

Моделирование нестационарных процессов при исследовании жидких сред методом ядерного магнитного резонанса в слабом поле

Е.В. Рукин¹, Н.С. Мязин¹, В.В. Давыдов¹, В.И. Дудкин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

²Государственный университет Телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича, Большевиков 22, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия, 193232

Аннотация. В статье обоснована необходимость разработки теоретической модели для исследования влияния нестационарных процессов на форму регистрируемого сигнала ЯМР в слабом магнитном поле. Проведено сравнение различных способов решения уравнений Блоха для описания формы регистрируемых сигналов ЯМР с использованием модуляционной методики. Разработаны математические модели для описания формы сигнала ЯМР с учётом особенностей его регистрации с использованием модуляционной методики в слабом поле. Результаты расчётов, полученные разработанными нами методами, сопоставлены с экспериментальными данными.

1. Введение

В настоящее время одной из актуальных задач прикладной физики является разработка быстрых и надёжных методов экспресс-контроля состояния конденсированных сред [1–6]. Основным требованием, которое сейчас предъявляется к методам экспресс-контроля, является следующее. Проводимые исследования или измерения этими методами не должны вносить изменений в физическую структуру и химический состав исследуемой среды. Это необходимо для получения подтверждения выявленного отклонения состояния среды от стандартного в данной пробе на приборах высокого разрешения в стационарной лаборатории [3, 4, 7–10].

Многочисленные эксперименты показали, что метод на основе явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) является единственным в мире, который в случае его использования для исследования не вносит необратимых изменений в структуру и химический состав различных конденсированных сред в отличие от оптических, ультразвуковых, рентгеновских, электромагнитных и других [8–16].

Единственным условием применения ЯМР является наличие в исследуемой среде ядер с магнитными моментами [4, 8–10, 17–21]. Таких сред, как естественных, так и искусственных достаточно много. Особенно среди жидких, в составе которых почти всегда содержатся протоны. Поэтому различными учеными в мире выполнен большой объём исследований как экспериментальных, так и теоретических в области ЯМР. Повышенное внимание в этих исследованиях было уделено методикам регистрации сигнала ЯМР в сильных и средних высокооднородных магнитных полях, а также теоретическому описанию этих процессов для расшифровки регистрируемых спектров. В меньшей степени внимание в исследованиях было уделено импульсным методам ЯМР-релаксометрии, которые в основном реализуются в

средних магнитных полях с индукцией B , которая изменяется в пределах от 0.6 до 1.4 Тл. Для этих методов на основе решения уравнений Блоха были предложены методики измерения времен продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации конденсированной среды. Измеренные значения T_1 и T_2 позволяют однозначно установить наличие отклонения от стандартного состояния в исследуемой среде [3, 8, 10, 17, 22, 23]. В ряде случаев для известных по составу сред, например, жиры или гели при их производстве, по значениям T_1 и T_2 осуществляется их экспресс-контроль на производственной линии.

Проведенные нами ранее исследования показали, что реализовать экспресс-контроль с помощью импульсной методики, перемещая ЯМР-релаксометр, например, по территории предприятия, одному человеку крайне сложно по причине больших массогабаритных характеристик прибора и автономного источника питания (необходима большая энергия в импульсе порядка 300 Вт). Для измерения одного значения времени релаксации T_1 или T_2 необходимо использовать не менее 1000 импульсов. При использовании таких приборов в полевых условиях возникают большие сложности. Поэтому нами была разработана конструкция малогабаритного ЯМР-релаксометра (вес прибора с источниками питания не превышает 6 кг). Для регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле с B менее 0.15 Тл в этом приборе использовалась модуляционная методика. Проведенные нами исследования подтвердили возможности использования малогабаритного ЯМР-релаксометра для экспресс-контроля состояния конденсированной среды на месте взятия пробы. В то же время опыт эксплуатации малогабаритных ЯМР-релаксометров показал, что в ряде случаев (например, экологический мониторинг, исследование углеводородных соединений или биологических растворов) измеренных значений T_1 и T_2 для эффективного экспресс-контроля этого недостаточно. В этом случае для принятия обоснованного решения по дальнейшему использованию среды (особенно при исследовании воды и горюче-смазочных материалов) необходимо установить причину, вызвавшую данное отклонение от стандартного. Предварительной градуировки зависимости T_1 и T_2 от концентраций компонент в среде, как это осуществляется при контроле сред на производстве, нет, потому что не известно, какая примесь может находиться в исследуемой среде. Есть только данные о T_1 и T_2 для определенных температур среды, которые соответствуют её стандартному состоянию.

