

---



---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ**


---



---

УДК 53.083

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНИИ НУТАЦИИ  
В ЯДЕРНО-МАГНИТНЫХ МАГНИТОМЕТРАХ И РАСХОДОМЕРАХ  
С ТЕКУЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ**
© 2023 г. В. В. Давыдов<sup>a, b, c, \*</sup>, С. Э. Логунов<sup>b</sup>, Д. С. Проводин<sup>a</sup>, Р. В. Давыдов<sup>a, b, c</sup><sup>a</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251 Российская Федерация<sup>b</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
пр. Большевиков 22, Санкт-Петербург, 193232 Российская Федерация<sup>c</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии,  
р.п. Большие Вяземы Московской обл., 143050 Российская Федерация

\*E-mail: Davydov\_vadim66@mail.ru

Поступила в редакцию 10.04.2022 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 15.02.2023 г.

Рассмотрен механизм формирования линии нутации в текущей жидкости. Разработаны новые уравнения движения продольной и поперечных компонент вектора намагниченности в катушке нутации, в которых учтена неоднородность магнитного поля  $\Delta H_0$  в зоне воздействия радиочастотного поля  $H_1$  на текущую жидкость. В уравнениях также учтен характер изменения значения неоднородности магнитного поля  $\Delta H_0$  при движении жидкости по катушке нутации. Представлены результаты экспериментальных исследований формы линии нутации. Проведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S0033849423070021, EDN: WONJWM

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время приборы, принцип работы которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР), нашли большое применение при проведении исследований [1–6]. Особое место среди них занимают ЯМР-расходомеры-релаксометры на текущей жидкости, которые используются для измерения расхода  $q$  и времен продольной  $T_1$  и поперечной  $T_2$  релаксации агрессивных и опасных сред (например, бензол или серная кислота), а также биологических растворов, при работе с которыми требуется соблюдение условий стерильности [6–9]. Кроме того, ЯМР-расходомер-релаксометр является одним из основных измерительных устройств для контроля работы различных систем (например, охлаждения в атомной энергетической установке как на атомной электрической станции, так и на подвижном объекте и др.) [10–13].

Внесением незначительных изменений в электронную часть измерительной схемы можно преобразовать расходомер-релаксометр в нутационный ЯМР-магнитометр (тесламетр) для измерения индукции и неоднородности магнитного поля [14–16]. Полученный прибор обладает высокой

точностью (индукция магнитного поля определяется по частоте ядерного резонанса), не нуждается в предварительной градуировке, осуществляет измерения в реальном времени и прост в эксплуатации [14–16]. Высокие метрологические характеристики позволили его ранее использовать в качестве первичного [17] и вторичного [18] средства измерения магнитной индукции. На основе нутационного ЯМР-магнитометра [19] был создан государственный специальный эталон единицы магнитной индукции [20].

Для проведения измерений физических величин в ЯМР-расходомерах-релаксометрах и ЯМР-магнитометрах с текущей жидкостью используется зависимость амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР в анализирующем устройстве от частоты  $f_n$  поля  $B_1$  (линия нутации), которое воздействует на текущую жидкость в катушке нутации, размещенной на некотором расстоянии от магнитной системы анализирующего устройства [14, 21–23].

В последние десятилетия ЯМР-магнитометры с текущей жидкостью получили широкое применение для контроля параметров сильного неоднородного поля с индукцией более 1 Тл и неоднородностью  $0.1 \text{ см}^{-1}$  в ускорителях частиц, в спек-

тромах высокого разрешения, в которых для создания магнитного поля применяется система, состоящая из магнитных квадрантов, нуждающихся в центровке, а также вблизи мощной компактной электростанции или специальных трансформаторов – преобразователей различного назначения на судах с атомной энергетической установкой [14, 24]. Следует отметить, что контроль параметров магнитного поля в этих случаях приходится проводить в условиях сильных электромагнитных, а также других помех различного рода. Кроме того, иногда контроль магнитного поля на ускорителях или кораблях осуществляется в зонах с повышенным радиационным воздействием [24]. Все это создает большие проблемы для применения оптических датчиков [25–27], а также других типов магнитометров [28].

В настоящее время ЯМР-магнитометры на текущей жидкости являются единственными приборами, которыми можно в таких условиях проводить измерения параметров магнитного поля с погрешностью не выше 1%. Это обусловлено тем, что датчик (катушка нутации), в котором происходит определение параметров магнитного поля, может быть размещен на расстоянии более 100 м от расположения остальной части магнитометра [14, 24]. Информацию о параметрах магнитного поля от катушки нутации в систему регистрации переносит быстро протекающая намагниченная жидкость. Регистрация сигнала ЯМР от намагниченной жидкости осуществляется бесконтактным способом [14, 22–24]. Это обеспечивает развязку между катушкой нутации и остальной частью прибора, которая размещена в зоне, где влияние помех незначительно, а также нет радиационного воздействия.

При разработке новых или модернизации действующих ЯМР-магнитометров необходимо выбрать оптимальные параметры катушки нутации (в первую очередь геометрические размеры), а также параметры электронных схем для создания поля  $B_1$  инверсии намагниченности в текущей жидкости. Как показали проведенные нами исследования, геометрические размеры катушки нутации, особенно в условиях сильных неоднородных магнитных полей, оказывают существенное влияние на погрешность измерений [14–16, 22, 23].

Используемая в настоящее время теория нутационной кинетики на основе уравнений Блоха [29, 30] в случае размещения катушки нутации в сильном неоднородном магнитном поле не отображает физические процессы явления нутации в текущей жидкости, наблюдаемые в эксперименте. Это не позволяет произвести достоверную оценку величины поля  $B_1$ , которая необходима для расчета оптимальных параметров катушки нутации, для

