

Мультифазный ядерно-магнитный расходомер-релаксометр для контроля состояния и быстроизменяющихся расходов нефтяных смесей

Вадим Владимирович Давыдов^{1✉}, Никита Сергеевич Мязин², Роман Вадимович Давыдов³

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, р. п. Большие Вяземы, Московская обл., Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

¹davydov_vadim66@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9530-4805>

²myazin.n@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9423-9068>

³romanvproze@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1958-4221>

Аннотация. Обоснована необходимость улучшения первичной очистки (сепарации) нефти в условиях буровой станции или морской платформы и описаны возникающие при этом проблемы. Определены условия повышения эффективности первичной очистки нефтяной смеси. Для измерения расхода и контроля состояния нефтяной смеси, поступающей из скважины, рассмотрены возможности использования оптических приборов и расходомеров различных конструкций, в частности, ядерно-магнитных расходомеров-релаксометров. Описана конструкция промышленного ядерно-магнитного расходомера-релаксометра M-Phase 5000, который применяется для контроля расхода и качества нефти и нефтепродуктов, и установлены проблемы, не позволяющие его использовать в условиях буровой установки или морской платформы. Разработана конструкция ядерно-магнитного расходомера-релаксометра, в которой реализованы различные модуляционные методики для измерения расхода и времён продольной и поперечной релаксаций нефтяной смеси. Использование этих методик и предложенных технических решений позволяет применять данный прибор на буровой станции и морской платформе. Представлены результаты исследований различных сред разработанным прибором.

Ключевые слова: нефтяная смесь, поток, расход, состояние среды, примеси, очистка, трубопровод, ядерный магнитный резонанс, время продольной релаксации, время поперечной релаксации, отношение сигнал/шум, погрешность измерения

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90012.

Для цитирования: Давыдов В. В., Мязин Н. С., Давыдов Р. В. Мультифазный ядерно-магнитный расходомер-релаксометр для контроля состояния и быстроизменяющихся расходов нефти и её смесей // Измерительная техника. 2022. № 6. С. 52–59. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-6-52-59>

Multiphase nuclear-magnetic flowmeter-relaxometer for control of condition and rapidly changing expenditures of oil mixtures

Vadim V. Davydov^{1✉}, Nikita S. Myazin², Roman V. Davydov³

^{1, 2, 3} Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

¹ All Russian Research Institute of Phytopathology, Bolshye Vyazyomy, Moscow Region, Russia

² The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunication, St. Petersburg, Russia

¹davydov_vadim66@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9530-4805>

²myazin.n@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9423-9068>

³romanvproze@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1958-4221>

Abstract. The necessity of improving the primary purification of oil in the conditions of a drilling station or an offshore platform is substantiated. The problems that arise in these situations are noted. One of the conditions for increasing the efficiency of the primary treatment (separation) of an oil mixture. The possibilities of using different designs of flowmeters to measure the flow rate q of the oil mixture coming from the well and various devices for monitoring its condition are considered. The analysis of designs of nuclear-magnetic flowmeters-relaxometers is carried out. The design of the industrial nuclear magnetic flowmeter-relaxometer M-Phase 5000, which is used to control the flow and quality of oil and oil products, is considered in detail. Problems have been identified that do not allow the use of a nuclear magnetic flowmeter - the M-Phase 5000 relaxometer in a drilling rig or offshore platform. A new design of a nuclear magnetic flowmeter-relaxometer has been developed, in which modulation methods for measuring q , T_1 and T_2 are implemented. The use of these techniques and various technical solutions makes it possible to use this device at a drilling station or offshore platform. The results of studies of various media are presented.

Keywords: oil mixture, stream, expenditure, medium state, impurities, cleaning, pipeline, nuclear magnetic resonance, longitudinal T_1 and transverse T_2 relaxation times, signal-to-noise ratio, measurement error

Financial Support: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of research project no. 20-32-90012.

Введение. Нефть в настоящее время остаётся одним из основных источников энергии для различных объектов – автотранспорта, самолётов, вертолёт, морских судов и т. д. [1, 2]. Мобильные дизельные электрические станции и генераторы используются для решения множества задач [3]. Указанные выше обстоятельства и другие факторы делают нефть стратегическим сырьём. Потребление нефти в мире постоянно увеличивается, а её запасы на легкодоступных месторождениях постепенно уменьшаются. Нефтяные компании вынуждены разрабатывать месторождения в сложных условиях (например, в северных регионах или на морском шельфе с использованием буровых платформ) [4]. Кроме того, увеличивается глубина залегания пласта, из которого добывается нефть. Это приводит к тому, что в добываемой нефти увеличивается количество примесей и их процентное содержание, так как в условиях добычи нефти с большой глубины в пласт закачиваются огромные объёмы воды под высоким давлением и происходит разрушение пород.

Все перечисленные обстоятельства увеличивают расходы на добычу нефти и её первичную обработку. Поэтому крайне актуально уменьшение затрат на добычу и переработку нефти. Задача уменьшения затрат состоит из многочисленных локальных задач, связанных между собой. К одной из таких локальных задач относится первичная обработка нефти на буровой станции или платформе (сепарация – очистка нефти от воды, попутного газа, включая кислород, нерастворимых примесей и пр.). Данная операция в дальнейшем определяет качество и себестоимость источника топлива или другой углеводородной продукции, которая производится из нефти [5–7]. Процесс очистки нефти должен происходить в автоматическом (непрерывном) режиме. Необходимо отметить, что во время добычи нефти концентрация воды, попутного газа и различных твердых примесей в её потоке постоянно изменяется.

