

## Новый метод экспресс-контроля углеводородных сред и их смесей с использованием нелинейных коэффициентов в уравнениях Блоха

Р. В. Давыдов✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [davydovrv@spbstu.ru](mailto:davydovrv@spbstu.ru)

**Аннотация.** Обоснована необходимость разработки новых методов экспресс-контроля жидких сред, особенно для углеводородов. Рассмотрены недостатки существующих методов и отмечены преимущества применения метода ядерного магнитного резонанса с использованием модуляционной методики регистрации сигнала. Разработаны конструкция мобильного ядерно-магнитного релаксометра и новая методика определения состава и концентраций компонентов в смесях углеводородов, а также в средах, не вступающих между собой в химическую реакцию. Проведены исследования углеводородов и их смесей. Подтверждена эффективность предложенной методики установления состава углеводородов и определения концентраций их компонентов по результатам регистрации сигнала ЯМР и измеренным значениям времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$ .

**Ключевые слова:** уравнения Блоха, нестационарные коэффициенты, экспресс-контроль, сигнал магнитного резонанса, углеводороды, смесь, времена релаксации  $T_1$  и  $T_2$ , концентрация

**Для цитирования:** Давыдов Р. В. Новый метод экспресс-контроля углеводородных сред и их смесей с использованием нелинейных коэффициентов в уравнениях Блоха // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 3. С. 13–20. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-3-13-20.

Original article

## A New Method for Express Control of Hydrocarbon Fluids and Their Mixtures Using Nonlinear Coefficients in the Bloch Equations

R. V. Davydov✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

✉ [davydovrv@spbstu.ru](mailto:davydovrv@spbstu.ru)

**Abstract.** The need to develop new methods for rapid screening of liquid media, especially hydrocarbons, is substantiated. The shortcomings of existing methods are considered, and the advantages of applying nuclear magnetic resonance using a modulation-based signal acquisition technique are highlighted. A portable nuclear magnetic relaxometer design and a new methodology for determining the composition and component concentrations in hydrocarbon mixtures, as well as in media that do not chemically react with each other, have been developed. Studies of hydrocarbons and their mixtures were carried out. The effectiveness of the proposed methodology for establishing hydrocarbon composition and determining component concentrations was confirmed based on NMR signal acquisition results and the measured relaxation times  $T_1$  and  $T_2$ .

**Keywords:** Bloch equations, non-stationary coefficients, express control, magnetic resonance signal, hydrocarbons, mixture, relaxation times  $T_1$  and  $T_2$ , concentration

**For citation:** Davydov R. V. A New Method for Express Control of Hydrocarbon Fluids and Their Mixtures Using Nonlinear Coefficients in the Bloch Equations // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 3. P. 13–20. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-3-13-20.

**Введение.** В условиях увеличения техногенной нагрузки на окружающую среду и ухудшения экологической обстановки важным элементом деятельности человека становится контроль различных конденсированных сред [1], [2]. Особую нишу в нем занимает экспресс-контроль (определение состояния среды на месте отбора пробы) [3], [4]. Развитию различных методов экспресс-контроля и приборов для его реализации уделяется большое внимание [4]–[7]. Наибольшее предпочтение в проведении экспресс-контроля отдается следующему факту. Применяемый метод не изменяет химический состав среды и изменения при его применении обратимые [7]–[9]. Данные измерения можно реализовать с использованием явления рефракции при реализации ПВО (полного внутреннего отражения) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [8], [10]–[12]. Преимущество ЯМР по сравнению с рефракцией – то, что его можно использовать для большего числа сред, и при этом измеряются два параметра: время продольной релаксации ( $T_1$ ) и поперечной релаксации ( $T_2$ ) в отличие от рефрактометрии, где измеряется один параметр – показатель преломления  $n$ . Это дает больше возможностей по оценке состояния среды.

При этом необходимо отметить, что данные о величинах  $T_1$  и  $T_2$  позволяют с достоверностью 99.99 % выявить отклонение состояния среды от стандартного [12]–[14]. При определенных условиях можно по данным предварительной калибровки с использованием значений  $T_1$  и  $T_2$ , например, сортов нефти, определить содержание в ней воды и асфальтенов с погрешностью порядка 5 % [15]. Для предварительной подготовки нефти к первичной сепарации этот результат приемлем. Для контроля качества топлива данная методика не работает или погрешность определения наличия другого компонента более 15 %, что не позволяет принимать обоснованное решение об использовании данного топлива по назначению.