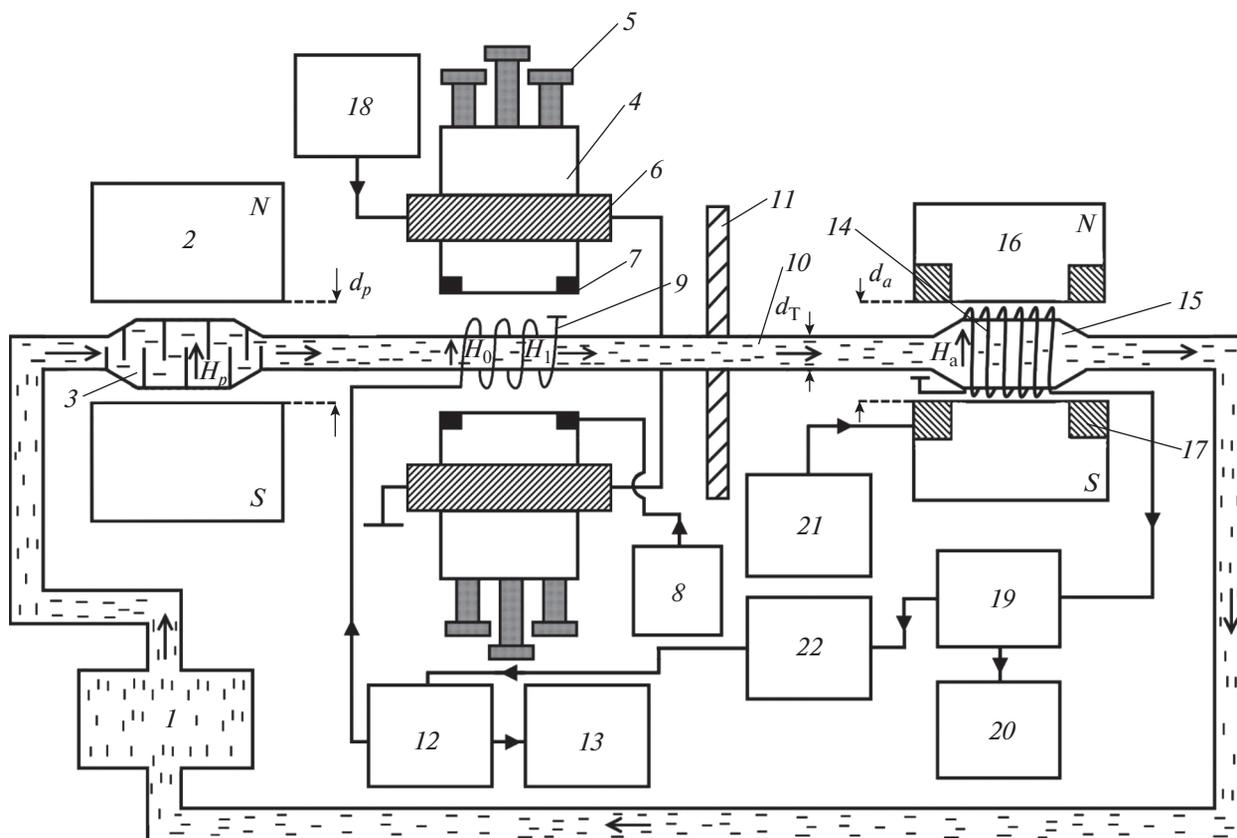
проведения измерений в сильном неоднородном магнитном поле с погрешностью не выше 1.0%.

Цель данной работы – исследование нутационной кинетики в сильном неоднородном магнитном поле, которое даст возможность на основании анализа полученных результатов в уравнениях движения вектора намагниченности текущей жидкости в катушке нутации учесть влияние неоднородности магнитного поля. Это позволит получить зависимость формы линии нутации в условиях сильного неоднородного магнитного поля от индукции магнитного поля, расхода жидкости  $q$ , времен релаксации текущей жидкости, геометрических размеров катушки нутации для определения значения поля  $B_1$ , соответствующего максимальной амплитуде регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛОВ ЯМР С ИНВЕРСИЕЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ В СИЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Для исследования нутационной кинетики в сильном неоднородном магнитном поле была разработана экспериментальная установка (рис. 1). Жидкость от помпы 1 поступает в сосуд-поляризатор 3, расположенный в магните-поляризаторе 2 с индукцией  $B_p = 0.781$  Тл, расстоянием между полюсами  $d_p = 15$  мм и неоднородностью  $0.5 \times 10^{-2}$  см<sup>-1</sup>. На выходе из магнита-поляризатора жидкость приобретает намагниченность  $M$ , ориентированную по направлению поля  $B_p$  [14–16, 22, 23] перпендикулярно направлению течения жидкости (см. рис. 1). Далее по соединительному участку трубопровода 6 с внутренним диаметром  $d_T = 2$  мм жидкость поступает в катушку нутации 4, размещенную в электромагните с индукцией  $B_0 = 1.118$  Тл и минимальной неоднородностью  $10^{-4}$  см<sup>-1</sup> при расстоянии между полюсами  $d_e = 24$  мм (диаметр полюсов 150 мм). Расстояние между полюсами можно изменять от 4 до 32 мм. С помощью регулировочных винтов 7 и вспомогательных катушек 6 можно изменять неоднородность магнитного поля между полюсами магнита. Использование электромагнита позволяет воспроизводить реальные условия, при которых выполняются измерения ЯМР-магнитометром.

В катушке нутации под действием радиочастотного поля  $B_1$  вектор намагниченности  $M$  поворачивается на некоторый угол  $\varphi_n$  относительно направления постоянного магнитного поля  $B_p$ . Это изменение ориентации вектора  $M$  сохраняется на всем пути течения жидкости от катушки нутации до катушки регистрирующего устройства по соеди-



**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки: 1 – помпа; 2 – магнит-поляризатор; 3 – сосуд-поляризатор; 4 – полюсные наконечники электромагнита; 5 – регулировочные винты электромагнита; 6 – катушки электромагнита; 7 – вспомогательные катушки; 8 – источник питания; 9 – катушка нутации; 10 – соединительный участок трубопровода; 11 – магнитный экран; 12, 21 – радиочастотные генераторы; 13 – частотомер; 14 – катушка регистрации; 15 – сосуд-анализатор; 16 – магнит-анализатор; 17 – катушки модуляции; 18 – источник питания; 19 – устройство регистрации сигнала ЯМР; 20 – осциллограф; 22 – устройство управления и обработки.