Для обеспечения высокой эффективности процесса первичной сепарации нефти кроме данных о расходе (или скорости) нефтяного потока, необходима информация о концентрации в ней воды, попутного газа и различных примесей [8, 9]. Вся эта информация должна поступать в реальном времени в систему управления для автоматической подстройки работы сепараторов. Поэтому актуально создание приборов для контроля состояния и быстроизменяющихся параметров нефти и её смесей.

Эффективность первичной очистки нефти обуславливает дальнейшую подготовку нефти для транспортировки по трубопроводу или загрузки в танкер. Если результаты контрольных измерений параметров нефти не соответствуют отраслевым стандартам, то требуется повторная очистка (дополнительные средства и время), а операции очистки танкера от грязи, водных эмульсий и прочих примесей являются очень дорогостоящими. При быстрой дополнительной сепарации нефтяного потока перед загрузкой в танкер или закачиванием в магистральный трубопровод не всегда обеспечиваются необходимые требования к качеству нефти после неэффективной первой очистки.

Цель работы – разработка мультифазного ядерно-магнитного (ЯМР) расходомера-релаксометра для контроля

состояния и быстроизменяющихся расходов нефти и её смесей с использованием модуляционных методик измерения времён продольной и поперечной релаксаций нефтяной смеси.

Обзор приборов для измерения и контроля параметров нефти и её смесей. Параметры нефтяных потоков с примесями, поступающих для первичной обработки из скважины, предпочтительнее измерять бесконтактными приборами [10–15]. В случае контроля нефтяных потоков электромагнитными или ультразвуковыми расходомерами, спектрофотометрами и рефрактометрами, а также промышленными ЯМР-расходомерами-релаксометрами возникают сложности. Например, на данной стадии технологического цикла невозможно применять ультразвуковые расходомеры, поскольку нефтяной поток содержит воздух. Существуют определённые проблемы и при использовании электромагнитных расходомеров. В этих приборах для измерения расхода q служит градуировочная зависимость, получаемая на предприятии-изготовителе [11, 12, 16, 17]:

$$q = \pi DE / (4Bk), \quad (1)$$

где E – разность потенциалов, возникающая при взаимодействии движущейся электропроводной жидкости с магнитным полем; D – расстояние между концами электродов (совпадает с внутренним диаметром трубопровода расходомера, изготовленного из немагнитного материала); B – индукция магнитного поля; k – поправочный коэффициент, который зависит от температуры T и состава жидкой среды (устанавливается на предприятии при калибровке прибора).

На предприятии-изготовителе при тестировании электромагнитных расходомеров применяют стандартные модельные растворы или «чистую» нефть и не используют нефтяные среды, которые поступают из скважины для первичной обработки. Первая проблема связана с отсутствием точной информации о количестве воды, газов и различных примесей, содержащихся в нефти из скважины, поэтому берут среднее значение k (с учётом сорта нефти). Это приводит к увеличению погрешности измерения q минимум на 1 % дополнительно к той, которая уже заложена в конструкцию расходомера (0,6–0,8 %). Вторая проблема заключается в следующем. Для увеличения срока эксплуатации электромагнитных расходомеров на электроды наносят различные покрытия [16, 17], которые не позволяют применять эти приборы для измерения расходов жидких сред с ионной проводимостью. Электромагнитными расходомерами можно измерять расход жидких сред с электронной проводимостью, например, воды или углеводородов [11, 16, 17]. Появление в текущем нефтяном потоке примесей с ионной проводимостью приводит к уменьшению измеряемого значения E . В соответствии с (1) уменьшается значение q (в реальности расход нефтяного потока в трубопроводе не изменяется). В систему управления сепаратором поступает недостоверная информация о значении q , и уменьшается эффективность очистки нефтяной смеси. Если в нефтяном потоке содержится воздух или примеси с низкой электронной проводимостью,

то значение E также уменьшается и, соответственно, уменьшается значение q , определяемое по формуле (1). Автоматическая система сепаратора перестраивается под новое недостоверное значение расхода. Электронная проводимость воды в нефтяном потоке выше, чем проводимость нефти, это приводит к увеличению значений E и q . В систему управления сепаратором также поступает недостоверная информация о значении q , что влияет на эффективность очистки нефтяной смеси. Проведённые авторами настоящей статьи измерения параметров нефтяных смесей из различных скважин с применением электромагнитного расходомера показали, что погрешность измерения q при тех концентрациях воды, примесей и воздуха (искусственно закачанного в смесь) дополнительно увеличивает погрешность измерения q минимум на 1,5 %, а в большинстве случаев более чем на 2 %. Кроме того, при этом для определения воды, воздуха и различных примесей в таких нефтяных потоках необходимо применять другие измерительные приборы (в основном оптические). При большом числе нерастворённых примесей в нефтяном потоке погрешность определения количества воды оптическим методом может превышать 15–20 %.

Различные мультифазные расходомеры, например, Roxar MPFM 2600 (Emerson SRL, Румыния) или системы измерительные параметров нефте-водо-газового потока VARPRO-УЛЬТРАФЛОУ (ООО «ИНДУСТРИАЛЬНАЯ КОМПАНИЯ», Россия) в настоящей статье не рассматривались в связи с высокой (более $\pm 2,5$ % в зависимости от количества воды, газов и примесей в нефтяном потоке) погрешностью измерения.