В реальной жизни возникает очень много случаев, когда в одну марку топлива, например бензин АИ-95, попал другой бензин – АИ-92. Это самая неприятная ситуация для дальнейшего использования топлива. При небольших концентрациях АИ-92 в АИ-95 мобильный октанометр не

может определить изменения в бензине АИ-95, погрешность прибора составляет порядка 2 октановых чисел. Этот момент экспресс-контроль пропускает. После заливки данного топлива в бак машина может быть поставлена на парковку на продолжительное время, например на ночь. Бензин АИ-92 опустится на дно бака, где расположен топливозаборник. В результате при запуске двигателя, рассчитанный на бензин марки АИ-95, поступит бензин марки АИ-92. Последствия такой работы двигателя могут быть различными: от прогорания клапанов (при длительной работе цилиндров) до необходимости очистки всего топливного тракта от бензина АИ-92, чтобы восстановить работоспособность двигателя и автомобиля.

В случае выявления такого состава топлива или другой ситуации – например, когда в бензин АИ-95 попал бензин АИ-98, при определении состава смеси из двух бензинов (три марки бензина или две марки бензина и керосин смешиваются крайне редко) и концентрации их компонентов можно принять обоснованное решение по использованию данного топлива. Это позволит сэкономить средства и время, а также снизить риск поломок транспортных средств.

Поэтому разработка метода, который, используя данные ЯМР-исследований при проведении экспресс-контроля, позволит решать задачу определения состава углеводородов и концентраций их компонентов, крайне актуальна. Это и определило цель настоящей статьи, направленной на разработку новой модели для определения состава смеси углеводородов и устройства для ее реализации.

**Малогобаритный ядерно-магнитный релаксометр.** Для решения задачи определения состава и концентрации компонентов в смесях углеводородных сред был выбран способ регистрации сигнала ЯМР с использованием модуляционной методики [16], [17]. При импульсных методах регистрации сигнала ЯМР в мобильных релаксометрах, форма самого сигнала, в котором может находиться информация о составе среды, не регистрируется. По изменению амплитуд импульсов измеряются времена релаксации  $T_1$  и  $T_2$ . На рис. 1 представлена конструкция разработанного мобильного ЯМР-релаксометра для проведения экспресс-контроля. На рисунке обозначены:

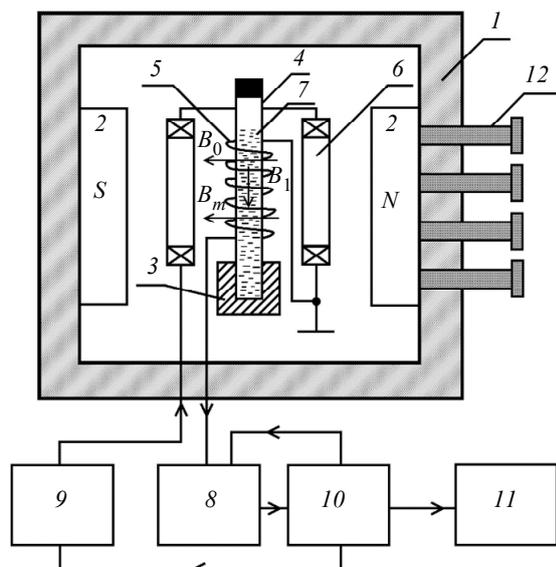


Рис. 1. Структурная схема мобильного ядерно-магнитного релаксометра

Fig. 1. Block diagram of a mobile nuclear magnetic relaxation meter

1 – система со специальными винтами для установки магнитов и управления положениями их полюсов; 2 – магниты для создания постоянного поля в зазоре; 3 – фиксатор кюветы; 4 – кювета с крышкой; 5 – катушка приемного контура автодина; 6 – катушки модуляции поля  $B_0$ ; 7 – конденсированная среда; 8 – автодин; 9 – генератор для модуляции 6; 10 – система обработки информации и формирования команд управления; 11 – устройство визуализации сигнала ЯМР, 12 – регулировочные винты

Исследуемая смесь размещается в кювете 4, расположенной в постоянном магнитном поле  $B_0$ . Поле  $B_0$  модулируется переменным магнитным полем, создаваемым катушками 6, с амплитудой  $B_m$  и частотой  $f_m$ . В момент выполнения резонансного условия резонансная частота  $f_0$ , соответствующая полю  $B_0$  ( $f_0 = \gamma B_0$ ,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение) совпадает с частотой автодинного детектора  $f_a$ . Возникает поглощение электромагнитного излучения, сформированного в автодинном детекторе исследуемой средой, что приводит к изменению добротности контура автодинного детектора. Формируется отклик спиновой системы в виде колебаний непериодической формы («вигли»). Регулируя значения  $B_m$  и  $B_1$ , обеспечивают максимальную амплитуду регистрируемого сигнала ЯМР. В [18],

[19] представлены методы определения значений  $T_1$  и  $T_2$  с использованием зарегистрированного сигнала ЯМР и регулирования частоты  $f_m$ . С использованием измеренных значений  $T_1$  и  $T_2$  определяется состояние среды (отклонение ее от стандартного состояния). Измерения проводятся при температуре  $T$  окружающей среды. В разработанной конструкции сигнал ЯМР регистрируется на частоте  $f = 2154.8$  кГц. Настраивается система на резонанс по протонам. На протонах сигнал наиболее высокий по уровню напряжения на выходе автодина, что позволяет его накапливать. Для измерения  $T_1$  и  $T_2$  с погрешностью менее 1% необходимо отношение сигнал/шум более 10. Это легко обеспечивают 100 накоплений.

