

канате с обеих сторон на расстоянии 1,5—2 м от места расположения ПП. Это уменьшит влияние размагничивания каната от действия механических нагрузок.

Выполненный метрологический анализ закрытых каналов, выводы и рекомендации справедливы также и для каналов большого диаметра других конструкций.

Л и т е р а т у р а

1. Пат. DE 19601707 (A1) ФРГ. МПК G01N27/82. Verbesserung der linearen Auflösung von elektromagnetischen Instrumenten zum Prüfen eines Drahtseiles / Michel Hamelin, Frank Kitzinger. 1996. [Электрон. ресурс] <http://www.google.ch/patents/DE19601707A1?cl=de&hl=ru> (дата обращения 20.10.2016).

2. Пат. US 5565771 (A) Канада. МПК G01N27/82. Apparatus for increasing linear resolution of electromagnetic wire rope testing / Michel Hamelin, Frank Kitzinger. 1996. [Электрон. ресурс] <https://www.google.com/patents/US5565771> (дата обращения 20.10.2016).

3. Пат. 2204129 РФ. Способ неразрушающего контроля площади поперечного сечения и обнаружения локальных дефектов протяжённых ферромагнитных объектов и устройство для его осуществления / В. В. Сухоруков, С. Б. Белицкий // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 33.

4. Нетушил А. В., Поливанов К. М. Основы электротехники. Ч. 3. М.: Энергия, 1956.

5. Немцов М. В. Справочник по расчёту параметров катушек индуктивности. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Дата принятия: 13.01.2016.

53.082.79

Ядерно-магнитный спектрометр для исследований потоков жидких сред

В. В. ДАВЫДОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет, С.-Петербург, Россия,
e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Рассмотрены особенности исследований потоков жидких сред ядерно-магнитным спектрометром. Учёт этих особенностей в конструкции ядерно-магнитного спектрометра позволил определять относительные концентрации парамагнитных ионов, а также измерять времена продольной и поперечной релаксации с погрешностью не меньше 0,5 % в потоках жидких сред. Получен режим регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса текущей жидкости от ядер фтора, фосфора, лития, бора, натрия, хлора, ртути. Представлены результаты экспериментальных исследований потоков жидких сред.

Ключевые слова: ядерно-магнитный спектрометр, поток жидкости, магнитное поле, время продольной релаксации, время поперечной релаксации, отношение сигнал—шум.

In article the features of liquid fluids streams investigations by nuclear magnetic spectrometer are considered. The account of these features in nuclear magnetic spectrometer construction allows to determine the relative concentrations of paramagnetic ions and to measure the spontaneous and transverse relaxation times with an error of not more than 0,5 % in liquid streams. In nuclear magnetic spectrometer the nuclear magnetic resonance registration regime of nuclei: fluorine, phosphor, lithium, boron, sodium, chlorine, as well as mercury is implemented additionally from flowing liquid. The results of experimental investigations of liquid mediums streams are presented.

Key words: Nuclear magnetic spectrometer, liquid stream, magnetic field, spontaneous relaxation time, transverse relaxation time, attitude of signal/noise.

Измерения параметров текущей жидкой среды, по которым можно установить её состояние, — одна из актуальных задач [1—4]. Исследования структуры потока жидких сред необходимы для совершенствования конструкции измерителей физических величин потока (расходомеров, спектрометров, пульсоксиметров и т. д.), приборов искусственного жизнеобеспечения человека, систем охлаждения, а также для разработки новых систем транспортировки жидкостей [3—8].

Наибольшую сложность представляют измерения в агрессивных и опасных средах, таких как бензол, гептан или концентрированная серная кислота. Большие трудности возникают при исследованиях биологических растворов и ме-

дицинских суспензий при соблюдении условий стерильности. Измерения в таких средах желательно проводить приборами без непосредственного контакта с исследуемой текущей средой. Например, для измерений температуры и скорости частиц в потоках плазмы применяют высокоскоростные видеокамеры [9]. Иногда потоки жидких сред исследуют оптическими методами, основанными на регистрации рассеянного лазерного излучения от текущей среды [10]. Однако при использовании этих методов в условиях жидких сред, текущих по трубопроводу, возникает ряд проблем. Трубопроводы, применяемые для транспортировки рассматриваемых сред или медицинских суспензий, изготавливают из матери-

ала с низкой прозрачностью. Это значительно затрудняет применение оптических методов, а включённые в трубопроводы, для проведения исследований, вставки из прозрачных материалов, в основном из стекла повышенной прочности, искажают фронт текущего потока на стыках вставка-трубопровод [11]. При работе с медицинскими суспензиями или биологическими растворами скопление различных микроорганизмов на таких стыках может привести к непредсказуемым последствиям.