Одним из возможных вариантов решения данной задачи может быть предлагаемая нами методика расшифровки структуры сигнала ЯМР. В случае регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле с помощью модуляционной методики он формируется из сигналов поглощения и дисперсии [22–25]. В настоящий момент теория сигналов поглощения и дисперсии хорошо описана с помощью уравнений Блоха для импульсных методов, применяемых в спектрометрии и релаксометрии. Получено большое число аналитических выражений отдельно для сигналов ЯМР поглощения и дисперсии [4, 19, 22, 24–27]. Необходимо отметить, что в ЯМР-спектрометрии или релаксометрии в основном все измерения проводятся по сигналу поглощения по причине более высокого отношения сигнал/шум.

Для получения аналитических выражений для сигналов поглощения и дисперсии во время решения уравнений Блоха сделано различное число приближений, большая часть из которых не соответствует условиям регистрации сигнала ЯМР с использованием модуляционной методики в слабом магнитном поле. Основное из них связано с тем, что в слабом магнитном поле получить условие быстрого адиабатического прохождения через резонанс невозможно. А почти все теоретические решения по регистрации сигнала ЯМР были основаны на этом, так как в ЯМР спектрометре и импульсных ЯМР-релаксометрах сигналы поглощения регистрируются в условиях быстрого адиабатического прохождения через резонанс.

Отсутствие теоретической модели, позволяющей в соответствии с экспериментом описать формирование сигнала ЯМР в слабом магнитном поле существенно снижает эффективность исследований конденсированных сред, а также ограничивает возможности по модернизации ЯМР-расходомеров-релаксометров и магнитометров на текущей жидкости, в которых для регистрации сигнала ЯМР используется модуляционная методика. Поэтому целью данной работы является дополнить этот раздел теории ЯМР новыми знаниями, которые позволят воспроизводить форму линии регистрируемого сигнала ЯМР в условиях модуляции слабого

магнитного поля в межполюсном пространстве ЯМР-релаксометра, с учетом установленных ранее нами особенностей его регистрации [25, 28].

2. Структура регистрируемого сигнала ЯМР в слабом магнитном поле

Движение продольных и поперечных компонент вектора намагниченности конденсированной среды в катушке регистрации ЯМР спектрометра описывается уравнениями Блоха [29–31]:

$$\begin{aligned} \frac{dM_x(t)}{dt} + \frac{M_x(t)}{T_2} + \Delta\omega M_x(t) &= 0 \\ \frac{dM_y(t)}{dt} + \frac{M_y(t)}{T_2} - \Delta\omega M_x(t) + \gamma H_1 M_z(t) &= 0 \\ \frac{dM_z(t)}{dt} + \frac{M_z(t)}{T_1} - \frac{\chi_0 H_0}{T_1} - \gamma H_1 M_z(t) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{\text{nmr}}$ — расстройка частоты контура регистрации сигнала ЯМР ω_{nmr} от частоты прецессии намагниченности в поле H_0 ($\omega_0 = \gamma H_0$), χ_0 — статическая ядерная магнитная восприимчивость, H_1 — поле в катушке регистрации, T_1 и T_2 — времена продольной и поперечной релаксации жидкой среды, t — время.

В работах [24, 26, 31, 32] подробно обоснована при рассмотрении (1) замена переменных для компонент вектора намагниченности M_x и M_y и переход к вращающейся системе координат с частотой ω_{nmr} . Во вращающейся системе координат с новыми переменными (1) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{du(t)}{dt} + \frac{u(t)}{T_2} + \Delta\omega \cdot v(t) &= 0 \\ \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{T_2} - \Delta\omega \cdot u(t) &= -\gamma H_1 M_z(t) \\ \frac{dM_z(t)}{dt} + \frac{M_z(t)}{T_1} - \gamma H_1 v(t) &= \frac{M}{T_1} \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta\omega = \gamma H_0 - \omega$ — расстройка поля от резонанса, $M = \chi_0 H$ — намагниченность исследуемой среды в магнитном поле спектрометра, $v(t)$, $u(t)$ — сигналы поглощения и дисперсии.