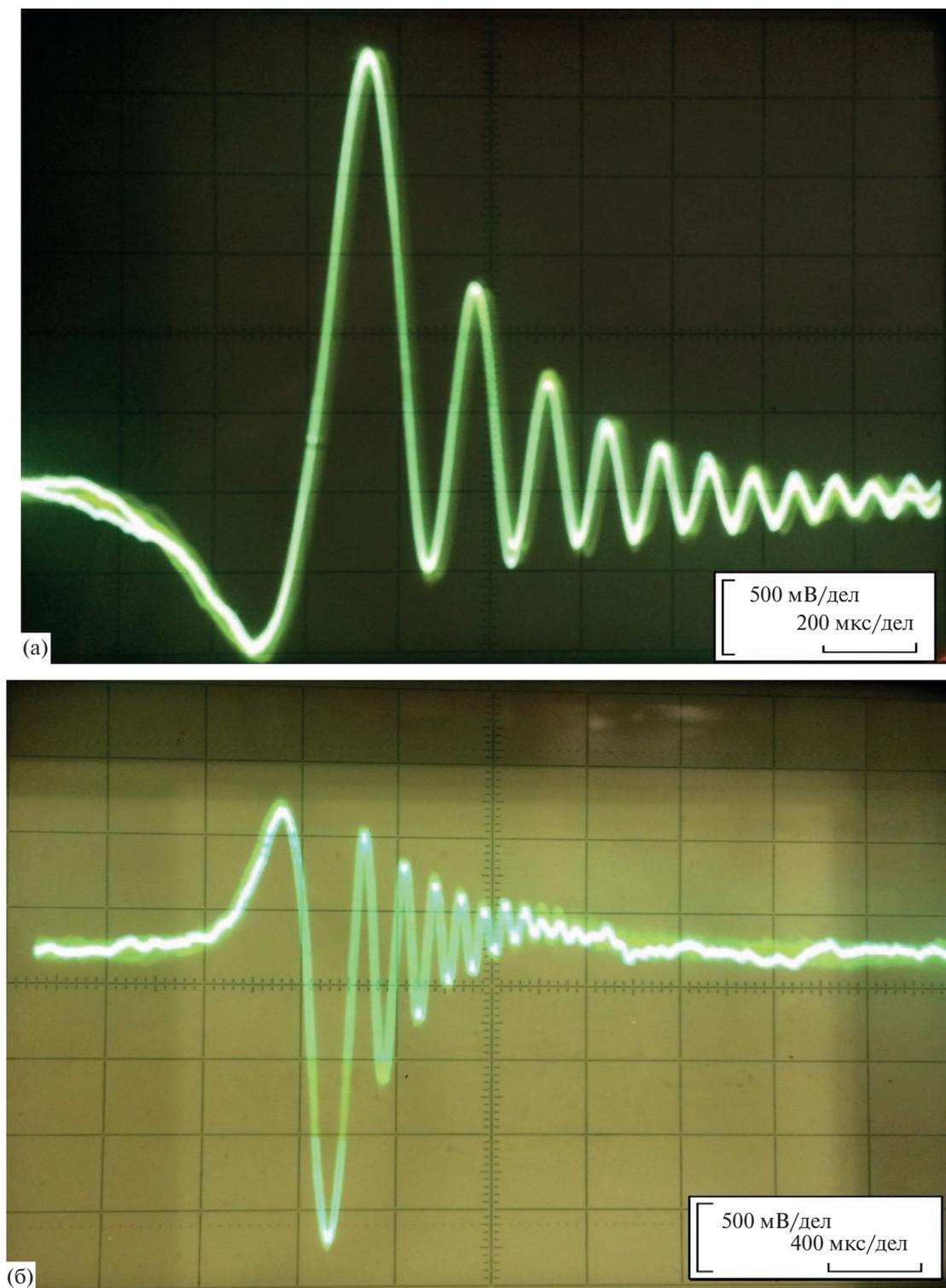
нительному участку трубопровода 6 (в зоне протекания жидкости выполняется условие адиабатической теоремы). Регистрирующее устройство – это катушка регистрации ЯМР-сигнала 10, расположенная в однородном поле  $B_a$  магнита-анализатора 9 (индукция  $B_a = 0.352$  Т и неоднородность  $10^{-4}$  см $^{-1}$ ,  $d_a = 14$  мм) и подключенная к высокочастотному генератору слабых колебаний (автодину), входящему в состав схемы регистрации 11 [14–16].

На рис. 2 представлен зарегистрированный сигнал ЯМР от водопроводной воды при температуре  $T = 18.1^\circ\text{C}$  с временами релаксации  $T_1 = 1.24$  с,  $T_2^* = 0.83$  мс. Катушка нутации, длина которой  $L_n = 3$  мм и диаметр  $d_n = 5$  мм, размещена в поле электромагнита с индукцией  $B_0 = 1.118$  Тл и неоднородностью  $0.0616$  см $^{-1}$ . Расход жидкости  $q = 1.82$  мл/с (оптимальный) установлен по максимальному отношению сигнал/шум (С/Ш) регистрируемого сигнала ЯМР для данной конструкции

экспериментальной установки [14–16, 22–24]. Сигнал ЯМР на рис. 2а соответствует отсутствию радиочастотного поля  $B_1$  в катушке нутации, на рис. 2б – условию инверсии намагниченности  $\varphi_n = 180^\circ$ , а значение  $B_1$  соответствует максимальному отношению С/Ш регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности.

На рис. 3 в качестве примера представлены экспериментальные линии нутации для различных температур водопроводной воды  $T$ . Величина индукции и неоднородность магнитного поля в зоне размещения катушки нутации в электромагните не изменялась. Катушка нутации размещена на каркасе. В этом случае контакт трубопровода с полюсами электромагнита исключен.

По ширине линии нутации  $\Delta f_n = f_2 - f_1$  была измерена неоднородность магнитного поля в зоне размещения катушки нутации в электромагните, которая составила  $0.0616 \pm 0.0003$  см $^{-1}$ . Данный результат совпадает (в пределах погрешности из-



**Рис. 2.** Регистрируемые сигналы ЯМР от водопроводной воды при  $f_{\text{мод}} = 50$  Гц: а – соответствует  $B_1 = 0$ , б – соответствует полной инверсии намагниченности.

мерений) с величиной неоднородности  $0.0621 \pm \pm 0.0006 \text{ см}^{-1}$ , измеренной многофункциональным тесламетром DX-160 (компания Xiamen Dexing Magnet Tech. Co., Ltd).