### Новая методика определения состава смеси.

Импульсные методы регистрации сигнала ЯМР в малогабаритных приборах для экспресс-контроля не позволяют получить при измерениях форму сигнала ЯМР, где может быть заложена информация о составе смеси. Модуляционная методика обеспечивает получение такого сигнала. Так как автодин, который используется для регистрации сигнала, работает в широкой полосе 10 кГц, то сигналы от протонов углеводородов, у которых резонансные частоты расположены рядом, будут зарегистрированы. Эти сигналы будут сформированы в один сигнал ЯМР, так как автодин интегральный прибор. Тогда, если разделить эти сигналы, которые дают вклад в общий сигнал с весовыми коэффициентами, связанными с их концентрациями, можно получить информацию о смеси: узнать ее состав и концентрацию компонентов.

Для этого рассмотрим описание сигнала ЯМР с использованием уравнений Блоха [20], [21]:

$$\begin{cases} \frac{du(t)}{dt} + \frac{u(t)}{T_2^*} + \Delta\omega v(t) = 0; \\ \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{T_2^*} - \Delta\omega u(t) + \gamma B_1 M_z(t) = 0; \\ \frac{dM_z(t)}{dt} + \frac{M_z(t)}{T_1} - \gamma B_1 v(t) = \frac{M}{T_1}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $v(t)$  и  $u(t)$  – сигналы поглощения и дисперсии;  $M = \chi_0 B_0$  – намагниченность,  $\chi_0$  – статистическая магнитная восприимчивость;  $\Delta\omega$  – расстройка частоты от резонанса;  $T_2^*$  – эффективное время поперечной релаксации;  $M_z$  – проекция намагни-

ченности на ось  $z$ ;  $B_1$  – индукция магнитного поля, создаваемого в катушке регистрации сигнала ЯМР.

Экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости учета модуляции слабого поля  $B_0$  в (1) через выражение для намагниченности  $M$ . В связи с этим вводится модифицированное представление  $M$ , задаваемое соотношением

$$M = \chi_0 [B_0 + B_m \sin(\omega_m t)], \quad (2)$$

где  $\omega_m$  – частота модуляции поля  $B_0$  и  $t$  – время.

После подстановки (2) в (1) система уравнений принимает вид

$$\begin{cases} \frac{du(t)}{dt} + \frac{u(t)}{T_2} + \gamma B_m \sin(\omega_m t) v(t) = 0; \\ \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{T_2} - \gamma B_m \sin(\omega_m t) u(t) + \\ + \gamma B_1 M_z(t) = 0; \\ \frac{dM_z(t)}{dt} + \frac{M_z(t)}{T_1} - \frac{\chi_0 [B_0 + B_m \sin(\omega_m t)]}{T_1} - \\ - \gamma B_1 v(t) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Ввиду отсутствия аналитического решения для (3) используется численное интегрирование. Значения  $u(t)$ ,  $v(t)$ ,  $M_z(t)$  рассчитываются при условиях  $u(0) = 0$ ,  $v(0) = 0$ ,  $M_z(0) = \chi_0 B_0$ .

Сигнал ЯМР  $G(t)$  моделировался согласно выражению [4]

$$G(t) = F(t) \left( \frac{A}{A+B} v^2(t) + \frac{B}{A+B} u^2(t) \right)^{1/2},$$

где  $u(t)$  и  $v(t)$  – сигналы поглощения и дисперсии, а  $F(t)$  – коэффициент, учитывающий фазовые изменения. Параметры  $A$  и  $B$  задают вклад составляющих поглощения и дисперсии в регистрируемый сигнал ЯМР ( $A + B = 1$ ) и могут быть определены сопоставлением смоделированного сигнала с экспериментальными данными.

Если объектом исследования служит многокомпонентная смесь, в которой компоненты не взаимодействуют химически и образуют устойчивую совокупность (например, при смешивании двух марок бензина), зарегистрированный ЯМР-отклик представляет собой суперпозицию вкладов всех компонентов. Причина заключается в принципе работы автодинного генератора: он интегрально воспринимает сигнал и фиксирует отклики всех компонентов в одной и той же измерительной обстановке по протонам, поскольку значения полей прибора остаются постоянными.