Измерители, принцип работы которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР), решают задачу исследования потоков жидких сред. ЯМР-спектрометры позволяют проводить исследования различных веществ бесконтактным методом как в стационарном, так и в текущем состоянии [3—5, 8, 12, 13]. Основным условием применения этого метода является наличие в исследуемом веществе ядер с отличным от нуля магнитным моментом, что справедливо для любой жидкой среды. Кроме того, ЯМР-спектрометры — единственные устройства, которые позволяют определять времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации с погрешностью менее 1 % как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения жидкости. По измеренным бесконтактным способом временам T_1 , T_2 можно контролировать температуру и pH потока жидкой среды во время технологических процессов на производстве, особенно при работе с опасными средами и биологическими растворами.

В отличие от исследований жидких сред, находящихся в ЯМР-спектрометрах в стационарном состоянии, время t_p определения текущей жидкости в магните спектрометра может изменяться в больших пределах в зависимости от расхода q жидкой среды, который в зависимости от технологического процесса может изменяться на два порядка [5, 13]. Для того чтобы текущая жидкость полностью намагнитилась в поле магнита спектрометра, необходимо выполнить следующее условие [3—6, 13, 14]:

$$t_p \geq 3T_1. \quad (1)$$

Значения T_1 исследуемых сред могут изменяться от десятков микросекунд (медицинские суспензии) до 20 с (бензол). Возникающий между t_p и T_1 большой временной интервал делает неэффективными исследования текущей жидкости с помощью одного магнита, который одновременно выполняет функцию поляризатора и анализатора, как это происходит при исследованиях жидких сред в стационарном состоянии [13, 14]. Поэтому в ЯМР-спектрометрах с текущей жидкостью применяют два независимых магнита, разнесённых на некоторое расстояние. Один из них — поляризатор, предназначен для намагничивания жидкости, другой — анализатор для регистрации ЯМР-сигнала от намагнитившейся текущей жидкости. Такое разделение магнитных систем позволяет использовать достаточно большой объём V_p для намагничивания жидкости в магните-поляризаторе (выполнять условие (1) при больших изменениях q) и сильное магнитное поле с индукцией B порядка 1 Тл с достаточно большой неоднородностью (порядка 10^{-2} см $^{-1}$). Требования к неоднородности магнитного поля при регистрации ЯМР-сигнала значительно выше (не меньше $0,5 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$).

Ещё одна особенность исследований текущей среды — очень короткое (десятки миллисекунд) время нахождения среды в катушке регистрации t_k ЯМР-спектрометра при боль-

шом расходе q . Поэтому традиционные методы ЯМР-спектроскопии (сканирование магнитного поля или частоты радиоимпульсов) для регистрации спектра исследуемой текущей среды применять нецелесообразно. За время сканирования $t_c \gg t_k$ сегмент намагнитившейся жидкой среды, от которого регистрируют сигнал ЯМР, может много раз измениться в катушке регистрации, особенно при большом расходе q . Увеличение размеров катушки регистрации для исключения данного факта неэффективно, так как приводит к значительному уширению ЯМР-линии из-за роста неоднородности магнитного поля в зоне регистрации ЯМР-сигнала, увеличению погрешности измерений и снижению разрешающей способности спектрометра.

Поэтому для регистрации сигналов в ЯМР-спектрометрах с текущей жидкостью применяют модуляционную методику [3—6]. В этом случае регистрируемый в однородном магнитном поле ЯМР-сигнал представляет затухающее во времени гармоническое колебание в форме «виглей», что создаёт ряд особенностей как при исследовании сред, так и при регистрации ЯМР-сигнала.