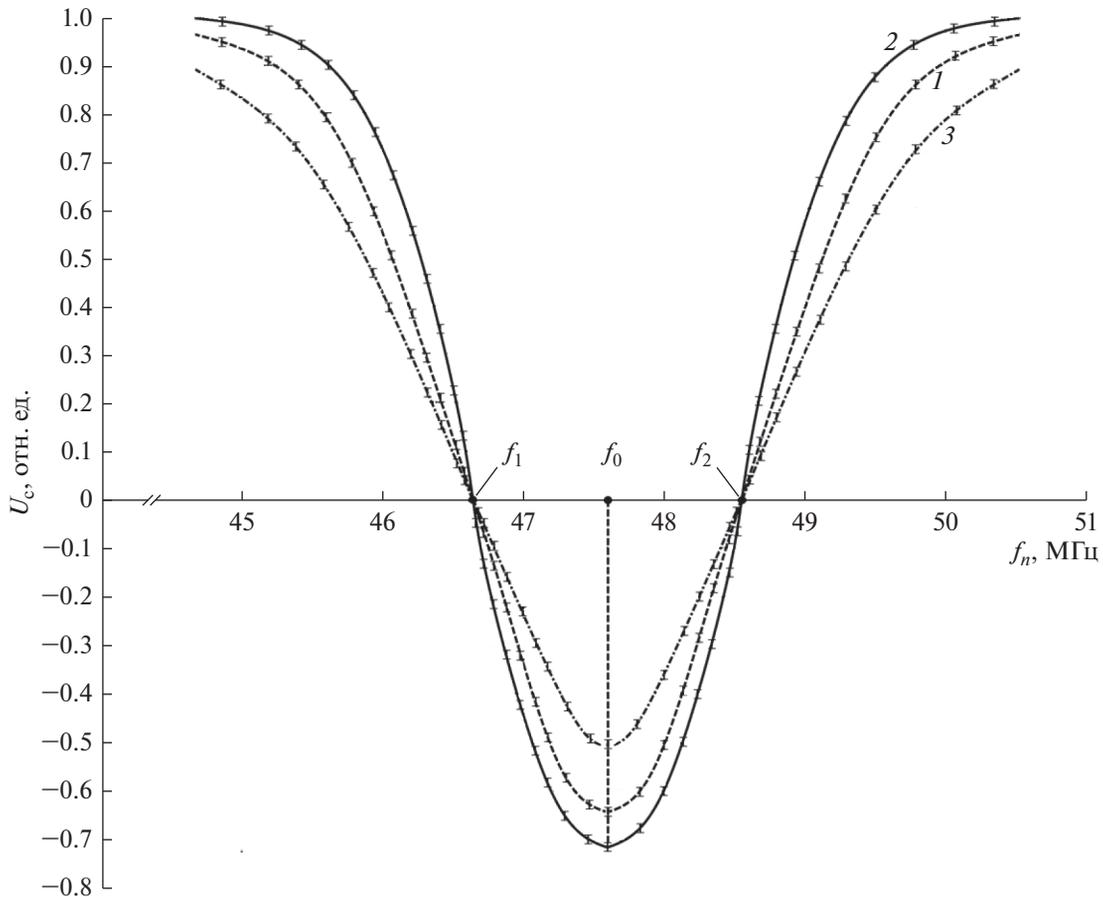


Рис. 3. Форма линии нутации регистрируемого сигнала ЯМР от водопроводной воды при  $T = 14.2$  (1),  $18.1$  (2) и  $36.2^\circ\text{C}$  (3); расход воды  $q = 1.82$  мл/с; поле  $B_1 = 0.18 \times 10^{-4}$  Тл.

## 2. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВЕКТОРА НАМАГНИЧЕННОСТИ В КАТУШКЕ НУТАЦИИ

В теории нутационной кинетики для описания характера изменения продольных и поперечных компонент вектора намагниченности текущей жидкости в катушке нутации используется следующая система дифференциальных уравнений Блоха [29, 30]:

$$\begin{aligned} dM_x/dt + M_x/T_2 + \Delta\omega M_y &= 0, \\ dM_y/dt + M_y/T_2 - \Delta\omega M_x + \gamma B_1 M_z &= 0, \\ dM_z/dt + M_z/T_1 - \chi_0 B_0/T_1 - \gamma B_1 M_y &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta\omega = (\omega_0 - \omega_n)$  — расстройка частоты генератора, подключенного к катушке нутации  $\omega_n$ , от частоты прецессии намагниченности в поле  $B_0$  ( $\omega_0 = \gamma B_0$ ), в котором располагается катушка нутации,  $\chi_0$  — статическая ядерная магнитная восприимчивость,  $t$  — время.

Максимальная амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности соответствует (только в случае ее совпадения с  $f_0$ )

повороту вектора  $M_n$  на  $180^\circ$  на частоте нутации  $f_n$  радиочастотного генератора, подключенного к катушке нутации. На данной частоте магнитный момент осуществляет движение по сфере Блоха, реализуется прецессия с частотой  $f_0 = \gamma B_0/2\pi$  ( $\gamma$  — гиромагнитное отношение ядер) вокруг вектора поля  $B_0$ . В этом случае  $f_n$  связана с магнитным полем  $B_0$ , в котором находится катушка нутации, следующим образом [14–16, 22–24, 29, 31]:

$$f_n = \gamma B_0/2\pi. \quad (2)$$

На этом принципе основаны измерения индукции магнитного поля ЯМР-магнитометрами на текущей жидкости. Амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР в случае инверсии намагниченности также зависит от величины поля  $B_1$  в объеме катушки нутации. Значение  $B_1$ , соответствующее максимальной амплитуде регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности, получается из решения уравнений (1) относительно компонент  $M_x$ ,  $M_y$  и  $M_z$ . В получаемом выражении для  $M_z$  приравнивают  $\Delta\omega = 0$  и из соотношения

$$\gamma B_1 t_n = \pi + 2\pi n, \quad (3)$$

**Таблица 1.** Экспериментальные  $B_1^3$  и рассчитанные значения поля  $B_1^{3p}$  и  $B_1^{4p}$  в катушке нутации для водопроводной воды  $T = 18.1^\circ\text{C}$ ,  $q = 1.82$  мл/с при различных значениях  $B_0$  и неоднородности

$B_0$ , Тл	Неоднородность, $\text{см}^{-1}$	$B_1^3$ , мкТл	$2B_1^{3p}$ , мкТл $n=0$	$2B_1^{4p}$ , мкТл	$2B_1^{5p}$ , мкТл
0.42282	$10^{-3}$	$9.94 \pm 0.09$	10.57	11.48	10.85
0.42282	$0.5 \times 10^{-2}$	$10.09 \pm 0.10$	10.57	24.44	11.53
0.42282	0.0086	$10.63 \pm 0.10$	17.19	30.80	11.99
0.42282	0.0286	$12.33 \pm 0.12$	45.99	—	14.27
0.42282	0.0597	$15.48 \pm 0.15$	45.99	—	17.64
0.86364	$10^{-3}$	$9.97 \pm 0.09$	10.57	25.07	10.95
0.86364	$0.6 \times 10^{-2}$	$10.14 \pm 0.09$	17.19	34.61	11.73
0.86364	0.0087	$11.26 \pm 0.11$	17.19	41.96	12.91
0.86364	0.0291	$16.58 \pm 0.16$	45.99	—	15.41
0.86364	0.0607	$16.59 \pm 0.16$	45.99	—	18.79
1.13009	$10^{-3}$	$10.01 \pm 0.09$	10.57	37.39	11.16
1.13009	$0.6 \times 10^{-2}$	$10.18 \pm 0.09$	17.19	47.43	13.36
1.13009	0.0088	$11.70 \pm 0.11$	45.99	—	13.36
1.13009	0.0296	$14.67 \pm 0.14$	45.99	—	16.44
1.13009	0.0616	$18.31 \pm 0.18$	45.99	—	20.27

*Примечание.* Значения  $B_1^{3p}$  получены с использованием формулы (3),  $B_1^{4p}$  — при решении уравнения (1), в которых неоднородность  $\Delta H_0$  учитывается с помощью (4) (тире означает, что ни при каких значениях  $B_1$  невозможно построить линию нутации); значения  $B_1^{5p}$  — при решении уравнений (5).