Различия между вкладами отдельных веществ проявляются в динамике  $u(t)$  и  $v(t)$ , определяемой системой (3): для каждого компонента она задается собственными значениями  $T_1$  и  $T_2$ . Это обстоятельство положено в основу модели конфигурации линии ЯМР-сигнала смеси, задаваемой соотношением

$$G_m(t) = \sum_{i=1}^k F_i(t) V_i N_i \times \left( \frac{A_i}{A_i + B_i} v_i^2(t) + \frac{B_i}{A_i + B_i} u_i^2(t) \right)^{1/2}, \quad \sum_{i=1}^k V_i = V_r. \quad (4)$$

Здесь  $A_i$ ,  $B_i$  задают весовые вклады сигналов поглощения и дисперсии в наблюдаемый ЯМР-сигнал ( $i$  – номер компонента смеси), а  $F_i(t)$  описывает фазовую поправку.  $N_i$  соответствует протонной концентрации компонента,  $V_i$  – его объем в смеси,  $V_r$  – эффективный объем регистрации (объем катушки) малогабаритного ЯМР-релаксометра.

Определяемые в ходе подгонки значения  $V_i$  затем используются для оценки реального содержания компонентов, так как  $V_r$ , ограничивающий область регистрации сигнала ЯМР, – это неизменный конструктивный параметр прибора и не зависит от режима его эксплуатации.

**Результаты экспериментальных исследований углеводородов и их смесей.** Для проведения исследований был выбран бензин марки АИ-95 и различные углеводороды, которые могут оказаться в его составе по различным причинам. На рис. 2 представлены зарегистрированные сигналы ЯМР от бензина АИ-95 и его смеси с другими углеводородами (бензином марки А-76, керосином и метиловым спиртом).

Анализ зарегистрированных сигналов по форме позволяет отметить, что различие наблюдается между сигналами на всех графиках. Определить, что именно добавили в бензин марки АИ-95, невозможно. Поэтому было проведено моделирование регистрируемых сигналов ЯМР с использованием соотношений (3) и (4). Значения времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$  были определены заранее с использованием зарегистрированных сигналов ЯМР от бензина марки А-76 и керосина, которые добавили в бензин марки АИ-95.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных сигналов ЯМР от смеси углеводородов показывает их совпадение до 3-го пика включительно, чего достаточно для определения концентраций с погрешностью менее 1 %.