Цель данной работы — определение и учёт этих особенностей при измерениях и в конструкции ЯМР-спектрометра для увеличения функциональных возможностей прибора при исследованиях потоков текущих сред.

Лабораторный макет ЯМР-спектрометра и особенности измерений. Разработанные ранее ЯМР-спектрометры для исследований текущей жидкости были настроены на регистрацию ЯМР-сигнала от протонов (что соответствует гиромагнитному соотношению $\gamma = 42,57637513$ МГц/Т) [3, 4, 13]. Совершенствование технологических процессов на опасных производствах сделало необходимым исследования текущих сред, не содержащих протоны (ртуть, жидкие соли металлов с температурой плавления до 100 °С). Однако в этих средах присутствуют ядра с магнитными моментами. Кроме того, возникла необходимость контроля относительных концентраций компонентов в текущей жидкой среде, например, число протонов и ядер хлора в единице объёма соляной кислоты HCl.

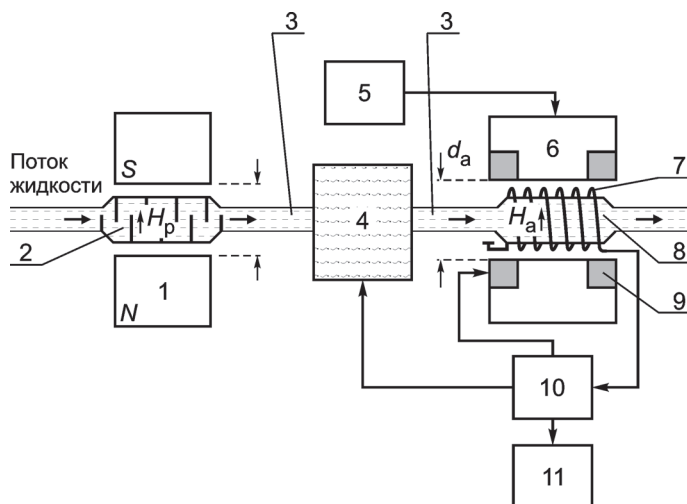


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

1 — магнит-поляризатор; 2 — сосуд-поляризатор; 3 — соединительные участки трубопровода; 4 — датчик нутации; 5 — источник питания; 6 — электромагнит-анализатор; 7 — катушка регистрации ЯМР-сигнала; 8 — сосуд-анализатор; 9 — катушки модуляции; 10 — устройство регистрации ЯМР-сигнала и управления; 11 — осциллограф

В настоящее время разрабатывают новые модели компактных реакторов мощностью 50 МВт, высоким КПД и жидким натрием или литием в качестве текущих сред. Это направление считают одним из самых перспективных в атомной энергетике, особенно для военных целей. Ядра натрия и лития обладают магнитным моментом, что позволяет регистрировать ЯМР-сигнал от этих веществ.

Для реализации отмеченных задач необходимы новые исследования и конструкторские решения. На рис. 1 представлен лабораторный макет ЯМР-спектрометра для исследований потока жидких сред, разработанный на основе собранных ранее автором конструкций ЯМР-измерителей с текущей жидкостью [3—6, 8, 13]. Поток жидкости поступает в сосуд-поляризатор 2, расположенный в магните-поляризаторе 1 с индукцией $B_p = 0,896$ Тл, расстоянием между полюсами $d_p = 15$ мм и неоднородностью $0,5 \cdot 10^{-2}$ см $^{-1}$. На выходе из магнита-поляризатора 1 жидкость приобретает намагниченность M , ориентированную по направлению магнитного поля H_p перпендикулярно направлению течения жидкости [4—6]. По соединительному участку трубопровода 3 внутренним диаметром $d_t = 1,5$ мм жидкость поступает в датчик нутации 4. Более подробно конструкция датчика нутации и процессы, происходящие в нём, рассмотрены в [15]. В датчике нутации 4 под действием радиочастотного поля H_1 вектор намагниченности M_p поворачивается на угол φ_n относительно направления постоянного магнитного поля H_p [5, 6, 15]. Это изменение ориентации вектора M_p сохраняется на всём пути течения жидкости от катушки нутации до катушки регистрирующего устройства по соединительному участку трубопровода 3 для всех магнитных полей в зоне протекания жидкости. Регистрирующее устройство — это катушка регистрации ЯМР-сигнала 7, размещённая в поле H_a электромагнита-анализатора 6, подключённого к высокостабильному источнику питания 5. Индукция B_a между полюсами электромагнита, расположенными на расстоянии $d_a = 14$ мм, изменяется от 0,05 до 0,632 Тл при неоднородности поля 10^{-4} см $^{-1}$. Катушка регистрации 7 подключена к высокочастотному генератору слабых колебаний, входящему в состав устройства регистрации и управления 10 [5, 6, 15, 16]. Частота