где  $n$  — принимает целые значения, включая 0,  $t_n$  — время протекания жидкости по катушке нутации, находят максимум намагниченности.

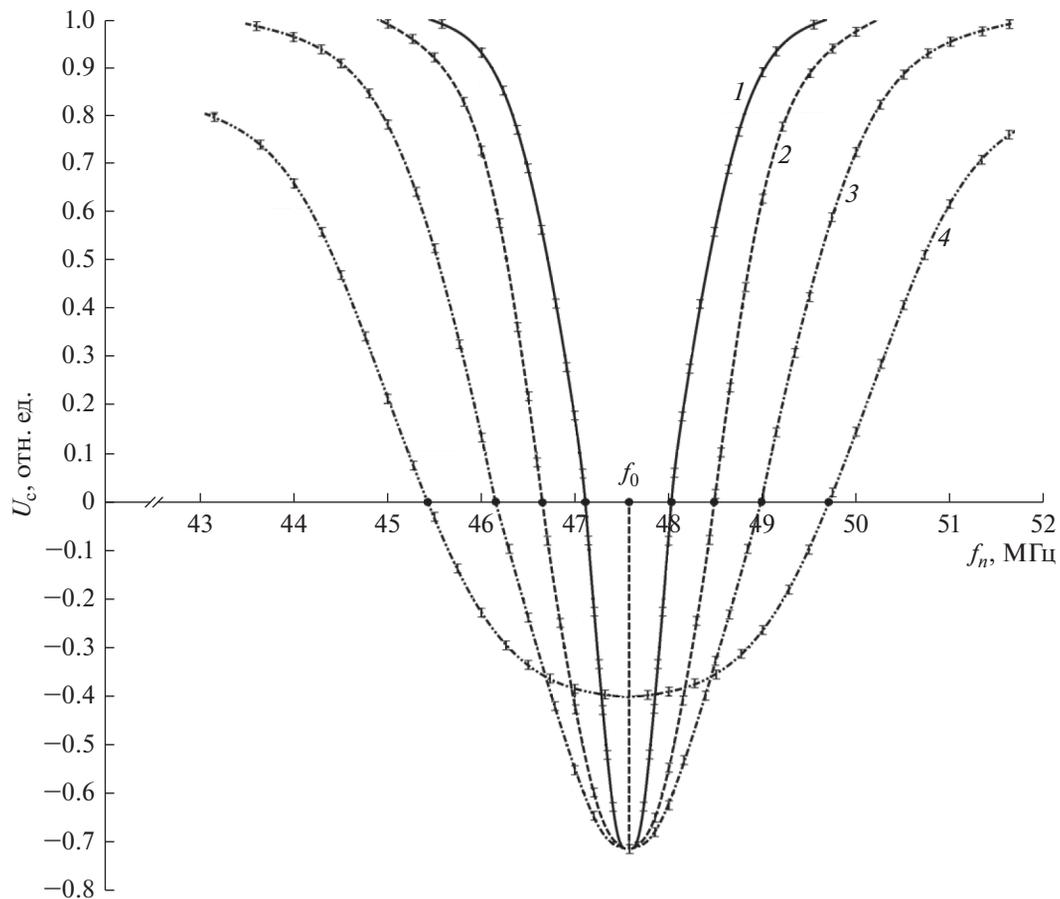
Далее при теоретических рассуждениях намагниченности многие авторы берут  $n = 0$ , а остальные значения  $n$  не используют. В этом случае получается следующая формула:  $B_1 = \pi/(\gamma t_n)$ , что соответствует воздействию  $\pi$ -импульса ( $t_n = V_n/q$ ,  $V_n$  — объем, занимаемый сегментом текущей жидкой среды в катушке нутации). Используя полученные соотношения для  $B_1$  и зная диапазон изменения  $q$ , производят расчет параметров катушки нутации и соответствующих электронных узлов.

Если подставить в (3) экспериментальные значения  $V_n$  и  $q$ , то получается  $B_1 = 0.23 \times 10^{-4}$  Тл. Расчетное значение  $2B_1$  в соответствии с [29, 30] надо сравнивать с экспериментальным, которое получено при неоднородности поля  $\times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  и значительно отличается (табл. 1). В предлагаемой формуле (3) для расчета  $B_1$  есть одно несоответствие по сравнению с экспериментом — не учитывается диаметр катушки нутации  $d_n$ , который может быть в несколько раз больше  $d_T$ , используемого для определения  $V_n$ .

Создаваемое катушкой нутации радиочастотное поле  $B_1$  оказывает воздействие на текущую жидкость также за пределами катушки по длине трубопровода на расстоянии до диаметра ее намотки  $d_n$  от каждого края. Данное расстояние зависит от соотношения между  $L_n$  и  $d_n$ , а также от коэффициента заполнения  $\eta$  жидкой средой катушки нутации [29]. В табл. 1 представлен результат расчета  $B_1^{3p}$  с учетом зоны действия поля  $B_1$  за пределами катушки нутации (при вычислении  $V_n$  используется длина  $L_n + 2d_n$ ). Расхождение с экспериментом при неоднородности  $10^{-3}$  составляет в данном случае менее 10%.

Проведенные нами эксперименты показали, что расстояние действия поля  $B_1$  на намагниченную текущую жидкость за пределами катушки нутации определяется не только ее параметрами —  $L_n$  и  $d_n$  — и  $\eta$ , но и величиной неоднородности магнитного поля  $\Delta B_0$  в зоне размещения катушки нутации. Например, если в катушке нутации  $B_1 \leq \Delta B_0/100$ , то действием поля  $B_1$  на намагниченную текущую жидкость за ее пределами (на длине, равной  $d_n/10$  и более от ее края) можно пренебречь.

В табл. 1 представлены результаты расчета  $B_1^{3p}$ , в которых при увеличении неоднородности маг-



**Рис. 4.** Форма линии нутации регистрируемого сигнала ЯМР от водопроводной воды при  $B_0 = 1.1301$  Тл и при различных напряженности поля (мТл) и неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации ( $\text{см}^{-1}$ ) соответственно: 0.0127, 0.01 (а), 0.0146, 0.0296 (б), 0.0183, 0.0616 (в), 0.0241, 0.0945 (г).