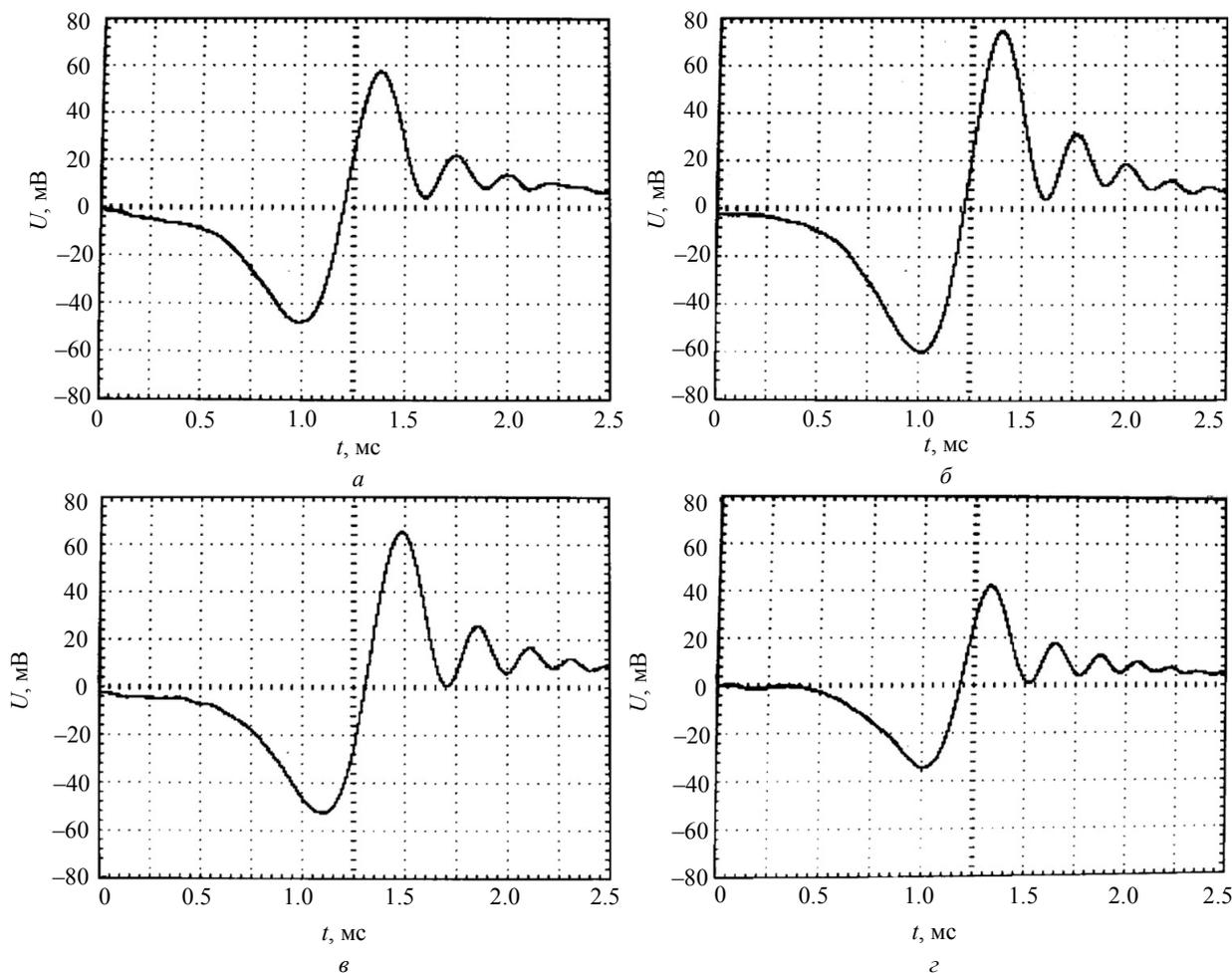


Рис. 2. Сигналы ЯМР, зарегистрированные от различных сред при  $T = 294.1$  К. График *a* соответствует бензину марки АИ-95. На остальных графиках представлены смеси АИ-95 с другими средами: *б* – с бензином А-76, *в* – с керосином, *г* – с метиловым спиртом. На всех трех графиках объемная пропорция 75:25

Fig. 2. NMR signals recorded from various media at  $T = 294.1$  K. Plot *a* corresponds to AI-95 gasoline. The remaining plots show mixtures of AI-95 with other media: *б* – with A-76 gasoline, *в* – with kerosene, and *г* – with methyl alcohol (methanol). In all three mixture cases, the volumetric ratio is 75:25

**Обсуждение результатов.** Полученные данные о моделировании различных смесей углеводородов (топливо и моторные масла) показали надежность работы предложенного нового метода. Стоит обратить внимание на простоту его реализации, связанную с выбором компонента, который добавили в исследуемый углеводород, и определением концентраций. Необходимо получить совпадение зарегистрированного и смоделированного сигналов ЯМР. И есть предположение об углеводороде, который добавлен в другой углеводород, – его времена релаксации известны. Зная температуру, для соотношения (4) подбираются времена релаксации известных углеводородов, из системы уравнений (3) вычисляются сигналы поглощения и дисперсии и осуществляется сравнение сигналов ЯМР. Затем осуществляется перебор различных концентраций двух углеводородов

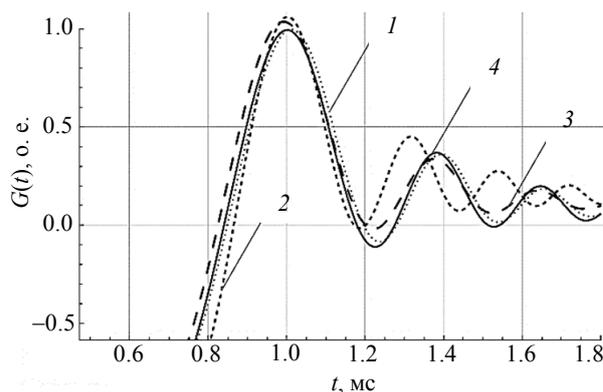


Рис. 3. Зарегистрированные сигналы ЯМР от углеводородов и их смеси и результат моделирования смеси углеводородов  
Fig. 3. Recorded NMR signals from hydrocarbons, their mixture, and the hydrocarbon-mixture simulation result

родов (численное решение (3) на современном оборудовании можно осуществить за несколько десятков миллисекунд – перебор различных вариантов не требует много времени). В результате

определяется состав смеси и концентрации ее компонентов, что наглядно подтверждается данными, представленными на рис. 3, где введены обозначения: 1 – смесь в равной пропорции (1:1) бензина АИ-95 и керосина, 2 и 3 – бензин АИ-95 и керосин, 4 – результат моделирования их смеси.

**Заключение.** Полученные результаты подтверждают применимость разработанного метода для идентификации состава и количественной оценки концентраций компонентов в смесях сред при отсутствии химического взаимодействия между ними.