В случае использования модуляционной методики для регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле величина H изменяется следующим образом:

$$H = H_0 + H_m \sin(\omega_m t) \quad (3)$$

где H_0 — постоянное магнитное поле, H_m — поле катушки модуляции, ω_m — частота модуляции.

В этом случае изменение расстройки частоты поля от резонанса в системе уравнений Блоха (2), с учетом (3), будет иметь следующую зависимость:

$$\Delta\omega = \gamma H_0 + \gamma H_m \sin(\omega_m t) - \omega \quad (4)$$

В уравнениях Блоха (2) появляется коэффициент $\gamma H_m \sin(\omega_m t)$, который зависит от времени. Наличие этого коэффициента не позволяет использовать для решения (2) стандартный метод, который применяется в ЯМР-спектроскопии. А именно привести (2) к интегральной форме типа Вольтера с помощью метода Гвоздова и Магазаника [24, 32, 33], чтобы потом разложить уравнения в ряды, определить условия их сходимости и ограничиться при вычислениях первым членом.

В случае, когда выполняется следующее соотношение:

$$\gamma^2 H_1^2 T_1 T_2 \ll 1, \quad (5)$$

происходит быстрое адиабатическое прохождение через резонанс, соответствующее случаю регистрации сигнала ЯМР в спектрометрах с сильными и средними высокооднородными магнитными полями.

Поэтому в большинстве работ при рассмотрении модуляционной методики, авторы делали следующее приближение $H_0 \gg \gamma H_m \sin(\omega_m t)$. Тем самым предполагая несущественное влияние поля модуляции на величину магнитного поля H_0 . Это давало возможность выполнить

приближенное решение уравнений [24, 26, 27, 34, 35], а потом ввести дополнительный член в решение, учитывающий модуляцию.

Наиболее близкое решение, которое отображает форму линии ЯМР, регистрируемую в эксперименте с использованием модуляционной методики было получено в работе [35].

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \cos\left(\omega_0 t + \frac{1}{2} \gamma \frac{dH}{dt} t^2\right) \quad (6)$$

С учетом (3) данное решение (6) приобретает следующий вид:

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \cos\left(\omega_0 t + \frac{1}{2} \gamma H_m \omega_m \cos(\omega_m t) t^2\right) \quad (7)$$

Анализ полученной формы линии с помощью (7) показывает, что регистрируемый сигнал ЯМР не зависит от значения поля H_1 , которое является определяющим параметром в схеме регистрации (автодинном детекторе) при создании условий прохождения через резонанс и для установления максимального отношения сигнал/шум при регистрации сигнала в слабых магнитных полях. Данное расхождение не позволяет в полном объеме сопоставить результаты теоретических расчетов с экспериментом.

Поэтому нами были разработаны два варианта описания формы регистрируемого сигнала ЯМР в слабом магнитном поле с использованием модуляционной методики.

В первом случае в уравнениях (2) необходимо учесть особенности регистрации сигнала ЯМР в слабом поле с использованием модуляционной методики. Одной из них является то, что регистрация сигнала ЯМР должна осуществляться только на частоте резонанса ($\omega_{\text{нмр}} = \omega_0 = \gamma H_0$). Для большинства исследуемых сред в случае отстройки частоты регистрации сигнала ЯМР $\omega_{\text{нмр}}$ от частоты резонанса ω_0 отношение сигнал/шум (S/N) может стать меньше 1.3. При таком значении отношения S/N работа схемы накопления сигнала ЯМР в ЯМР-спектрометрах и релаксометрах становится неэффективной [25, 28], что не позволяет проводить различные измерения с погрешностью не более 1%.

С учетом этой особенности соотношение (4) преобразуется в следующую функцию:

$$\Delta\omega = \gamma H_m \sin(\omega_m t) \quad (8)$$

Выражение (8) является новым коэффициентом для уравнений Блоха (2). Значения величин H_m и ω_m в нем определяется с учетом соотношений, установленных в [3, 25, 28].