нитного поля в зоне размещения катушки нутации учитывалось также соотношение между  $B_1$  и  $\Delta B_0$ . Расхождение  $B_1^{\text{сп}}$  с экспериментом при неоднородности  $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  составляет менее 10%. При увеличении значения  $\Delta B_0$  в зоне размещения катушки нутации несоответствие теории и эксперимента возрастает. Учесть при расчете  $B_1$  по формуле (3) величину  $\Delta B_0$  при больших значениях  $B_0$  и степени неоднородности очень сложно, так как при выводе (3) из уравнений (1) считалось, что магнитное поле однородно по всей длине катушки нутации, а действие поля  $B_1$  за пределами катушки нутации на текущую жидкость незначительно.

На рис. 4 в качестве примера представлены экспериментальные линии нутации водопроводной воды при  $T = 18.1^\circ\text{C}$  при расходе  $q = 1.82$  мл/с для различных значений неоднородности  $\Delta B_0$  магнитного поля в зоне размещения катушки нутации. Значение  $B_1$  соответствует максимальной амплитуде регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией

намагниченности. Величина магнитного поля  $B_0$  поддерживается постоянной в зоне размещения катушки нутации с использованием регулировки тока в обмотках электромагнита. Контроль  $B_0$  осуществляется по частоте  $f_n$ .

На основе экспериментальных данных установлено, что амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности уменьшается при увеличении  $\Delta B_0$ , компенсировать данное уменьшение до какого-то момента можно увеличением  $B_1$ , пока позволяют параметры катушки нутации (см. рис. 4, кривая 4). Кроме того, увеличение  $\Delta B_0$  уширяет линию нутации —  $\Delta f_n$  возрастает. Также было установлено, что для определенного диапазона изменения неоднородности магнитного поля существуют оптимальные значения параметров катушки нутации (длина, диаметр, число витков и т.д.), позволяющие, изменяя  $B_1$ , получать максимальное значение крутизны склона линии нутации (максимальное отношение С/Ш), которое обеспечивает проведение измерений с погрешностью не выше 1%.

Оценить оптимальную величину  $B_1$  с учетом влияния неоднородности магнитного поля  $\Delta B_0$ , используя уравнения (3), как было показано выше, невозможно. Представленные в табл. 1 данные это подтверждают.

Поэтому, чтобы описать в уравнениях (1) наблюдаемое на практике влияние  $\Delta B_0$  на амплитуду и ширину линии нутации, ряд авторов [32–35] предлагают учесть  $\Delta B_0$  в уравнениях (1), используя стандартную формулу для определения  $T_2$  в регистрирующем устройстве по сигналу ЯМР [29]:

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \gamma \frac{\Delta B_0}{\pi}, \quad (4)$$

где  $T_2^*$  – эффективное время поперечной релаксации, которое вычисляется по спаду сигнала свободной индукции.

В табл. 1 представлены результаты расчета оптимальных значений поля  $B_1^{4p}$  с помощью уравнений (1), в которых неоднородность магнитного поля учитывается с помощью (4). Анализ полученных данных показывает, что незначительное расхождение с экспериментальными результатами наблюдается только при небольших значениях неоднородности  $10^{-3} \text{ см}^{-1}$  и напряженности магнитного поля  $B_0$ . В этих случаях также можно для оценки  $B_1$  использовать (3), что ранее было рассмотрено. При увеличении  $\Delta B_0$  расхождение увеличивается до 2.5 раз и более.

Если при расчете линии нутации с помощью уравнений (1) с учетом в них неоднородности через (4), использовать значения магнитных полей и неоднородностей магнитной системы ускорителя, для измерения которых успешно применяется ЯМР-магнитометр на текущей жидкости, а также времена релаксаций специальных растворов, которые используются в этих магнитометрах ( $T_1 \geq 5 \text{ с}$ ,  $T_2 \geq 0.6 \text{ с}$ ), то можно еще раз убедиться, что данная теория не подтверждается экспериментом.

### 3. НОВЫЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВЕКТОРА НАМАГНИЧЕННОСТИ В КАТУШКЕ НУТАЦИИ

На основании анализа различных теоретических моделей [3, 29, 30], а также проведенных ранее экспериментальных исследований [14–16, 21, 22, 24, 31] было сделано предположение, что неоднородность магнитного поля  $\Delta B_0$  в уравнении движения вектора намагниченности в катушке нутации (1) необходимо рассматривать в одном слагаемом с  $\Delta \omega$ . Движение вектора намагниченности в этом случае рассматривается в системе координат с осями  $x$ ,  $y$  и  $z$ , вращающимися с частотой  $\omega_n$  ( $f_n = \omega_n/2\pi$ ), вместе с полем  $B_1$  вокруг

оси  $z$ , по которой направлено постоянное магнитное поле  $B_0$ . Тогда предлагаемая нами система уравнений, в которой учитывается  $\Delta B_0$ , принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} dM_x/dt + M_x/T_2 + (\Delta\omega + (\Delta B_0/t_n)\gamma t)M_y &= 0, \\ dM_y/dt + M_y/T_2 - & \\ - (\Delta\omega + (\Delta B_0/t_n)\gamma t)M_x + \gamma B_1 M_z &= 0, \\ dM_z/dt + M_z/T_1 - \gamma B_1 M_y - M_0/T_1 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

В рассматриваемой авторами системе уравнений (5) предлагается использовать линейную зависимость изменения величины  $\Delta B_0$  по длине катушки нутации. В ЯМР-магнитометрах применяются катушки нутации длиной не более  $L_n = 3 \text{ мм}$ , которые размещаются на значительном расстоянии  $L_s$  от магнитных систем поляризатора и анализатора (более 1 м). На таком небольшом отрезке, как длина катушки нутации, аппроксимирующие кривые изменения  $\Delta B_0$  от расстояния (линейная, квадратичная и т.д.) незначительно отличаются друг от друга по характеру траектории в направлении движения жидкости по катушке нутации.