При использовании данного метода следует выделить два частных случая его применения. Первый – когда обозначен углеводород и в него добавлен другой компонент (в большинстве случаев тоже углеводород). Задача будет заключаться

в подборе этого углеводорода и соответствующих концентраций.

Более сложный вариант – когда имеется смесь из двух углеводородов, но не заявлено, из каких, и необходимо определить состав и концентрации компонентов. В этом случае процесс определения этих компонентов по причине рассмотрения большого числа вариантов может растянуться до 10...20 с. Однако данный временной интервал вполне приемлем для экспресс-контроля.

Наконец, необходимо отметить, что предложенный метод без проблем можно использовать для определения состава компонентов в смеси в текущем состоянии, что крайне важно для нефти перед ее сепарацией.

### Список литературы

1. Phase transformation in the «Brodie graphite oxide – acetonitrile» system: influence of the oxidizing level of the material / N. A. Chumakova, D. S. Popov, A. V. Kaplin, A. T. Rebrikova, E. A. Eremina, M. V. Korobov, O. N. Khrykina // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2023. Vol. 25, no. 13. P. 9648–9655. doi: 10.1039/d3cp00426k.
2. Probing rotaxane dynamics with  $^{19}\text{F}$  NMR/MRI: unveiling the roles of mechanical bond and steric hindrance / Y. Li, M. Luo, M. Jiang, R. Zhou, W. Yang, Sh. Li, F. Wang, L. Zhu, P. He, M. Yang, X. Zhou, Z.-X. Jiang, S. Chen // *Analytica Chimica Acta*, 2024. Vol. 1319. P. 342983. doi: 10.1016/j.aca.2024.342983.
3. Давыдов В. В., Порфирьева Е. В., Давыдов Р. В. Неразрушающий метод контроля эластичности стенок вен и артерий человека // *Дефектоскопия*. 2022. № 9. С. 56–67. doi: 10.31857/S0130308222090068.
4. 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.
5. Fiber optic sensors for harsh and high radiation environments in aerospace applications / A. Rovera, A. Tancau, N. Boetti, M. D. L. Dalla Vedova, P. Maggiore, D. Janner // *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 2512. doi: 10.3390/s23052512.
6. Investigating the effect of microwave radiation at different frequencies on improving the quality of heavy oil / A. Tajik, A. V. Vakhin, N. A. Nazimov, O. Mirzayev, R. R. Latypov, M. R. Gafurov // *Fuel*. 2024. Vol. 375. P. 132547. doi: 10.1016/j.fuel.2024.132547.
7. Two fractions of low mobility acetonitrile inside graphite oxide according to  $^1\text{H}$  NMR spectroscopy / E. L. Vavilova, M. Y. Volkov, Y. V. Slesareva, D. A. Astvatsaturov, N. A. Chumakova // *Diamond and Related Materials*. 2025. Vol. 156. P. 112371. doi: 10.1016/j.diamond.2025.112371.
8. Экспресс-метод определения показателя преломления жидкостей / В. В. Муссил, В. А. Белозёров, В. В. Калашников, А. И. Краев, А. Ю. Лущик // *Приборы и техника эксперимента*. 2011. № 3. С. 113–115.
9. Avilova I. A., Volkov V. I. Water and molecular exchange in biological cells studied using  $^1\text{H}$  pulsed field gradient NMR // *Membranes*. 2023. Vol. 13, no 6. P. 567. doi: 10.3390/membranes13060567.
10. Давыдов В. В., Гребеникова Н. М., Смирнов К. Я. Оптический метод контроля состояния текущих сред с низкой прозрачностью и крупными включениями // *Измерительная техника*. 2019. № 6. С. 37–43. doi: 10.32446/0368-1025it.2019-6-37-43.
11. Measurement of the refractive index of highly turbid media / W. R. Calhoun, H. Maeta, A. Combs, L. M. Bali, S. Bali // *Optics Lett.* 2010. Vol. 35, no. 8. P. 1224–1226. doi: 10.1364/OL.35.001224.
12. Kashaev R. S., Faskhiev N. R. Determination of dispersity of aqueous emulsions of hydrocarbons by nuclear magnetic resonance relaxometry // *Chem. and Technol. of Fuels and Oils*. 2011. Vol. 47. P. 362–373. doi: 10.1007/s10553-011-0309-9.
13. Давыдов В. В., Мязин Н. С., Давыдов Р. В. Мультифазный ядерно-магнитный расходомер-релаксометр для контроля состояния и быстроизменяющихся расходов нефтяных смесей // *Измерительная техника*. 2022. № 6. С. 52–59. doi: 10.32446/0368-1025it.2022-6-52-59.
14. Radio frequency pulse marking of nuclear magnetization for magnetic flow metering: The impact of the flow profile / L. Schmieder, P. A. Koss, F. Kühnemann, M. Bock // *J. of Appl. Phys.* 2024. Vol. 135, no 16. P. 163902. doi: 10.1063/5.0204641.
15. Применение портативного проточного анализатора ПМР для экспресс-контроля свойств нефтепродуктов и загрязнений воды / Р. С. Кашаев, В. О. Козелкова, Дык Ань Нгуен, О. В. Козелков // *Химическая технология*. 2025. Т. 26, № 4. С. 152–160. doi: 10.31044/1684-5811-2025-26-4-152-160.
16. Price W. S. NMR studies of translational motion: Principles and applications. Cambridge University Press, 2009. 416 p. doi: 10.1017/CBO9780511770487.

