и надежный экспресс – контроль состояния жидкой или вязкой среды в месте взятия пробы, измерение слабых магнитных полей внутри малогабаритных магнитных экранов, сильных неоднородных магнитных полей в сложных условиях, где другие типы магнитометров неприменимы и др.

Полученные в диссертационной работе результаты нашли применение в учебном процессе в университетах Санкт-Петербурга и Казани.

3. По рецензируемой диссертации можно сделать 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 сдвига фазы $\Delta\varphi$ ядерной намагниченности относительно неподвижно 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, 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 $\gamma \times \text{grad}B$, $x=v t$. За интервал времени dt набегает фаза $d\Delta\varphi = \gamma v t \text{ grad}B dt$. Интегрируя по времени 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 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 давно известных теорий парамагнитной релаксации в жидкости. Непонятно, зачем было это все переписывать. Более того, попутно сделаны ошибки в изложении этих теорий. Функции корреляции в случае релаксации за счет диполь-дипольного взаимодействия, модулированного случайной взаимной поступательной диффузией взаимодействующих спинов, корреляционная функция не описывается экспоненциальной зависимостью от времени, а выражается через функции Бесселя (см. Абрагам, Ядерный магнетизм, глава 8, ур.(8.112-8.114)). Настр.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:

$$dI_{xj}^- dt = -(U_0 + 2U_1 + U_2)I_{xj}^- - (U_2 - U_0)I_{xk}^-$$

$$dI_{xk}^- dt = -(U_0 + 2U_1 + U_2)I_{xk}^- - (U_2 - U_0)I_{xj}^-$$

и далее на стр.117 написано $d(Ixj\bar{+}Ixk\bar{) dt= -(U1 +U2)(Ixj\bar{+}Ixk\bar{),}$

В этом месте мой главный вопрос состоит в следующем. Релаксация поперечной намагниченности отражает декогеренцию спинов, т.е. релаксацию недиагональных элементов спиновой матрицы плотности. Недиагональные 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. Видимо, решил сделать ревизию, неудачную. Справедливости ради надо сказать, что в этой задаче при изложении релаксации когерентности допущена ошибка и у Абрагама в книге. Но эта ошибка была уже замечена более 40 лет тому назад, и она связана у Абрагама с тем, что он отбросил неоправданно 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 значений констант релаксации” трудно комментировать. Оценить порядок времени парамагнитной релаксации спинов ядер в жидкости можно и без этой довольно 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 ядерных спинов-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 поляризирующее поле намагниченность описывается кинетикой $M_{\text{равн.}} \cdot (1 - \exp(-t/T_1))$. Например, при $t=3T_1$, $1 - \exp(-3) = 0.95$, т.е. при выполнении условия (4.1) намагниченность достигает 95% своего равновесного значения. Если подождать больше, то намагниченность приблизится еще больше к 100% равновесного значения. Но диссертант считает, что 95% уже можно считать полной намагниченностью.

6. На стр. 178 приведены модифицированные диссертантом уравнения Блоха. Видимо, именно 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 предложенную модификацию уравнений Блоха для данной задачи непригодной. Прежде всего, они не учитывают того, что слои жидкости с разным радиусом проводят разное время в области радиочастотного поля. Диссертант добавил в уравнения слагаемое, призванное учесть неоднородность магнитного поля. Неоднородное поле, по модели диссертанта, вносится постоянным градиентом поля 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 протяжке поля при регистрации спектров ЭПР). Поэтому все, что в диссертации связано с симуляцией с помощью уравнений (4.9, 5.14) не вызывают у меня доверия. Поэтому я не считаю вывод 2 диссертации состоятельным.

В диссертации Давыдова В.В. параллельно присутствуют два мотива. Главный мотив-разработка новых расходомеров жидкости и магнетометров, основанных на эффекте ядерного магнитного резонанса. При создании этих приборов и уже с изготовленными самим диссертантом приборами проведены многосторонние эксперименты, найдены оптимальные условия для дальнейшего применения этих приборов. В этом направлении диссертант Давыдов В.В. добился существенных результатов, они представляют законченное научное исследование. Результаты, полученные в работе и использованные методы решения поставленных задач, полностью соответствуют специальности: 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Другой мотив работы-попытка обобщить теорию магнитного резонанса в жидкости, в частности попытки модификации уравнений Блоха. Считаю, что на поприще теоретика Давыдов В.В. не снискал лавров. Создание теории магнитного резонанса не сильная сторона Давыдова. У меня в этой части к нему есть конкретные претензии, которые я изложил в своих вопросах. Но сильная сторона Давыдова разработка и экспериментальное исследование новых приборов, основанных на эффекте ядерного магнитного резонанса. И это очень похвально и заслуживает поддержки.

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:

Научный руководитель
Казанского физико-технического института
им. Е.К. Завойского - обособленного
структурного подразделения Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки “Федеральный исследовательский центр
“Казанский научный центр РАН”

Салихов

Салихов Кев Минуллинович

Адрес организации: 420029, г. Казань, республика Татарстан, Сибирский
тракт, д. 10/7.

телефон: +7 (843) 231-91-06

E-mail: salikhov@kfti.knc.ru

Подпись руки К.М. Салихова заверяю.