та $f_{ЯМР}$ регистрации ЯМР-сигнала связана с магнитным полем анализатора следующим соотношением [2, 6—8, 13—16]:

$$f_{ЯМР} = \gamma H_a,$$

где γ — гиромагнитное отношение ядра.

Для регистрации ЯМР-сигнала разработана и собрана новая схема генератора слабых колебаний (автодин) на основе маломощных дифференциальных усилителей, что обеспечило его стабильную работу и хорошее подавление синфазных помех [16]. Реализованные в схеме автодина новые конструкторские решения позволили перестраивать частоты $f_{ЯМР}$ более чем на порядок, что дало возможность регистрировать одним и тем же устройством ЯМР-сигналы как от протонов, так и от других ядер, имеющих магнитный момент [16]. Новое устройство обработки и управления 10 разработано и реализовано на основе микроконтроллера STM32 L100RCT6 с 32-битным ядром Cortex-M3, Flash 256 кБ, RAM 16 кБ в корпусе LQFP64 (ST Microelectronics, США). Это позволило управлять уровнем генерации автодинного детектора, амплитудой и частотой поля модуляции постоянно магнитного поля H_a магнита-анализатора для обеспечения оптимальных условий регистрации ЯМР-сигнала (максимальное отношение сигнал—шум). Для визуального наблюдения регистрируемых ЯМР-сигналов к выходу автодина подключен осциллограф 11.

На рис. 2 представлены зарегистрированные ЯМР-сигналы от водопроводной воды при $T = 16,4$ °С с максимальным сигналом инверсии $\varphi_n = 180^\circ$ (1) и $\varphi_n = 0$ (2). Угол поворота φ_n вектора намагниченности M в катушке нутации 6 задаётся частотой и амплитудой H_1 радиочастотного поля, создаваемого в ней генератором [3—6, 14]. В случае $\varphi_n = 90^\circ = 270^\circ$ компоненты вектора намагниченности $M_z = M_x = M_y = 0$, поэтому амплитуда ЯМР-сигнала в регистрирующем устройстве будет равна нулю. Остальные значения угла φ_n определяют по линии нутации — зависимость амплитуды регистрируемого ЯМР-сигнала от частоты f_n генератора [6].

Форму линии затухающих гармонических колебаний регистрируемого ЯМР-сигнала (см. рис. 2) при однократном прохождении через резонанс можно аппроксимировать следующей зависимостью [3—5, 13—16]:

$$U_c(t) = U_0 \exp(-t/T_2^*) \cos(at^2/2);$$

$$a = \gamma \frac{dH_z}{dt} = d \left(\frac{\Delta\omega}{dt} \right),$$

где U_0 — максимальная амплитуда регистрируемого ЯМР-сигнала; a — скорость изменений расстройки $\Delta\omega$ магнитного поля; T_2^* — эффективное время поперечной релаксации.

Время T_2^* можно вычислить по спаду огибающей, построенной по вершинам пиков затухающих гармонических колебаний [3—5, 13—16]. Время T_2 исследуемой среды определяется по формуле [4, 5, 14]:

$$1/T_2^* = 1/T_2 + (\gamma\Delta H/\pi),$$

где ΔH — неоднородность магнитного поля в зоне размещения катушки регистрации ЯМР-сигнала.