Проведенные авторами эксперименты показали, что при большой величине неоднородности магнитного поля  $\Delta B_0$  уменьшается зона воздействия поля  $B_1$  в катушке нутации, в которой происходит поворот вектора намагниченности текущей жидкости под действием поля  $B_1$ . Введенное в уравнения (5) время  $t_n$  позволяет учесть изменение этой зоны действия поля  $B_1$  в катушке нутации и определяется следующим соотношением:

$$t_n = \pi d_T(k)^{1/2} / (\gamma B_0 \Delta_n q)^{1/2}, \quad (6)$$

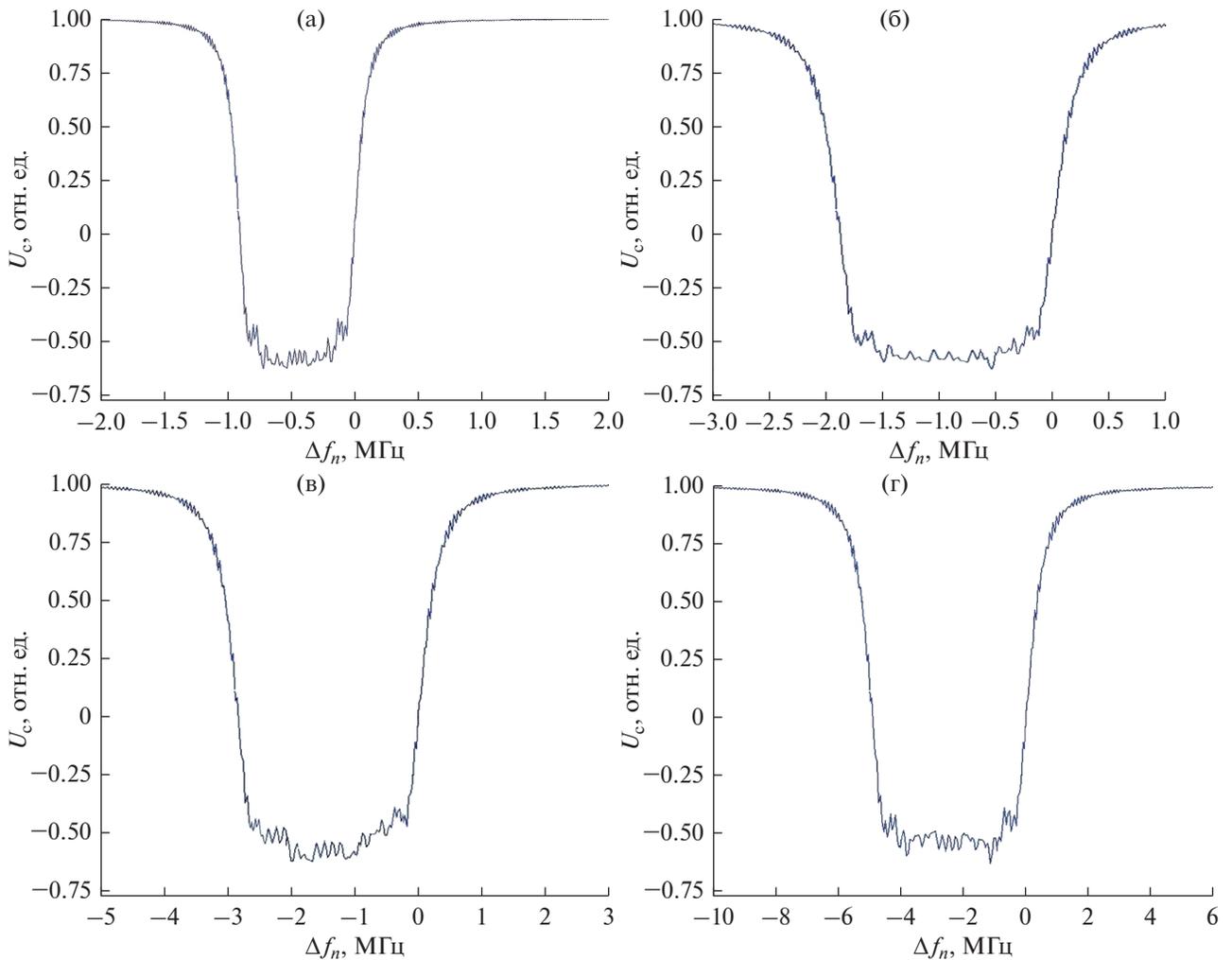
где  $\Delta_n$  – неоднородность магнитного поля в зоне размещения катушки нутации,  $k$  – корень характеристического уравнения, учитывающего изменение ширины линии нутации при изменении неоднородности магнитного поля.

Данное характеристическое уравнение было получено авторами из аналитического решения (1) относительно  $M_z$ ,  $M_y$ ,  $M_x$  при выполнении следующих условий:  $M_z = 1$  при  $\Delta\omega = 0$ ,  $M_z = 0$  при  $\Delta\omega = \gamma\Delta B_0$ . В данном случае характеристическое уравнение получается следующего вида:

$$\cos(\pi(1+k^2)^{1/2}) = -k^2.$$

Корни решения уравнения  $k = \pm 0.81$ . Для определения  $t_n$  используется  $k = 0.81$ .

На рис. 5 представлены результаты расчета линий нутации на основании решения уравнений (5) для  $T_1$  и  $T_2$ , соответствующих водопроводной воде при  $T = 18.1^\circ\text{C}$  и экспериментально измеренным значениям  $\Delta B_0$  и  $t_a$  – время воздействия  $B_1$  на текущую жидкость. Значение  $B_1$  на представленных графиках соответствует максимальной амплитуде



**Рис. 5.** Расчетная форма линии нутации сигнала ЯМР при  $T_1 = 1.23$  с,  $T_2 = 2.03$  мс,  $B_0 = 1.1301$  Тл и различных  $B_1$  (мТл) и неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации ( $\text{см}^{-1}$ ) соответственно: 0.0145, 0.01 (а); 0.0164, 0.0296 (б); 0.0202, 0.0616 (в); 0.0272, 0.0945 (г).

сигнала ЯМР с инверсией намагненности для различных значений неоднородности  $\Delta B_0$ . Значение  $B_0$  не изменяется.

Полученные результаты расчета показывают, что при увеличении неоднородности  $\Delta B_0$  происходит уширение линии нутации — величина  $\Delta f_n$  возрастает. Кроме того, при изменении  $B_1$  происходит компенсация уменьшения амплитуды сигнала ЯМР с инверсией намагненности при увеличении  $\Delta B_0$ . На представленных графиках (см. рис. 5) амплитуды сигналов ЯМР с инверсией намагненности почти не изменяются в случае создания в катушке нутации определенных (оптимальных) полей  $B_1$ , что отображает характер процесса нутации, наблюдаемый в эксперименте.