Ещё один новый коэффициент, который мы вводим в уравнения Блоха (2), связан с необходимостью учета модуляции слабого магнитного поля H_0 в намагниченности исследуемой среды M . Новое соотношение для M , которое подставляется в (2), необходимо записать в следующем виде:

$$M = \chi_0 (H_0 + H_m \sin(\omega_m t)) \quad (9)$$

После подстановки новых коэффициентов (8) и (9) в уравнения Блоха (2), они принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{du(t)}{dt} + \frac{u(t)}{T_2} + \gamma H_m \sin(\omega_m t) v(t) &= 0, \\ \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{T_2} - \gamma H_m \sin(\omega_m t) u(t) + \gamma H_1 M_z(t) &= 0, \\ \frac{dM_z(t)}{dt} + \frac{M_z(t)}{T_1} - \frac{M}{T_1} - \gamma v(t) H_1 &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Система уравнений (10) решается численно с использованием математического пакета Mathematica относительно компонент $u(t)$, $v(t)$ и $M_z(t)$ с учетом следующих начальных условий:

$$\begin{aligned} M_z(0) &= \chi_0 H_0, \\ u(0) &= 0, \\ v(0) &= 0, \end{aligned}$$

так как точное аналитическое решение системы (9) для указанных компонент получить крайне сложно.

С учетом особенностей работы автодинного детектора [25, 28, 34], форму линии $G(t)$ регистрируемого сигнала ЯМР в слабом магнитном поле нами предлагается описывать следующим соотношением:

$$G(t) = F(t) \sqrt{\frac{A}{A+B} v^2(t) + \frac{B}{A+B} u^2(t)} \tag{11}$$

где $v(t), u(t)$ — сигналы поглощения и дисперсии, A и B — коэффициенты, определяющие вклад в регистрируемый сигнал ЯМР от сигналов поглощения и дисперсии, а $F(t)$ — коэффициент, учитывающий изменения фазы.

Второй вариант связан с тем, что при обработке результатов исследований довольно часто применяют различные аппроксимации. В ряде случаев, они позволяют с достаточно высокой точностью воспроизводить экспериментальные зависимости. Проведенные нами ранее исследования позволили установить, что форма линии регистрируемого сигнала, которая наблюдается на осциллографе как зависимость напряжения от времени (затухающие колебания – «вигли»), может быть описана следующей формулой:

$$U_c(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) f(t) \tag{12}$$

где U_0 — максимальное значение амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР, T_2 — время поперечной релаксации, $f(t)$ — функция, описывающая колебательную часть сигнала («вигли»).

На рис. 1 (а, b) представлен зарегистрированный сигнал ЯМР от воды с различными способами его аппроксимации. Анализ формы линии зарегистрированного сигнала ЯМР (рис. 1.а, график 1) показывает, что он спадает несимметрично, что связано с наличием нестационарных процессов при работе автодинного детектора в начальный момент прохождения через резонанс. Представленный на рис 1.а результат расчета (график 2) с использованием (7) имеет большую погрешность несовпадения с экспериментом (график 1). Поэтому нами был предложен вариант «зажать» график 1 (рис. 1.б) между двумя экспонентами (график 3 и 4), которые имеют разные коэффициенты затухания. В соответствии с теорией физического эксперимента формула для описания функции с различными огибающими может быть представлена в следующем виде:

$$u(t) = \frac{\text{env}_{\text{upper}}(t) + \text{env}_{\text{lower}}(t)}{2} + f_{\text{osc}}(t) \frac{\text{env}_{\text{upper}}(t) - \text{env}_{\text{lower}}(t)}{2} \tag{13}$$

где $\text{env}_{\text{upper}}(t)$ и $\text{env}_{\text{lower}}(t)$ — верхняя и нижняя огибающие соответственно, $f_{\text{osc}}(t)$ — функция, описывающая колебательный процесс.