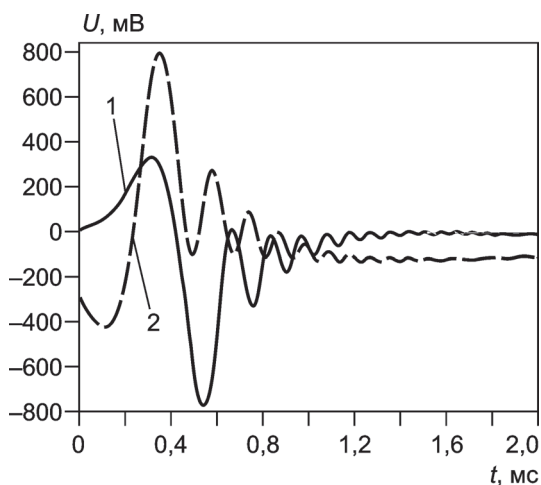


Рис. 2. Вид ЯМР-сигнала от воды на выходе устройства регистрации при $T = 16,4$ °С, $f_{мод} = 50$ Гц с инверсией намагниченности $f_n = 37280$ Гц при $H_1 = 15,2$ А/м (1) и $H_1 = 0$ (2)

Для измерений времени продольной релаксации T_1 текущей среды в разработанном лабораторном макете ЯМР-спектрометра реализована методика на основе метода Джулотто [5, 14]. Данный метод успешно применяется в спектрометрах высокого разрешения при исследовании конденсированных сред в стационарном состоянии. Более низкая погрешность измерений T_1 (по сравнению с другими методами, реализованными в ЯМР-измерителях) обусловлена тем, что для определения T_1 используют только измерения частот [17]:

$$T_1 = (\tau_2 - \tau_1) / \ln \left\{ \frac{[(f_0 - f_1)(f_0 - f_2)]}{[(f_0 + f_1)(f_0 + f_2)]} \right\},$$

где f_1, f_2 — частоты регистрации ЯМР-сигнала, соответствующие его максимальной амплитуде при двух различных частотах модуляции или τ (τ — время между двумя последовательными прохождением через резонанс магнитного поля анализатора); $f_0 = \gamma H_a$.

Отношение сигнал—шум регистрируемого ЯМР-сигнала (см. рис. 2) значительно выше 5, количество пиков затухающих гармонических колебаний также больше 5, что позволяет проводить измерения T_2 с погрешностью, не превышающей 0,5 % [3—5, 13—16]. Дополнительное использование ЯМР-сигнала с инверсией намагниченности (более чувствительного к изменениям, чем ЯМР-сигнал с $\phi_n = 0$) позволяет подтвердить сделанные измерения и точнее определить погрешность измерений, а в случае измерений T_1 — подтвердить частоту настройки на резонанс по максимальной амплитуде регистрируемого ЯМР-сигнала, которая не должна изменяться при регистрации сигнала с инверсией намагниченности. Дополнительное использование ЯМР-сигнала с инверсией намагниченности при определении T_1, T_2 будет существенно для подтверждения настройки на резонанс в случае регистрации ЯМР-сигналов от ядер с более низкой чувствительностью к ЯМР-методу, чем у протонов (отношение сигнал—шум значительно ниже рассмотренного, например, 1,7). Для данных ядер настройка частоты регистрации на резонанс по максимуму ЯМР-сигнала с инверсией намагниченности при измерении T_1, T_2 определяющая. Это особенность метода ЯМР-спектроскопии в текущей жидкости по сравнению с традиционной методикой.

Сравнив измеренные и табличные значения T_1, T_2 ; можно определить температуру текущей жидкости T , а используя калибровочные графики скорости релаксации ϕ_p от pH для исследуемых жидких сред — кислотность среды. Скорость релаксации ϕ_p получают по измеренным значениям T_1, T_2 [12, 14].

Проведённые автором экспериментальные исследования изменений ϕ_p от концентрации парамагнитных ионов N в текущей жидкости демонстрируют линейную зависимость ϕ_p от N . Отмеченная особенность позволяет определять с помощью ЯМР-спектрометра изменения концентрации в текущей многокомпонентной среде при добавлении в неё одного из компонентов.

Степень влияния концентрации парамагнитного иона N на времена продольной и поперечной релаксации T_1, T_2 в растворе жидкой среды описывают уравнения [13, 14, 16]:

$$1/T_1 = K_{\alpha 1} N; \quad 1/T_2 = K_{\alpha 2} N,$$

где $K_{\alpha 1}, K_{\alpha 2}$ — коэффициенты релаксационной эффективности (КРЭ) парамагнитного иона; N — его молярная концентрация.