Особый интерес представляет использование в технологическом процессе очистки нефти ЯМР-расходомеров-релаксметров [15, 17–21]. В этих приборах полностью исключён контакт измерительных элементов с текущей средой [17–21]. В настоящее время существует только одна промышленная конструкция ЯМР-расходомера-релаксметра M-Phase 5000 (KROHNE, Германия) [22–24] и большое число лабораторных макетов этих приборов [17–21, 25] для измерения расходов нефти, углеводородов, воды, кислот, а также контроля их состояния. Для «чистой» нефти, протекающей в трубопроводах диаметрами 100–200 мм при изменении температуры от 293 до 308 К, диапазон измерения расхода промышленным расходомером M-Phase 5000 составляет 2–20 м³/ч [22, 23]. Погрешность измерения расхода составляет порядка 2 %, погрешность измерения времён продольной T_1 и поперечной T_2 релаксаций – порядка 1,5 %. По значениям T_1 и T_2 определяется состояние текущей среды. Для магистрального трубопровода диаметром 200 мм диапазон измеряемой скорости течения нефти ЯМР-расходомером-релаксметром находится в пределах 17,7–176,9 мм/с. Длина конструкции ЯМР-расходомера-релаксметра M-Phase 5000 составляет более 3,6 м, масса прибора превышает 1150 кг.

В трубопроводах для первичной обработки на буровой или морской платформах скорость протекания нефтяной смеси составляет 100–800 мм/с. Диаметр трубопровода изменяется от 50 до 100 мм. Эти обстоятельства, а также использование импульсной методики для измерения расхода

и времён релаксации, при которой для обеспечения погрешности измерений менее 2 % необходимое отношение сигнал/шум S/N регистрируемого сигнала ЯМР должно составлять более 3 [17–21, 25, 26], может привести к значительному увеличению массогабаритных характеристик конструкции модели M-Phase 5000 (длины – до 16–17 м, массы – до 4000–4500 кг). Это создаст сложности связанные с размещением конструкции расходомера-релаксметра на буровой установке или морской платформе. Данные сложности можно преодолеть, однако существует ещё одно обстоятельство. Для формирования вынужденной прецессии магнитных моментов в намагниченной текущей среде при импульсной методике измерения с использованием импульса $\pi/2$ и последовательности из семи импульсов π при трубопроводе диаметром, например 200 мм, необходимо обеспечить в радиочастотной катушке токи порядка 10 А при напряжениях несколько киловольт (длительность импульсов 0,001 с при частоте заполнения 10 МГц). На буровой установке или морской платформе эксплуатация прибора часто осуществляется в условиях повышенной влажности. Работа с такими напряжениями и токами в данных условиях будет представлять большую опасность для людей. Возможные меры защиты прибора от влажности при таких токах и напряжениях вызывают большие сомнения в их практической эффективности и реалистичности. Скорее всего именно это является основной причиной, по которой ЯМР-расходомер-релаксметр на основе модели M-Phase 5000 на стадии технологического цикла очистки нефтяной смеси в настоящее время не используется.

Поэтому создание новых моделей высокоточных ЯМР-расходомеров-релаксметров для решения описанной выше сложной задачи, а также для контроля расхода и состояния «чистой» нефти, углеводородов и продукции в виде жидкой среды из них является актуальной проблемой. В настоящей работе представлено одно из возможных её решений.

Конструкция ЯМР-расходомера-релаксметра для контроля параметров текущей среды. С учётом результатов различных исследований [15, 17–21, 25–28], а также данных об эксплуатации промышленного ЯМР-расходомера-релаксметра M-Phase 5000 [22–24] авторы настоящей статьи разработали конструкцию лабораторного макета ЯМР-расходомера-релаксметра. Его структурная схема в большинстве своем повторяет схему ЯМР-расходомера-релаксметра, которая подробно описана в [29], однако есть ряд принципиальных различий.

Участок трубопровода (сосуд-поляризатор), который расположен между полюсами магнита, изготовили в виде спирали (для увеличения времени нахождения жидкой среды под действием поля B_n поляризатора). Увеличили объём сосуда-поляризатора V_n для выполнения условия $t_n \geq 3T_1$, где t_n – время полной намагниченности текущей жидкости [15, 17–21, 25–29].

Если жидкая среда находится в магните-поляризаторе менее $t_n = V_n/q$, то она намагничивается не полностью [15, 17–21], из-за чего уменьшаются амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР и отношение S/N .

Для обеспечения максимального значения регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности использовали схему автоматической регулировки усиления, расположенную в устройстве обработки и управления, которая подстраивает амплитуду поля H_1 в катушке нутации под максимальное отношение S/N . В устройстве обработки и управления также размещается схема автоматической подстройки частоты, которая подстраивает частоту f_n генератора нутации под максимум S/N .

Для увеличения отношения S/N сосуд-анализатор изготовили в виде цилиндра диаметром 200 мм в зоне расположения катушки регистрации. При увеличении диаметра трубопровода в два раза можно снизить в четыре раза скорость протекания жидкости в катушке регистрации, что позволяет минимум в три раза уменьшить линейные размеры (длину полюсов) магнита-анализатора. Это крайне важно, так как для измерения q , T_1 , T_2 необходимо, чтобы время t_a нахождения текущей жидкости в магните-анализаторе, связанное с размерами полюсов магнита-анализатора и скоростью протекания жидкости, было не менее $2,5T_2$.