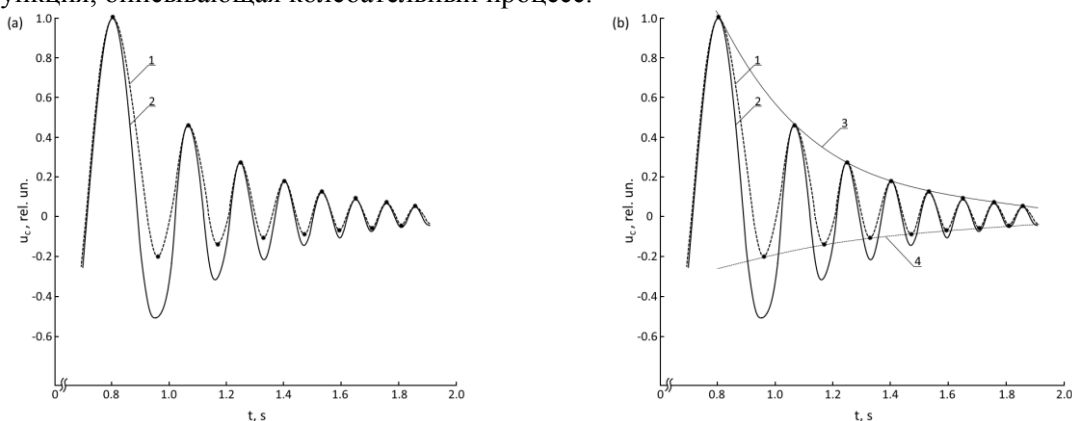


Рисунок 1. Формы линий сигнала ЯМР от воды при температуре $T = 291.4$ К. График 1 соответствует эксперименту. График 2 – теоретический расчет формы линии. Графики 3 и 4 — огибающие формы линии экспериментального сигнала.

На основе ранее полученных нами экспериментальных результатов, а также данных о исследованиях проведенными другими учеными в области ЯМР выражения для огибающих, а также функцию $f_{\text{osc}}(t)$ в (13) можно представить в следующем виде:

$$u(t) = \frac{a \exp(-b t) + c \exp(-d t)}{2} + \cos(g(t-f) + h(t-f)^2) \frac{a \exp(-b t) + c \exp(-d t)}{2}, \quad (14)$$

где a, c — безразмерные параметры, b, d — коэффициенты затухания ($b \sim \frac{1}{T_2}$, d учитывает неоднородность магнитного поля H_0), g — параметр, имеющий размерность частоты (Гц), учитывает частоту резонанса ω_0 , h — параметр, имеющий размерность $1/\text{сек}^2$, учитывает модуляцию поля, f — параметр, имеющий размерность времени, необходим чтобы откорректировать аппроксимацию по оси времени, потому что первый пик реального сигнала не всегда установлен в 0.

3. Результаты расчетов сигналов ЯМР и сравнение их с экспериментом

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты сравнения формы пиков («виглей») регистрируемого сигнала ЯМР (график 1) с расчетом их формы (график 2) в линии, выполненным с использованием (11). В качестве конденсированной среды использовалась вода при $T = 279.3$ К. Для расчета $G(t)$ численные значения сигналов поглощения и дисперсии $\nu(t)$ и $u(t)$, были получены из решения системы уравнений (10) при значениях магнитных полей и констант релаксации T_1 и T_2 , которые соответствуют эксперименту.

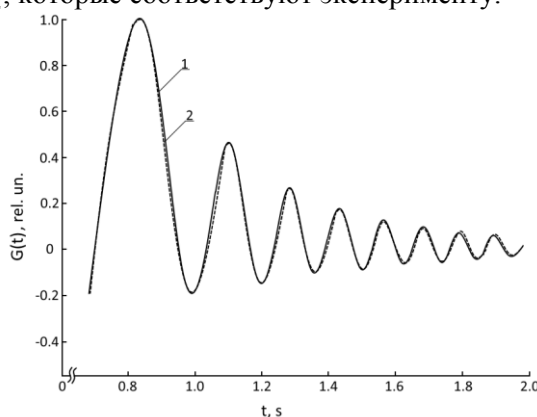


Рисунок 2. Форма линии сигнала ЯМР от воды. График 1 соответствует эксперименту, график 2 — расчету.