Независимо от присутствия других парамагнитных частиц каждая частица, обладающая магнитным моментом, создаёт вокруг себя локальное магнитное поле. Это поле влияет на скорость релаксации протонов, ускоряя релаксационные процессы. В этом случае время релаксации равно сумме времён на каждом типе парамагнитных частиц и справедливо следующее соотношение [13, 14, 16]:

$$1/T_1 = \sum_0^M K_{\alpha 1(m)} N_{(m)}; \quad 1/T_2 = \sum_0^M K_{\alpha 2(m)} N_{(m)}, \quad (2)$$

где $K_{\alpha 1(m)}, K_{\alpha 2(m)}$ — КРЭ m -й комплексной частицы; N_m — равновесные молярные концентрации различных комплексных форм, входящих в состав исследуемой среды.

В большинстве медицинских суспензий для систем искусственного жизнеобеспечения человека доминируют только две комплексные формы, часть биологических растворов также содержит только две формы. Это позволяет, измеряя константы релаксации в текущей жидкости ЯМР-спектрометром и зная КРЭ, вычислять концентрации комплексных форм. Такая информация особенно актуальна при изменении состава суспензии добавлением одного из компонентов во время проведения курса лечения.

Результаты экспериментальных исследований. Проведённые автором исследования подтверждают возможность

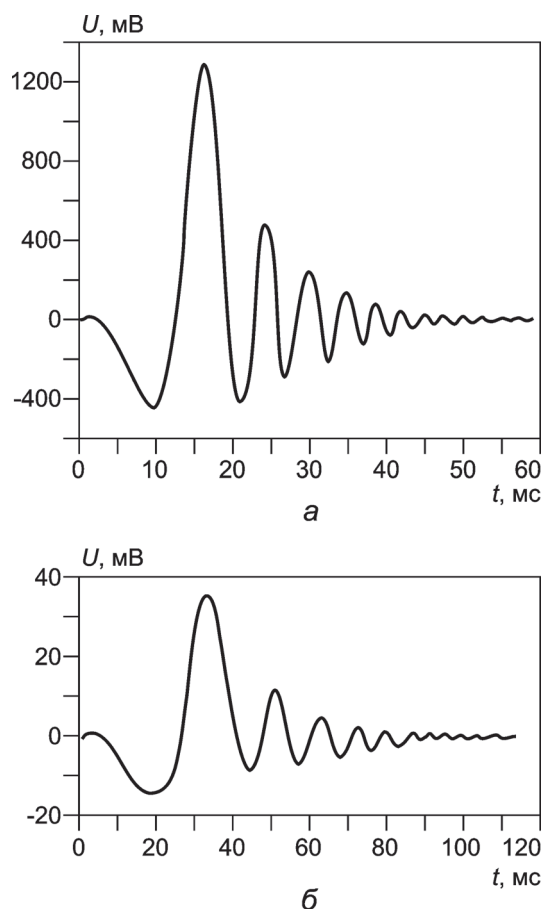


Рис. 3. Вид ЯМР-сигналов от соляной кислоты на выходе устройства регистрации при $T = 18,6^\circ \text{C}$, $f_{\text{мод}} = 10 \text{ Гц}$ при регистрации сигналов на частоте $f_{\text{ЯМР}}$ от протонов (а); ядер хлора (б)

регистрации ЯМР-сигнала от ядер фтора, фосфора, лития, бора, натрия, хлора (гиромагнитные отношения 40,106214; 17,253987; 16,561322; 13,675834; 11,277214; 4,192008 МГц/Тл, соответственно), а также ртути ($\gamma = 7,740854$ МГц/Тл).