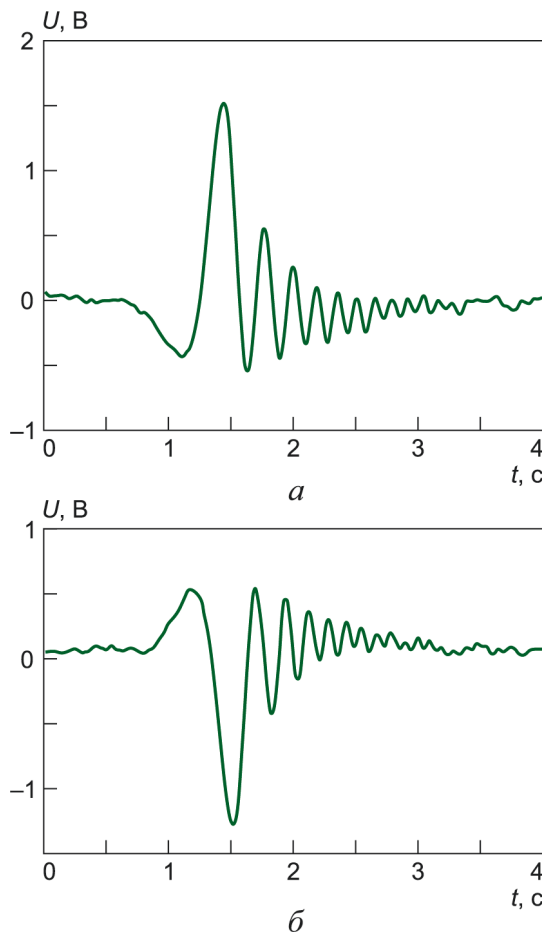


Рис. 1. Формы линий сигнала ЯМР от питательной воды на выходе схемы регистрации без инверсии $H_1=0$ (а) и с инверсией намагниченности при $f_n=1435106$ Гц, $H_1=14,3$ А/м (б)

Fig. 1. The shape of NMR signal lines at the output of registration circuit from feed water at $H_1=0$ (a) and with magnetization inversion at $f_n=1435106$ Hz, $H_1=14.3$ A/m (b)

Результаты экспериментальных исследований и принцип измерения времён релаксации T_1 , T_2 и расхода q жидкости. Для измерения расхода q и времён релаксации T_1 , T_2 авторы настоящей статьи исследовали движения вектора намагниченности M_n в катушке нутации разработанной конструкции и получили необходимую форму сигнала ЯМР. На рис. 1 представлены сигналы ЯМР (временные зависимости амплитуды U пиков) без инверсии и с инверсией намагниченности, зарегистрированные от питательной воды при 299,3 К. Питательная вода выбрана для экспериментов в качестве жидкой среды, потому что её времена релаксации T_1 , T_2 очень близки к значениям времён релаксации нефтяных смесей из скважин, например, на нефтяных месторождениях в районе городов Ухта и Новый Уренгой. В этих регионах России добыча осуществляется в очень сложных климатических условиях.

Форма сигнала ЯМР на рис. 1, а соответствует нулевому углу поворота вектора намагниченности M_n , а на рис. 1, б – углу $\varphi_n=180^\circ$. В случае $\varphi_n=90^\circ; 270^\circ$ компоненты вектора намагниченности $M_z=M_x=M_y=0$, поэтому в схеме регистрации амплитуда сигнала ЯМР $U_{ЯМР}=0$. Анализ полученных результатов показал, что регистрируемый сигнал ЯМР обладает высоким разрешением (более пяти затухающих пиков – «виглей»). Это позволило измерить значения времён T_1 , T_2 с погрешностью не более 1 % по следующим методикам. Для измерения времени поперечной релаксации T_2 применяли аппроксимацию по спаду свободной индукции – уменьшению амплитуды пиков регистрируемого сигнала ЯМР (рис. 2) – с использованием функции [30, 31]:

$$U(t)=U_0 \exp(-t/T_2^*) \cos(at^2/2); \quad a=\gamma \frac{dH_z}{dt} = d \frac{\Delta\omega}{dt},$$

где U_0 – максимальное значение амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР; T_2^* – эффективное время поперечной релаксации; a – скорость изменения расстройки магнитного

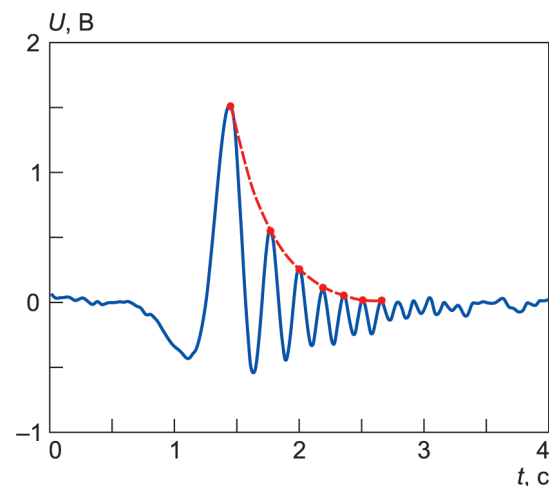


Рис. 2. Временная зависимость изменения амплитуды U регистрируемого сигнала ЯМР и аппроксимация (курсив) спада сигнала свободной индукции при однократном прохождении через резонанс

Fig. 2. The dependence of the change in the amplitude U of the registered NMR signal on time t and approximation (italic) of the decay of the free induction signal during a single passage through the resonance

поля; H_z – напряжённость магнитного поля в направлении z ; ω – частота сканирования магнитного поля.