Анализ представленных на рис. 2 зависимостей показывает, что предложенное нами новое соотношение (11), в котором используются решения уравнений Блоха (10) с установленными нами новыми коэффициентами, позволяет воспроизводить форму линии регистрируемого сигнала ЯМР с помощью модуляционной методики (автодином) в слабом магнитном поле с погрешностью не более 3 % (до 5 пика). Этого результата вполне достаточно для проведения экспресс-контроля состояния среды на месте взятия пробы.

На рис. 3 в качестве примера представлен результат сравнения формы пиков («виглей») регистрируемого сигнала ЯМР (график 1) с расчетом их формы (график 2) в линии, выполненным с использованием (14) для водопроводной воды (рис. 3.а) и смеси двух бензинов (рис. 3.б).

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей показывает, что разработанная нами аппроксимация позволяет получить хорошее совпадение теоретических и экспериментальных форм линий магнитного резонанса. Это позволяет применять её для эффективного экспресс-контроля конденсированных сред.

4. Заключение

В результате проведенных экспериментов было установлено, что разработанная модель описания формы линии сигнала ЯМР с использованием (11) не имеет ограничений по использованию при экспресс-контроле. Для её применения необходимо зарегистрировать

сигнал ЯМР от среды, содержащей ядра с магнитными моментами, например, жидкости на резонансной частоте протонов. Измерить значения времен релаксации T_1 и T_2 данной среды. После этого можно рассчитать форму линии и определить вклад в её структуру от сигналов поглощения и дисперсии.

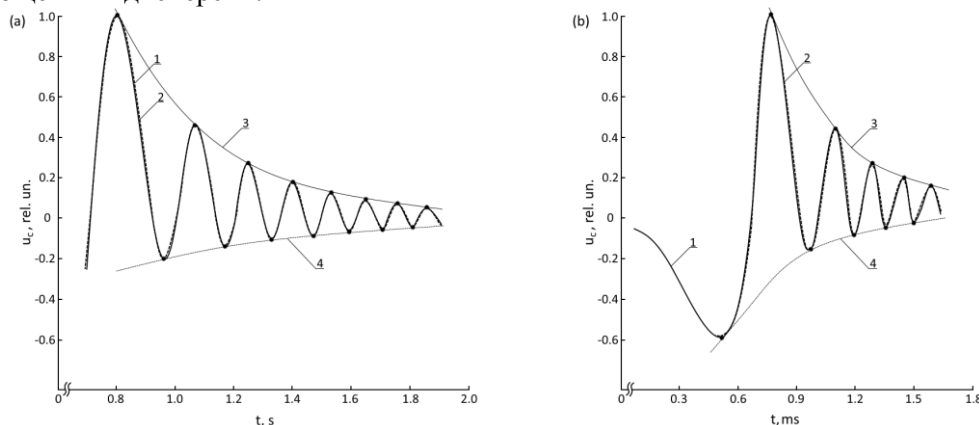


Рисунок 3. Форма линии сигнала ЯМР: а) от воды; б) от смеси бензинов АИ-95 и АИ-76. График 1 соответствует эксперименту, график 2 — расчету, графики 3 и 4 — огибающие.

В случае использования для расчета формы линии математической модели на основе (14) необходимы будут данные о предварительных градуировках всех параметров, входящих в (14), относительно значений полей H_1 , H_m , частоты модуляции ω_m и т.д. Градуировки должны быть выполнены для различных ядер среды, по которым будет производиться регистрация сигнала ЯМР и температур. Это создает большие трудности при использовании данной модели при экспресс-контроле в полевых условиях. Её более рационально использовать в лаборатории или стационарных помещениях, где известны исследуемые среды и более просто можно контролировать их температуру. Кроме того, в этих условиях требуется более высокая точность при проведении исследований в рамках экспресс-контроля.