На рис. 3 представлены зарегистрированные ЯМР-сигналы от протонов и ядер хлора соляной кислоты HCl при комнатной температуре $T = 18,3$ °С. На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующий вывод: амплитуда регистрируемого ЯМР-сигнала зависит от относительной чувствительности ядер к методу ЯМР, а также от количества ядер N в объеме катушки регистрации V_k , от которых регистрируют сигнал. Из рис. 3 следует возможность регистрации ЯМР-сигнала от ядер хлора с наименьшим гиромагнитным отношением γ и чувствительностью к методу ЯМР по сравнению с другими рассмотренными ядрами. Низкое значение чувствительности ядер хлора удалось компенсировать достаточно большими магнитными полями магнитов поляризатора и анализатора. Это позволило получить при регистрации ЯМР-сигнала отношение сигнал—шум больше 3, что обеспечивает погрешность измерений не меньше 0,5 % [3—5, 13]. Ранее в экспериментальной установке с магнитом-поляризатором с $B_p = 0,47$ Т и магнитом-анализатором с $B_a = 0,18$ Тл ЯМР-сигнал от ядер хлора регистрировали на уровне шумов, что позволяет, перестроив частоту $f_{\text{ЯМР}}$ по отмеченным выше ядрам, определить их наличие в жидкости (регистрировать спектр), при условии, что концентрации данных ядер в жидкости дают возможность регистрировать ЯМР-сигнал с отношением сигнал—шум не меньше 1,5 и автоматически подстраивать как $f_{\text{ЯМР}}$, так и параметры полей генерации автодина модуляции H_a . При исследовании в ЯМР-спектрометрах сред, находящихся в стационарном состоянии, требования к N значительно ниже. Это связано с тем, что при регистрации ЯМР-сигналов используется поле с индукцией не менее 7 Тл, а также схемы с большим числом накоплений (от 1000 до 1000000 в зависимости от решаемых задач при исследовании). Использование такого числа накоплений, которое может увеличить, в случае необходимости, отношение сигнал—шум в 1000 раз, возможно потому, что t_k не имеет жестких ограничений, как при исследовании текущих потоков.

В соответствии с ранее рассмотренными методиками и с помощью лабораторного макета ЯМР-спектрометра (см. рис. 1) в текущем потоке были измерены константы релаксации T_1 , T_2 различных сред. Результаты измерений T_1 , T_2 растворов, приготовленных смешиванием водопроводной воды и хлорида железа (III) в различных концентрациях при температуре $T = 17,4$ °С, представлены в таблице.

Циклы измерений констант релаксации T_1 , T_2 с настройкой на резонанс повторяли 20 раз в устройстве регистрации и катушке нутации при определении ЯМР-сигнала с инверсией намагниченности, после чего определяли среднее значение, стандартное отклонение и погрешность измерений с достоверностью 95 %. Погрешность измерений T_1 , T_2 не превышает 0,5 %. Представленные в таблице значения T_1 , T_2 , полученные при исследованиях на стационарном ЯМР-релаксометре, подтверждают обоснованность предлагаемых автором методик.

В соответствии с (2) по измеренным константам T_1 , T_2 на лабораторном макете ЯМР-спектрометра были вычислены концентрации компонент данных растворов. Полученные значения полностью совпали с теми, которые использовали при приготовлении растворов.

Новая разработанная схема регистрации ЯМР-сигнала позволила определять в лабораторном макете ЯМР-спектрометра по изменению формы регистрируемого ЯМР-сигнала режим течения жидкой среды, а также переход от одного режима к другому (с ламинарного на турбулентный). Кроме того, разработанное устройство обработки и управления позволило определять расход q , при котором происходит изменение режима течения, с погрешностью не выше 1 %.

Зарегистрированный от водопроводной воды при $T=19,5$ °С ЯМР-сигнал при расходе воды $q = 0,22 \pm 0,01$ мл/с представляет гармоническое затухающее во времени колебание и соответствует турбулентному режиму течения в соединительных трубопроводах. Однако при увеличении расхода до $q = 0,42 \pm 0,02$ мл/с его форма искажается, режим течения жидкости в сосуде-анализаторе становится турбулентным. Измеренное значение q совпадает с расчетным ($q_p = 0,44$ мл/с).

Закключение. Проведенные исследования показали, что разработанная конструкция лабораторного макета ЯМР-спектрометра позволяет увеличить функциональные возможности

устройства при исследовании им потоков жидких сред.