В этом случае время поперечной релаксации текущей среды определяли из выражения [30, 31]:

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{\gamma \Delta B_a}{\pi}, \quad (2)$$

где ΔB_a – неоднородность магнитного поля в зоне размещения катушки регистрации сигнала ЯМР.

При малых значениях ΔB_a вкладом этого слагаемого в формулу (2) при определении времени T_2 можно пренебречь, тогда $T_2 \approx T_2^*$. С увеличением неоднородности ΔB_a магнитного поля число пиков в регистрируемом сигнале ЯМР (см. рис. 2) уменьшается. Возрастает погрешность определения T_2^* . Поэтому в трубопроводах больших диаметров целесообразно использовать разработанную конструкцию ЯМР-расходомера-релаксометра только в случае малых скоростей течения жидкости, когда можно уменьшить диаметр трубопровода в зоне регистрации сигнала ЯМР.

Время продольной релаксации T_1 измеряли ЯМР-расходомером-релаксометром при двух режимах модуляции поля B_a . Этот метод двух режимов модуляции успешно реализован в разработанных авторами настоящей статьи ЯМР-приборах для экспресс-контроля состояния конденсированных сред [32, 33].

Расход определяли по следующей методике. Регистрировали моменты прихода текущей жидкости с инверсией и без инверсии намагниченности (см. рис. 1) в катушку регистрации. Информацию о расходе представляли в виде прямоугольного импульса (меандра) длительностью $\tau_{пр}$, равной времени протекания жидкой среды от катушки нутации до катушки регистрации. Значение q в этом случае находили как $q = V_c / \tau_{пр}$, где V_c – объём соединительного участка трубопровода между катушками нутации и регистрации.

Погрешность Δq определения расхода в разработанной конструкции обусловлена стабильностью уровней срабатывания компараторов в схеме управления (погрешность менее 0,5 %) и погрешностью определения объёма V_c (при всех допустимых погрешностях измерений внутреннего диаметра трубопровода и расстояния между катушками нутации

и регистрации данная погрешность будет менее 0,3 %). С учётом деградации трубопровода в процессе эксплуатации прибора данная погрешность увеличится до 0,5 %. В итоге суммарная погрешность измерения расхода q может достичь 1 %, что полностью обеспечит эффективность сепарации.

В случае применения разработанного ЯМР-расходомера-релаксометра для контроля нефтяной смеси, в которой содержатся газ, вода и нерастворимые примеси, могут возникнуть проблемы с определением уровня срабатывания компаратора в полученном от текущей среды сигнале ЯМР с инверсией намагниченности. Это связано с тем, что амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности меньше по абсолютному значению, чем амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР без инверсии намагниченности (см. рис. 1). Инверсия намагниченности в текущей жидкости формируется в катушке нутации и зависит от значения q и от присутствия в текущей среде воды, газа и различных примесей. Указанные параметры могут быстро изменяться в потоке нефтяной смеси из скважины. Уровень срабатывания компаратора будет постоянно варьироваться. В какой-то момент, например при быстром изменении расхода, может наступить ситуация, когда инверсия намагниченности не реализуется (системы автоматической подстройки частоты и автоматического регулирования уровня не успеют подстроить частоту f_n и поле H_1 для получения инверсии). В катушке регистрации будет записан классический сигнал ЯМР для модуляционной методики (см. рис. 1, б). Измерения расхода будут прекращены. Автоматическое управление в приборе не сможет восстановить измерение q без операции выключения, и управление технологическим процессом очистки нефтяной смеси будет нарушено. Чтобы исключить этот случай в разработанной конструкции прибора использовали дополнительную модуляцию поля B_0 , в котором формируется инверсия намагниченности в текущей жидкости. Для этого между полюсами постоянного магнита размещали радиочастотные катушки. Проведённые эксперименты показали, что, изменяя частоту f_m и амплитуду B_m поля модуляции, можно регистрировать сигнал ЯМР с инверсией намагниченности на уровне шумов (рис. 3) в широком диапазоне изменения значения q . Тогда уровень срабатывания компараторов можно установить по половине амплитуды U регистрируемого сигнала ЯМР без инверсии намагниченности. Этот легко определяемый уровень одинаков для двух рассмотренных случаев срабатывания компараторов. В такой ситуации информация о расходе текущей среды q имеет вид меандра с периодом $T_{пр} = 2\tau_{пр}$. Значение q вычисляли как $q = 2V_c / T_{пр}$.

Фактически в приборе реализовано частотное измерение расхода, так как измеряется период меандра. В этом случае погрешность уровней срабатывания компараторов становится неактуальной. Появляется погрешность запаздывания, связанная с неравномерным распределением газа или примесей в нефтяной смеси, в которых нет магнитных моментов. В итоге в катушке регистрации в различные моменты времени регистрируются сигналы ЯМР, отличающиеся друг от друга по амплитуде. Это может внести в измерения q дополнительную погрешность не более чем 0,3 %.