5. Литература

- [1] Муссил, В.В. Экспресс-метод определения показателя преломления жидкостей / В.В. Муссил, В.В. Пилипенко, Е.Т. Лемешевская, К.Д. Керемжанов // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 3. – С. 113-115.
- [2] Боченин, В.И. Количественный рентгенофазовый экспресс-анализ сыпучих сырьевых материалов по регистрации дифракционного и характеристического излучения / В.И. Боченин // Дефектоскопия. – 2007. – № 11. – С. 83-87.
- [3] Davydov, V.V. Nutation line shape for the nonstationary regime of magnetic resonance flowmeter - relaxometer / V.V. Davydov, V.I. Dudkin, N.S. Myazin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – Vol. 61(10). – P. 1159-1165.
- [4] Neronov, Yu.I. Determination of the Temperature Dependence of the Shielding of Water Protons and a Method for Estimating the Temperature of Living Tissues / Yu.I. Neronov // Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 60(1). – P. 96-102.
- [5] Васильев, Н.С. Статистический Фурье – спектрометр для проведения экспресс – анализа химических веществ / Н.С. Васильев, И.С. Голяк, И.П. Голяк, А.А. Есаков, А.Н. Морозов, С.Е. Табалин // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – № 1. – С. 181-185.
- [6] Седельников, Ю.Е. Метод синтезированного видеосигнала в задачах неразрушающего контроля / Ю.Е. Седельников, Л.Ю. Фадеева // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 69-78.
- [7] Тютин, Л.А. Способ магнитно-резонансной томографии и устройство для его осуществления / Л.А. Тютин, Ю.И. Неронов // Патент на изобретение RUS 2063702.
- [8] D'yachenko, S.V. NMR studies of the sedimentation of ferromagnetic nanoparticles in a magnetic fluid / S.V. D'yachenko, I.S. Kondrashkova, A.I. Zhernovoi // Technical Physics. – 2017. – Vol. 62(1). – P. 1602-1604.

- [9] Davydov, V.V. On the sensitivity of running-fluid NMR magnetometer / V.V. Davydov, V.I. Dudkin, A.A. Petrov, N.S. Myazin // *Technical Physics Letters*. – 2016. – Т. 42, № 7. – P. 692-696.
- [10] Neronov, Yu.I. Determination of the difference in shielding by protons in water and hydrogen and an estimate of the absolute shielding by protons in water / Yu.I. Neronov, N.N. Seregin // *Measurement Techniques*. – 2013. – Vol. 55(11). – P. 1287-1293.
- [11] Davydov, R.V. Simulation of femtosecond pulsed laser ablation of metals / R.V. Davydov, V.I. Antonov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 769(1). – P. 012060.
- [12] Grebenikova, N.M. The universal optical method for condition control of flowing medium / N.M. Grebenikova, K.J. Smirnov, V.V. Artemiev, V.V. Davydov, S.V. Kruzhalov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012089.
- [13] Nepomnyashchaya, E.K. Spectroscopic techniques to study the immune response in human saliva / E.K. Nepomnyashchaya, E.A. Savchenko, E.N. Velichko, E.T. Bogomaz // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 956(1). – P. 012009.
- [14] Непомнящая, Э.К. Исследование альбумина методами лазерной корреляционной и диэлектрической спектроскопии / Э.К. Непомнящая, А.В. Черемискина, Е.Н. Величко, Е.Т. Аксенов, Т.А. Богомаз // *Оптический журнал*. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 50-54.
- [15] Baranov, M.A. Methods of non-destructive testing in studies of self-organization processes in protein films / M.A. Baranov, E.N. Velichko, E.T. Aksenov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 917(1). – P. 062059.
- [16] Давыдов, В.В. Метод определения дефектов на внутренних стенках трубопровода по распределению скорости текущей жидкости / В.В. Давыдов, С.В. Кружалов, Н.М. Гребеникова, К.Я. Смирнов // *Измерительная техника*. – 2018. – № 4. – С. 33-39.
- [17] Кашаев, Р.С. Влияние облучения в видимой и инфракрасной областях спектра на параметры ядерной магнитной релаксации протонов в нефтепродуктах / Р.С. Кашаев, Э.Г. Газизов // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2010. – Т. 77, № 3. – С. 347-354.
- [18] Filippov, A.V. Self – diffusion in a hyaluronic acid-albumin-water system as studied by NMR / A.V. Filippov, M.N. Artamonova, M.A. Rudakova, R.V. Gimatdinov, V.D. Skirda // *Magnetic Resonance in Chemistry*. – 2012. – Vol. 50(2). – P. 114-119.
- [19] Neronov, Yu.I. NMR determination of the triton-proton magnetic moment ratio to within 10^{-6} % / Yu.I. Neronov, A.E. Barzakh // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1977. – Т. 45, № 5. – P. 871-876.
- [20] Давыдов, В.В. Измерение магнитной восприимчивости и константы Кюри коллоидных растворов в феррофлюидных ячейках методом ядерного магнитного резонанса / В.В. Давыдов, Н.С. Мязин // *Измерительная техника*. – 2017. – № 5. – С. 55-59.
- [21] Neronov, Yu.I. Determination of the magnetic moment of the He-3 nucleus with an error of $2 \cdot 10^{-6}$ % / Yu.I. Neronov, A.E. Barzakh // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1978. – Т. 48, № 5. – С. 769-778.
- [22] Myazin, N.S. New method for determining concentrations of the mixture components during rapid control / N.S. Myazin, S.E. Logunov, V.V. Davydov, V.Yu. Rud', N.M. Grebenikova, V.V. Yushkova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 929(1). – P. 012064.
- [23] Ахадов, Я.Ю. Диэлектрические параметры чистых сред / Я.Ю. Ахадов. – М.: Издательство МАИ, 1999. – 856 с.
- [24] Лёше, А. Ядерная индукция / А. Лёше. – М.: Иностранная литература, 1963. – 684 с.
- [25] Давыдов, В.В. Некоторые особенности регистрации спектра конденсированной среды методом ядерного магнитного резонанса в слабом поле / В.В. Давыдов, Н.С. Мязин, Е.Н. Величко // *Письма в Журнал Технической Физики*. – 2017. – Т. 43, № 13. – С. 34-42.
- [26] Бородин, П.М. Ядерный магнитный резонанс / П.М. Бородин, М.И. Володичев, В.В. Москалев, А.А. Морозов. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1982. – 346 с.
- [27] Мефед, А.Е. Ядерный магнитный резонанс в модулированном эффективном поле / А.Е. Мефед // *ЖЭТФ*. – 1984. – Т. 86, № 1. – С. 302-312.