Особый интерес представляют исследования потока жидкой среды с регистрацией ЯМР-сигналов по всем ядрам с магнитными моментами, которые присутствуют в текущей среде (регистрация спектра). Такой режим работы ЯМР-спектрометра позволит проводить более сложные

Времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации воды и её смесей с хлоридом железа (III) в различных пропорциях

Среда	Лабораторный макет ЯМР-спектрометра с текущей средой		Ядерно-магнитный стационарный релаксометр Minispec mq 20	
	T_1 , с	T_2 , мкс	T_1 , с	T_2 , мкс
Вода	1,678±0,014	561,72±3,93	1,6633±0,0033	558,13±1,11
Раствор воды с хлоридом железа (III) в пропорции между компонентами 80:20 %	1,127±0,009	823,05±5,76	1,1176±0,0022	819,62±1,64
Раствор воды с хлоридом железа (III) в пропорции между компонентами 66,66:33,33 %	1,017±0,008	908,64±6,37	1,0086±0,0021	904,51±1,81
Раствор воды с хлоридом железа (III) в пропорции между компонентами 50:50 %	0,833±0,007	1094,34±7,66	0,8248±0,0017	1089,27±2,19

исследования текущих потоков жидких сред. Однако многие ядра с магнитными моментами, которые активно используют при исследованиях в стационарных ЯМР-спектрометрах (особенно углерод — ^{13}C и азот— ^{15}N), обладают очень низкой чувствительностью к методу ЯМР несмотря на то, что их γ сравнимы с гиромагнитными отношениями ядер хлора или натрия. Для решения этой задачи автор планирует изготовить магнит-поляризатор с индукцией более 2 Тл и неоднородностью не меньше 10^{-2} см^{-1} и магнит-анализатор с индукцией не меньше 0,8 Тл и неоднородностью не меньше 10^{-4} см^{-1} , а также реализовать, подбирая оптимальное соотношение между частотой и амплитудой поля модуляции постоянного магнитного поля анализатора и значением расхода q (по максимуму амплитуды регистрируемого ЯМР-сигнала), схему накопления ЯМР-сигнала (не менее 1000 накоплений). Решению этой сложной задачи будут посвящены дальнейшие исследования автора.

Л и т е р а т у р а

1. Пушнов А. В. Измерение расхода двухфазного потока кориолисовым расходомером // Измерительная техника. 2013. № 4. С. 45—48.
2. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Магнитный расходомер жидких металлов // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 24—28.
3. Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Yu. Fiber — Optic Imitator of Accident Situation for Verification of Work of Control Systems of Atomic Energy Plants on Ships. // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2014. V. 23. N. 3. P. 173—176.
4. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Повышение точности измерения констант релаксации текущей жидкости в ядерно-магнитном спектрометре // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 10. С. 64—68.
5. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Малогабаритный ядерно-магнитный релаксометр для экспресс-контроля состояния жидких и вязких сред // Измерительная техника. 2014. № 8. С. 44—48.
6. 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.
7. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Электромагнитный метод измерения расхода и уровня жидкости в безнапорных трубопроводах // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 45—50.
8. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Управление контуром линии нутации в ядерно-магнитных расходомерах // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 2. С. 8—13.
9. Броненко М. П., Гуляев И. П., Гуляев П. Ю., Серегин А. Е. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3—2. С. 70—73.
10. Проскурин С. Г., Потлов А. Ю., Фролов С. В. Доплеровское картирование знакопеременного потока со сложной структурой с помощью оптической когерентной томографии // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 11. С. 1022—1028.
11. Алексеева К. Г., Борзенко Е. И. Структура течения жидкости Шведова-Бингама в канале со скачком сечения // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 7—2. С. 15—19.
12. Попель А. А. Магнито-релаксационный метод анализа неорганических веществ. М.: Химия, 1978.
13. Галичина А. А., Карсеев А. Ю., Давыдов В. В., Дудкин В. И. Использование топливных нефтяных эмульсий в энергетических установках предприятий // Наука и образование. № 2 (171). 2013. С. 243—247.
14. Леше А. Ядерная индукция. М.: Иностранная литература, 1963.
15. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Величко Е. Н., Карсеев А. Ю. Нутационный ядерно-магнитный тесламетр для измерения слабых магнитных полей // Метрология. 2014. № 5. С. 32—41.
16. Давыдов В. В., Величко Е. Н., Карсеев А. Ю. Ядерно-магнитный минирелаксометр для контроля состояния жидких и вязких сред // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 1. С. 115—121.
17. 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.

Дата принятия: 09.11.2015.