17. Callaghan P. T. Translational dynamics and magnetic resonance: Principles of pulsed gradient spin echo NMR. Oxford University Press, 2011. 568 p. doi: 10.1093/acprof:oso/9780199556984.001.0001

18. Davydov R., Davydov V., Dudkin V. The nuclear magnetic flowmeter for monitoring the consumption and composition of oil and its complex mixtures in real-time // *Energies*. 2022. Vol. 15, no 9. P. 3259. doi: 10.3390/en15093259.

19. Разработка усовершенствованного программно-аппаратного комплекса управления патрубком анализатора протонного магнитного резонанса ПМРА-IV /

Д. А. Нгуен, Р. С. Кашаев, О. В. Козелков, А. Д. Арсланов, В. Т. Чан // *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. 2025. Т. 27, № 1. С. 3–15. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-3-15.

20. Khashami F. Fundamentals of NMR and MRI: From quantum principles to medical applications. Springer Cham, 2024. XIX, 223 p. doi: 10.1007/978-3-031-47976-2.

21. Blümich B. Essential NMR: For scientists and engineers. 2<sup>nd</sup> ed. Springer Cham, 2019. XI, 165 p. doi: 10.1007/978-3-030-10704-8.

### Информация об авторе

**Давыдов Роман Вадимович** – канд. физ.-мат. наук, доцент Высшей школы управления киберфизическими системами Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Политехническая ул., 29Б, Санкт-Петербург, 195251, Россия.

E-mail: [davydovrv@spbstu.ru](mailto:davydovrv@spbstu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-1958-4221>

### References

1. Phase transformation in the «Brodie graphite oxide – acetonitrile» system: influence of the oxidizing level of the material / N. A. Chumakova, D. S. Popov, A. V. Kaplin, A. T. Rebrikova, E. A. Eremina, M. V. Korobov, O. N. Khrykina // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2023. Vol. 25, no. 13. P. 9648–9655. doi: 10.1039/d3cp00426k.

2. Probing rotaxane dynamics with <sup>19</sup>F NMR/MRI: unveiling the roles of mechanical bond and steric hindrance / Y. Li, M. Luo, M. Jiang, R. Zhou, W. Yang, Sh. Li, F. Wang, L. Zhu, P. He, M. Yang, X. Zhou, Z.-X. Jiang, S. Chen // *Analytica Chimica Acta*, 2024. Vol. 1319. P. 342983. doi: 10.1016/j.aca.2024.342983.

3. Davydov V. V., Porfir'eva E. V., Davydov R. V. Nezrushajushhij metod kontrolja jelastichnosti stenok ven i arterij cheloveka // *Defektoskopija*. 2022. № 9. S. 56–67. doi: 10.31857/S0130308222090068. (In Russ.).

4. Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Ju. Malogabaritnyj jaderno-magnitnyj relaksometr dlja jekspress-kontrolja sostojanija zhidkih i vjazkih sred // *Izmeritel'naja tehnika*. 2014. № 8. S. 44–48. (In Russ.).

5. Fiber optic sensors for harsh and high radiation environments in aerospace applications / A. Rovera, A. Tancau, N. Boetti, M. D. L. Dalla Vedova, P. Maggiore, D. Janner // *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 2512. doi: 10.3390/s23052512.

6. Investigating the effect of microwave radiation at different frequencies on improving the quality of heavy oil / A. Tajik, A. V. Vakhin, N. A. Nazimov, O. Mirzayev, R. R. Latypov, M. R. Gafurov // *Fuel*. 2024. Vol. 375. P. 132547. doi: 10.1016/j.fuel.2024.132547.

7. Two fractions of low mobility acetonitrile inside graphite oxide according to <sup>1</sup>H NMR spectroscopy / E. L. Vavilova, M. Y. Volkov, Y. V. Slesareva, D. A. Astvatsaturov, N. A. Chumakova // *Diamond and Related Materials*. 2025. Vol. 156. P. 112371. doi: 10.1016/j.diamond.2025.112371.