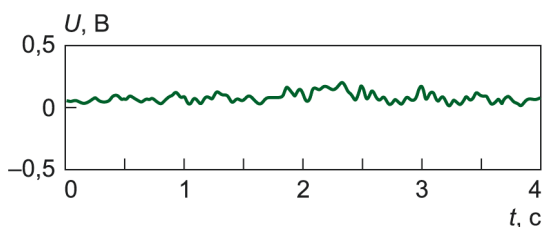


Рис. 3. Форма линии сигнала ЯМР с инверсией намагниченности, полученного от питательной воды на выходе схемы регистрации при $f_n = 1441278$ Гц, $H_1 = 14,7$ А/м, $H_m = 31,1$ А/м, $f_m = 3127$ Гц

Fig. 3. The shape of NMR signal lines at the output of registration circuit from feed water with inversion of magnetization at $f_n = 1441278$ Hz, $H_1 = 14.7$ A/m, $H_m = 31.1$ A/m, $f_m = 3127$ Hz

Таблица 1

Результаты измерения расхода q , м³/ч, жидкой смеси из питательной воды с пузырями воздуха и нерастворимыми частицами при температуре $T=324,6$ К

n_i	ЯМР-расходомер-релаксометр	OPTIFLUX 4030	Мерный объем
1	2,826±0,027	2,799±0,027	2,811±0,071
2	3,754±0,036	3,725±0,036	3,738±0,094
3	5,672±0,056	5,628±0,056	5,651±0,141
4	8,936±0,089	8,847±0,087	8,903±0,222
5	10,427±0,103	10,301±0,101	10,362±0,258
6	12,137±0,117	11,990±0,117	12,064±0,315
7	14,572±0,142	14,398±0,142	14,487±0,362
8	16,843±0,165	16,627±0,165	16,734±0,417
9	18,528±0,183	18,272±0,183	18,402±0,460
10	20,016±0,196	19,726±0,196	19,877±0,496
11	21,526±0,213	21,198±0,204	21,373±0,534
12	23,021±0,228	22,556±0,212	22,754±0,568

Таблица 2

Времена релаксации T_1 , T_2 жидкой смеси из питательной воды с пузырями воздуха и нерастворимыми частицами

T , К	ЯМР-расходомер-релаксометр		Minispec mq 20M	
	T_1 , с	T_2 , с	T_1 , с	T_2 , с
284,2	1,231±0,011	0,695±0,006	1,227±0,004	0,689±0,002
299,6	1,289±0,011	0,731±0,007	1,280±0,004	0,726±0,002
303,5	1,320±0,012	0,748±0,007	1,311±0,004	0,741±0,002
315,3	1,416±0,013	0,827±0,008	1,406±0,005	0,819±0,003
322,7	1,509±0,014	0,899±0,008	1,498±0,005	0,886±0,003
334,4	1,677±0,015	0,938±0,008	1,662±0,005	0,928±0,003
339,2	1,848±0,017	0,951±0,009	1,834±0,006	0,942±0,003
343,1	2,007±0,018	1,089±0,010	1,990±0,006	1,078±0,003
349,5	2,279±0,020	1,252±0,011	2,261±0,007	1,239±0,004

Для проверки достоверности разработанного метода измерения q использовали жидкую смесь из питательной воды с пузырями воздуха и нерастворимыми частицами (с ионной (полимер) и электронной (битум) проводимостью) и сравнили результаты измерений её расхода разработанным прибором и электромагнитным расходомером OPTIFLUX 4030 (KROHNE, Германия). Этот прибор предназначен для измерения расхода нефти в различных ситуациях. Погрешность измерения OPTIFLUX 4030 на начальном этапе его эксплуатации для чистых жидкостей составляет ±0,5 %. В процессе эксплуатации прибора, а также в случае загрязнения текущей жидкости различными примесями погрешность измерения увеличивается. Для проверяемой жидкой смеси погрешность измерения расхода Δq электромагнитного расходомера OPTIFLUX 4030 в лабораторных условиях будет менее 0,8 %. Дополнительно для контроля расхода жидкой смеси использовали мерный объем. В течение 10 с выполняли 10 измерений объемного расхода жидкой смеси. Вычисляли средний расход и погрешность измерения. Результаты сравнения измеренных

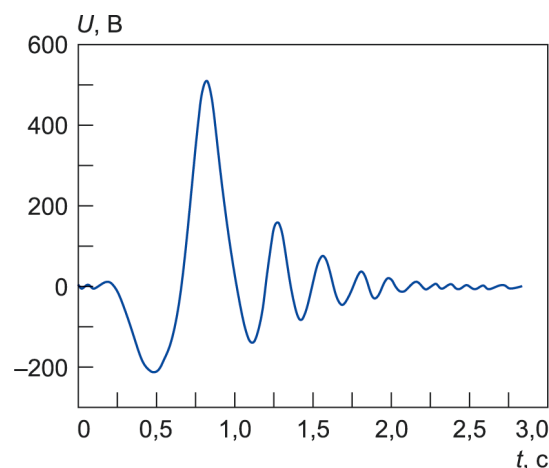


Рис. 4. Временная зависимость изменения амплитуды U регистрируемого сигнала ЯМР при $T=298,4$ К

Fig. 4. Dependence of the change in the amplitude U of the registered NMR signal on time t at $T=298,4$ K

расходов двумя приборами и мерным объемом представлены в табл. 1, где n_i — номер измерения. При расходах $q > 23,07$ м³/ч измерения прекращали по причине достижения циркулярным насосом предельной мощности на экспериментальном стенде в сложных условиях эксплуатации (жидкая смесь с воздухом и примесями).