- [28] Давыдов, В.В. О возможности исследования конденсированных сред в экспресс-режиме методом ядерного магнитного резонанса / В.В. Давыдов, В.И. Дудкин, Н.С. Мязин, В.Ю. Рудь // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 1. – С. 127-135.
- [29] Bloch, F. Nuclear induction / F. Bloch // Phys. Rev. – 1946. – Vol. 70(7). – P.460-476.
- [30] Bloch, F. The nuclear induction experiment / F. Bloch, W.W. Hansen, F. Packard // Phys. Rev. – 1946. – Vol. 70(7). – P. 474-488.
- [31] Packard, M.E. Free nuclear induction in the Earth's magnetic field. / M.E. Packard, R.H. Varian // Phys. Rev. – 1954. – Vol. 93(8). – P. 941-952.
- [32] Абрагам, А. Ядерный магнетизм / А. Абрагам. – М.: Иностранная литература, 1963. – 612 с.
- [33] Бородин, П.М. Ядерный магнитный резонанс в земном поле. / П.М. Бородин, А.В. Мельников, А.А. Морозов, Ю.С. Чернышев. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1967. – 346 с.
- [34] Жерновой, А.И. Ядерно-магнитные расходомеры. / А.И. Жерновой. – Л.: Машиностроение, 1985. – 158 с.
- [35] Чижик, В.И. Ядерная магнитная релаксация. / В.И. Чижик. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1991. – 358 с.

Simulation of non-stationary processes in the study of liquid media by the method of nuclear magnetic resonance in a weak field

E. Rukin¹, N. Myazin¹, V. Davydov¹, V. Dudkin²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnic 29, St. Petersburg, Russia, 195251

²State University of Telecommunications. Professor MA Bonch-Bruевич, Bolshevnikov 22, building 1, St. Petersburg, Russia, 1932322

Abstract. The article substantiates the need to develop a theoretical model to study the effect of non-stationary processes on the shape of the recorded NMR signal in a weak magnetic field. A comparison of different methods for solving the Bloch equation to describe the shape of the recorded NMR signals using modulation techniques is carried out. Mathematical models are developed to describe the shape of the NMR signal taking into account the peculiarities of its registration using a modulation technique in a weak field. The results of calculations obtained by the methods developed by us are compared with experimental data.