8. Jekspress-metod opredelenija pokazatelja prelomenija zhidkostej / V. V. Mussil, V. A. Belozjorov, V. V. Kalashnikov, A. I. Kraev, A. Ju. Lushhik // *Pribory i tehnika jeksperimenta*. 2011. № 3. S. 113–115. (In Russ.).

9. Avilova I. A., Volkov V. I. Water and molecular exchange in biological cells studied using <sup>1</sup>H pulsed field gradient NMR // *Membranes*. 2023. Vol. 13, no 6. P. 567. doi: 10.3390/membranes13060567.

10. Davydov V. V., Grebenikova N. M., Smirnov K. Ja. Opticheskij metod kontrolja sostojanija tekushhij sred s nizkoj prozrachnost'ju i krupnymi vkraplenijami // *Izmeritel'naja tehnika*. 2019. № 6. S. 37–43. doi: 10.32446/0368-1025it.2019-6-37-43. (In Russ.).

11. Measurement of the refractive index of highly turbid media / W. R. Calhoun, H. Maeta, A. Combs, L. M. Bali, S. Bali // *Optics Lett.* 2010. Vol. 35, no 8. P. 1224–1226. doi: 10.1364/OL.35.001224.

12. Kashaev R. S., Faskhiev N. R. Determination of dispersity of aqueous emulsions of hydrocarbons by nuclear magnetic resonance relaxometry // *Chem. and Technol. of Fuels and Oils*. 2011. Vol. 47. P. 362–373. doi: 10.1007/s10553-011-0309-9.

13. Davydov V. V., Mjazin N. S., Davydov R. V. Mul'tifaznyj jaderno-magnitnyj rashodomer-relaksometr dlja kontrolja sostojanija i bystroizmenjajushhijhsja rashodov neftjanyh smesej // *Izmeritel'naja tehnika*. 2022. № 6. S. 52–59. doi: 10.32446/0368-1025it.2022-6-52-59. (In Russ.).

14. Radio frequency pulse marking of nuclear magnetization for magnetic flow metering: The impact of the flow profile / L. Schmieder, P. A. Koss, F. Kühnemann, M. Bock // *J. of Appl. Phys.* 2024. Vol. 135, no 16. P. 163902. doi: 10.1063/5.0204641.

15. Primenenie portativnogo protochnogo analizatora PMR dlja jekspress-kontrolja svojstv nefteproduktov i zagryznenij vody / R. S. Kashaev, V. O. Kozelkova, Dyk An' Nguen, O. V. Kozelkov // *Himicheskaja tehnologija*.

2025. Т. 26, № 4. С. 152–160. doi: 10.31044/1684-5811-2025-26-4-152-160. (In Russ.).

16. Price W. S. NMR studies of translational motion: Principles and applications. Cambridge University Press, 2009. 416 p. doi: 10.1017/CBO9780511770487.

17. Callaghan P. T. Translational dynamics and magnetic resonance: Principles of pulsed gradient spin echo NMR. Oxford University Press, 2011. 568 p. doi: 10.1093/acprof:oso/9780199556984.001.0001

18. Davydov R., Davydov V., Dudkin V. The nuclear magnetic flowmeter for monitoring the consumption and composition of oil and its complex mixtures in real-time // Energies. 2022. Vol. 15, no 9. P. 3259. doi: 10.3390/en15093259.

19 Razrabotka usovershenstvovannogo program-mno-apparatnogo kompleksa upravleniya patrubkom analizatora protonnogo magnitnogo rezonansa PMRA-IV / D. A. Nguen, R. S. Kashaev, O. V. Kozelkov, A. D. Arslanov, V. T. Chan // Izv. vuzov. Problemy jenergetiki. 2025. Т. 27, № 1. С. 3–15. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-3-15. (In Russ.).

20. Khashami F. Fundamentals of NMR and MRI: From quantum principles to medical applications. Springer Cham, 2024. XIX, 223 p. doi: 10.1007/978-3-031-47976-2.

21. Blümich B. Essential NMR: For scientists and engineers. 2<sup>nd</sup> ed. Springer Cham, 2019. XI, 165 p. doi: 10.1007/978-3-030-10704-8.

#### Information about the author

**Roman V. Davydov** – Cand. Sci. (Phys.-Math), Associate Professor in Higher School of Cyberphysical Systems & Control, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya St., 29B, St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: [davydovrv@spbstu.ru](mailto:davydovrv@spbstu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-1958-4221>

Статья поступила в редакцию 23.01.2026; принята к публикации после рецензирования 29.01.2026; опубликована онлайн 30.03.2026.

Submitted 23.01.2026; accepted 29.01.2026; published online 30.03.2026.

---