Результаты измерений расхода q двумя приборами совпали в пределах погрешности измерения, а их сравнение с результатами измерений мерным объемом подтвердило достоверность данных результатов.

В процессе исследования также установили, что изменение температуры текущей смеси в пределах $T=20...25$ К незначительно влияет на амплитуду $U_{\text{ЯМР}}$ регистрируемого сигнала ЯМР.

Также измерили времена релаксации T_1 , T_2 описанной выше жидкой смеси при различных температурах разработанным ЯМР-расходомером-релаксометром и сравнили их с результатами измерений промышленным ЯМР-релаксометром Minispec mq 20M (BRUKER, Германия) (табл. 2).

Температуры нефтяных смесей, которые поступают из скважин различных месторождений на первичную обработку, различаются на несколько десятков градусов в зависимости от способа добычи нефти и других факторов. Поэтому времена T_1 , T_2 измеряли до температуры 349,5 К, максимально достижимой на экспериментальном стенде для прокачки жидких сред (возможности стенда ограничены температурой 351,1 К).

Согласно табл. 2 результаты измерений времён релаксации двумя приборами совпадают в пределах погрешности измерений. Погрешность измерения T_1 , T_2 промышленным релаксометром Minispec mq 20M составляет 0,3 %, она меньше погрешности разработанного ЯМР-расходомера-релаксометра, что ещё раз подтверждает обоснованность применения предложенных авторами настоящей статьи методов измерения значений T_1 , T_2 , реализованных в созданном приборе.

Процессы измерения q и T_1 , T_2 разработанным прибором не зависят от мутности и вязкости среды, что позволяет, например, осуществлять контроль указанных параметров различных сортов «чистой» нефти в трубопроводах малого диаметра (до 150 мм) или при небольшом расходе. На рис. 4 представлен зарегистрированный сигнал ЯМР от потока тяжёлого сорта нефти (Татнефть, Россия). Измеренные предложенным ЯМР-расходомером-релаксометром значения составили: $T_1=2,32\pm0,02$ с; $T_2=0,87\pm0,01$ с; $q=2,211\pm0,021$ м³/ч. С использованием промышленных релаксометра Minispec mq 20M и электромагнитного расходомера OPTIFLUX 4030 получили соответственно $T_1=2,318\pm0,07$ с; $T_2=0,868\pm0,03$ с и $q=2,210\pm0,019$ м³/ч. Результаты измерений q , T_1 и T_2 разработанного и промышленных приборов совпадают в пределах погрешности измерения.

Заключение. Полученные экспериментальные данные показывают надёжность работы разработанной конструкции ЯМР-расходомера-релаксометра для контроля расхода и состояния текущего потока нефтяной смеси. По измеренным значениям T_1 , T_2 и амплитуде регистрируемого сигнала ЯМР определяются вода и различные примеси в нефти, а по характеру изменения этой амплитуды и значению T_1 – воздух в потоке нефтяной смеси.

По различным оценкам специалистов стоимость процесса вторичной очистки нефти на буровой станции или морской платформе составляет \$0,4–1,0 за баррель. Эту операцию вынуждены проводить нефтяные компании, особенно при работе в северных регионах на шельфе при добыче нефти с большой глубины. Кроме явных финансовых затрат, на этот процесс необходимо дополнительное время, которое очень сложно оценить в финансовом эквиваленте. Использование разработанного авторами настоящей статьи прибора позволит снизить финансовые и временные затраты.

Разработанный ЯМР-расходомер-релаксометр меточного типа перед вводом в эксплуатацию должен пройти процедуру утверждения типа средств измерений в соответствии с приказом Минпромторга от 28.08.2020 № 2905 «Об утверждении порядка проведения испытаний стандартных образцов или СИ в целях утверждения типа, порядка утверждения типа СО или типа СИ, внесения изменений в сведения о них, порядка выдачи сертификатов об утверждении типа СО или типа СИ, требований к знакам утверждения типа СО или типа СИ и порядка их нанесения».

Список источников/References

1. Chen Z., Wang L., Wei Z., Wang Y., Deng J., *Energy*, 2022, vol. 244, 123147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123147>
2. Xu Y., Lun Z., Pan Z., Zhao C., Zhang D., *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 211, 110183. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110183>
3. De Robbio R., Cameretti M. C., Mancaruso E., *Fuel*, 2022, vol. 317, 123519. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123519>
4. Rosa-Santos P., Taveira-Pinto F., *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 186, pp. 556–569. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.050>