В табл. 1 представлены результаты расчета  $B_1^{5p}$  с использованием (5). Сравнение результатов

расчета значений  $B_1$  (см. рис. 5) с полученными значениями радиочастотного поля в результате эксперимента (см. рис. 4), а также данные табл. 1 показывают, что различие между величинами  $B_1^3$  и  $B_1^{5p}$  не превышает 20%. Полученные нами с помощью (5) оптимальные значения  $B_1$  являются ориентировочными для разработчиков ЯМР-магнитометров и полностью удовлетворяют их требованиям, в соответствии с которыми при изготовлении катушки нутации необходимо предусмотреть возможность увеличения  $B_1$  от оптимального значения на 20...50% в зависимости от решаемых задач и условий эксплуатации ЯМР магнитометра. Это позволяет избежать различных сбоев как при его длительной работе, так и при изменении внешних факторов (например, повышение температуры и т.д.). Поэтому расхождение эксперимен-

тальных и расчетных значений  $B_1$  в действующей конструкции ЯМР-магнитометра может быть легко компенсировано.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что предложенные авторами уравнения (5) позволяют адекватно описать процесс формирования линии нутации в ЯМР-измерителях с текущей жидкостью для любой величины индукции и неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации, что не позволяли сделать ранее используемые уравнения (1).

По результатам расчетов с использованием (5) можно определить параметры катушки нутации и электронных схем, которые к ней подключаются при разработке новых или модернизации действующих ЯМР-магнитометров. Это позволило проводить измерения параметров сильных неоднородных магнитных полей (индукции и неоднородности) с погрешностью 0.5%. Ранее погрешность измерения этих величин в ЯМР-магнитометрах составляла порядка 1.5...2.0%, так как параметры катушки нутации подбирали в основном опытным путем, что значительно затрудняло решение многих задач. Кроме того, оптимизация параметров катушки нутации позволяет в конструкциях ЯМР-магнитометров в два раза увеличить расстояние, на котором ее можно расположить от магнитных систем поляризатора и анализатора при измерении параметров магнитных полей в сложных условиях. Расстояние от защитной зоны, где размещена измерительная аппаратура, и точкой контроля параметров магнитного поля при решении многих задач является определяющим при выборе прибора [12–15, 21–24, 31, 32, 36]. Полученный результат существенно расширяет возможности использования ЯМР-магнитометра на текущей жидкости.

Наибольший интерес для читателей представлял бы вывод аналитического выражения для  $B_1$  при решении предложенных нами уравнений (5), как это сделано в [3, 32–35] для случая размещения катушки нутации в однородном магнитном поле  $B_0$ , так как компьютерные методы, которые мы применили, не могут заменить в полном объеме аналитическое выражение для  $B_1$ . Решение этой задачи будет предметом наших дальнейших исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пряхин А.Е., Шушкевич С.С., Оробей И.О.* // ПТЭ. 1983. № 6. С. 186.
2. *Давыдов В.В., Семенов В.В.* // РЭ. 1999. Т. 44. № 12. С. 1528.
3. *Мефед А.Е.* // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. № 1. С. 302.
4. *Gizatullin B., Gafurov M., Murzakhanov F. et al.* // Langmuir. 2021. V. 37. № 22. P. 6783.
5. *Марусина М.Я., Базаров Б.А., Галайдин П.А. и др.* // Измерит. техника. 2014. № 5. С. 68.
6. *Marusina M.Y., Karaseva E.A.* // Asian Pacific J. Cancer Prevention, 2018. V. 19. № 10. P. 2771.
7. *Gizatullin B., Gafurov M., Vakhin A. et al.* // Energy and Fuels. 2019. V. 33. № 11. P. 10923.
8. *Геронов Ю.И., Серегин Н.Н.* // Измерит. техника. 2012. № 11. С. 41.
9. *O'Neill K.T., Brancato L., Stanwix P.L. et al.* // Chem. Engineering Sci. 2019. V. 202. P. 222.
10. *Davydov V.V., Dudkin V.I., Karseev A.U.* // Optical Memory & Neural Networks (Inform. Opt.). 2013. V. 22. № 2. P. 112.
11. *Семенухин А.В., Саунин Ю.В., Рясный С.И.* // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 1. С. 8.
12. *Дьяченко С.В., Жерновой А.И.* // ЖТФ. 2016. Т. 61. № 12. С. 78.
13. *Витковский О.С., Марусина М.Я.* // Измерит. техника. 2016. Т. 59. № 3. С. 31.
14. *Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю.* // ПТЭ. 2015. № 6. С. 84.
15. *Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 3. С. 138.
16. *Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю.* // ПЖТФ. 2015. Т. 41. № 7. С. 103.
17. ГОСТ 8.095–73. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерения магнитной индукции. М.: Изд-во стандартов, 1973.
18. ГОСТ 8.144–75. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерения магнитной индукции в диапазоне 0.05–2 Тл. М.: Изд-во стандартов, 1975.
19. *Симонов В.М., Ягола В.К.* // Измерит. техника. 1975. № 10. С. 76.
20. *Ягола Г.К., Казанцев Ю.И., Симонов В.М. и др.* // Измерит. техника. 1976. № 3. С. 52.
21. *Дьяченко С.В., Лебедев Л.А., Сычев М.М., Нефедова Л.А.* // ЖТФ. 2018. Т. 63. № 7. С. 1018.
22. *Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю.* // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 2. С. 8.
23. *Жерновой А.И., Дьяченко С.В.* // ЖТФ. 2015. Т. 60. № 4. С. 118.
24. *Давыдов В.В., Дудкин В.И., Величко Е.Н., Карсеев А.Ю.* // Измерит. техника. 2015. Т. 58. № 5. С. 56.
25. *Girard S., Kuhnhen J., Gusarov A., Brichard B. et al.* // IEEE Trans. 2013. V. NS-60. № 3. P. 2015.
26. *Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Salgansky M.Y. et al.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 121. № 21. P. 213104.

27. *Dmitrieva D.S., Pilipova V.M., Rud V.Y.* // Lecture Notes in Computer Science (LNCS) (including sub-series Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2020. V. 12526. P. 348.
28. *Ignatiev V.K., Lebedev N.G., Orlov A.A., Perchenko S.V.* // J. Magn. Magn. Mater. 2020. V. 494. P. 165658.
29. *Leshe A.* Nuclear Induction. Berlin: Verlag Wissenschaften, 1963.
30. *Abragam A.* The Principles of Nuclear Magnetism. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1961.
31. *Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю.* // Измерит. техника. 2015. Т. 58. № 3. С. 48.
32. *Жерновой А.И.* Измерение магнитных полей методом нутации. Л.: Энергия, 1979.
33. *Жерновой А.И.* Ядерно-магнитные расходомеры. Л.: Машиностроение, 1985.
34. *Чижик В.И.* Ядерная магнитная релаксация. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991.
35. *Бородин П.М., Володичев М.И., Москалев В.В., Морозов А.А.* Ядерный магнитный резонанс. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982.
36. *Давыдов В.В., Семенов В.В.* // ПТЭ. 1999. № 3. С. 151.