5. Gizatullin B., Gafurov M., Murzakhanov F., Mattea C., Stapf S., *Langmuir*, 2021, vol. 37 (22), pp. 6783–6791. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00882>
6. Dimitriadis A., Meletidis G., Pfisterer U., Kubička D., Bezergianni S., *Fuel Processing Technology*, 2022, vol. 230, 107220. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107220>
7. Qu B., Yang C., Shao Q., Liu Y., Chu H., *Fuel*, 2022, vol. 315, 123218. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123218>
8. Li Y., Wang D., Xu G., Zhang X., Liang X., *Frontiers in Chemistry*, 2021, vol. 9, 810861. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.810861>
9. Jafarinejad S., Esfahani M. R., *Separations*, 2021, vol. 8, no. 11, 206. <https://doi.org/10.3390/separations8110206>
10. Klingensmith W. C., Mays D. C., *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 2018, vol. 144, 05018004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001415](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001415)
11. Yang Y., Ha W., Zhang C., Zhang X., Wang D., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2022, vol. 84, 102142. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102142>
12. Wang Y., Li H., Liu X., Hu J., Deng G., *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 10, 1703. <https://doi.org/10.3390/s16101703>
13. Kumar A., Ridha S., Narahari M., Ilyas S. U., *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 183, 115409. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115409>
14. Сафонов А. В. Опыт применения ультразвуковых преобразователей расхода в составе системы измерений количества и показателей качества нефти // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 59–61 [Safonov A. V., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 458–460. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0477-1>].
15. Марусина М. Я., Базаров Б. А., Галайдин П. А., Марусин Н. П., Силаев А. А., Закемовская Ю. Е., Мустафаев Ю. Н. Синтез градиентной системы мультифазного расходомера // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 68–72 [Marusina M. Y., Bazarov B. A., Galaidin P. A., Marusin M. P., Silaev A. A., Zakemovskaya E. Y., Mustafaev Y. N., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 580–586. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0501-5>].
16. Im S. H., Kim K. Y., Park G. S., *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2021, vol. 70, pp. 1460–1466. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.10.1460>
17. Dasgupta S., *Tm – Technisches Messen*, 2021, vol. 88, no. 9, pp. 508–518. <https://doi.org/10.1515/teme-2021-0011>
18. Давыдов В. В., Мязин Н. С., Кирюхин А. В. Ядерно-магнитные расходомеры-релаксометры для контроля расхода и состояния теплоносителя и питательной воды на АЭС // Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 5. С. 250–255 [Davydov V. V., Myazin N. S., Kiryukhin A. V., *Atomic Energy*, 2020, vol. 127, no. 5, pp. 274–279. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00623-5>].
19. O'Neill K. T., Brancato L., Stanwix P. L., Fridjonsson E. O., Johns M. L., *Chemical Engineering Science*, 2019, vol. 202, pp. 222–237. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.03.018>
20. Fridjonsson E. O., Stanwix P. L., Johns M. L., *Journal of Magnetic Resonance*, 2014, vol. 245, 110. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2014.06.004>
21. Davydov V. V., *Optics and Spectroscopy*, 2016, vol. 121, no. 1, pp. 18–24. <https://doi.org/10.1134/S0030400X16070092>

22. Zargar M., Johns M. L., Aljindan J. M., Noui-Mehidi M. N., O'Neill K. T., *SPE Production and Operations*, 2021, vol. 36, no. 2, pp. 423–436. <https://doi.org/10.2118/205351-PA>
23. Bilgic A. M., Kunze J. W., Stegmann V., Cerioni L., Zoete-weij M., *Tm – Technisches Messen*, 2015, vol. 82, no. 11, pp. 539–548. <https://doi.org/10.1515/teme-2015-0082>
24. Weissenbrunner A., Fiebach A., Schmelter S., Thamsen P. U., Lederer T., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, vol. 52, pp. 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.07.011>
25. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Малогабаритный меточный ядерно-магнитный расходомер для измерения быстроменяющихся расходов жидкости // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 48–51 [Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Y., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 3, pp. 317–322. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0707-1>].
26. Deng F., Xiong C., Chen S., Chen G., Wang M., Liu H., Zhang J., Xiao L., *Petroleum Exploration and Development*, 2020, vol. 47, no. 4, pp. 855–866. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(20\)60101-X](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(20)60101-X)
27. O'Neill K. T., Klotz, A., Stanwix, P. L. et al., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, vol. 58, pp. 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.10.004>
28. Meribout M., Azzi A., Ghendour N. et al., *Measurement*, 2020, vol. 165, 108111. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108111>
29. Давыдов В. В., Мязин Н. С., Давыдов Р. В. Ядерно-магнитный расходомер-релаксометр для контроля расхода и состояния теплоносителя в первом контуре ядерного реактора подвижного объекта // Измерительная техника. 2022. № 4. С. 49–58 [Davydov V. V., Myazin N. S., Davydov R. V., Nuclear-magnetic flowmeter-relaxometer for control to expenditure and condition transparent liquids of coolant in first circuit of nuclear reactor a moving object, *Izmeritel'naya tekhnika*, 2022, no. 4, pp. 49–58 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-4-49-58>
30. Leshe A., *Nuclear induction*, Veb Deustscher Verlag Der Wissenschaften, Berlin, 1963, 864 p.
31. Abragam A., *The principles of nuclear magnetism*, Oxford at the Clarendon Press, Oxford UK, 1961, 646 p.
32. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Формирование линии нутации в ядерно-магнитных измерителях с текущим образцом // Письма в журнал технической физики. 2015. № 7. С. 103–110 [Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Yu., *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, pp. 355–358. <https://doi.org/10.1134/S1063785015040057>].
33. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю., Вологдин В. А. Особенности применения метода ядерно-магнитной спектроскопии для исследования потоков жидких сред // Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82. № 6. С. 936–942 [Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Yu., Vologdin V. A., *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 82, no. 6, pp. 1013–1019. <https://doi.org/10.1007/s10812-016-0220-6>].

Статья поступила в редакцию 07.04.2022; одобрена после рецензирования 04.05.2022; принята к публикации 11.05.2022.
The article was submitted 07.04.2022; approved after reviewing 04.05.2022; accepted for publication 11.05.2022.