

Научная статья

УДК 537.868

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-4-49-58>

Ядерно-магнитный расходомер-релаксометр для контроля расхода и состояния теплоносителя в первом контуре ядерного реактора подвижного объекта

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 повышения точности измерения расхода теплоносителя в первом контуре ядерного реактора для подвижных объектов. Показано, что в настоящее время в ядерных энергетических установках подвижных объектов не контролируется состояние теплоносителя в режиме реального времени. Рассмотрены проблемы, возникающие при контроле расхода теплоносителя различными моделями расходомеров в первом контуре ядерного реактора. Установлено, что решить данные проблемы позволяет применение ядерно-магнитных расходомеров. Разработана конструкция ядерно-магнитного расходомера-релаксометра меточного типа с использованием для регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса модуляционной методики при модуляции магнитного поля в зоне размещения катушки нутации. Предложены методы измерения времён продольной и поперечной релаксаций текущего теплоносителя. Представлены результаты исследования расхода и времён релаксации текущего в трубопроводе модельного раствора. Модельный раствор содержит химические элементы, из которых состоит теплоноситель для ядерных реакторов подвижных объектов. Установлено, что погрешность измерения этих параметров не превышает 1 %. Показана перспективность использования разработанной конструкции ядерно-магнитного расходомера-релаксометра в первом контуре ядерного реактора подвижного объекта.

Ключевые слова: ядерный реактор, теплоноситель, подвижный объект, поток, теплообмен, контроль состояния, расход, время продольной релаксации, время поперечной релаксации, 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. Ядерно-магнитный расходомер-релаксометр для контроля расхода и состояния теплоносителя в первом контуре ядерного реактора подвижного объекта // Измерительная техника. 2022. № 4. С. 49–58. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-4-49-58>

Nuclear-magnetic flowmeter-relaxometer for control to expenditure and condition transparent liquids of coolant in first circuit of nuclear reactor a moving object

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 increasing the accuracy of measuring the flow rate of the coolant in the first loop of a nuclear reactor for mobile objects has been substantiated. The necessity of monitoring the state of the coolant in the current flow in the pipeline is additionally substantiated. At the moment, in nuclear power plants of mobile objects, the control of the state of the coolant in real time is not implemented. Problems arising when controlling the flow rate of the coolant by various models of flow meters in the primary circuit of a nuclear reactor are considered. It was found that the use of nuclear magnetic flow meters allows them to be solved. A new design of a tagged-type nuclear magnetic flowmeter-relaxometer has been developed using modulation techniques and modulation of the magnetic field in the area

of the nutation coil to register the nuclear magnetic resonance signal. Methods for measuring the times of longitudinal and transverse relaxation of the current coolant are proposed. The paper presents the results of studying the parameters (flow rate and relaxation times) of the model solution flowing in the pipeline, which contains the chemical elements that make up the coolant for nuclear reactors of mobile objects. It was found that the measurement error for these parameters does not exceed 1 %. The prospects of using the developed design of a nuclear-magnetic flowmeter-relaxometer in the first circuit of a nuclear reactor of a mobile object are shown.

Keywords: nuclear reactor, coolant, moving object, flow, heat exchange, state control, flow rate, longitudinal and transverse relaxation times, 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. В настоящее время из-за уменьшения запасов топлива (в первую очередь нефти и газа) и нестабильности цен на него, а также увеличения потребностей экономики и населения в новых мощностях электрической энергии стремительно развиваются различные направления энергетики [1, 2]. Многие страны Западной Европы, США, Канада, Китай и даже Япония в качестве источника увеличения мощностей выработки электрической энергии рассматривают в первую очередь атомную энергетику [2, 3]. Только атомные электрические станции (АЭС) могут обеспечить для промышленности и населения крупных городов необходимые мощности электрической энергии в любое время суток (независимо от погодных условий и поставок топлива) [2–4]. Развитие гидроэнергетики, которая является реальным конкурентом атомной энергетики, почти исчерпало возможности по причине отсутствия мест на реках для возведения новых мощных гидроэлектростанций без нанесения серьёзного ущерба природе и населению. Солнечная энергетика и ветрогенераторы играют важную роль в обеспечении электрической энергией населения небольших поселений (острова в Тихом океане или Карибском море), малых объектов промышленности и инфраструктуры (маяки на побережье вдоль Северного морского пути и т. д.) [5, 6]. В отличие от АЭС эти источники энергии зависят от погодных условий, поэтому их работа нестабильна: необходимо использовать аккумуляторы [6] и невозможно постоянно поддерживать поступление энергии большой мощности.

Неоспоримое преимущество АЭС по получению электрической энергии сформировало отдельное направление в атомной энергетике, связанное с подвижными объектами [7, 8]. В последнее десятилетие к классическим подвижным объектам (например, атомные ледоколы), конструкции которых постоянно совершенствуются, добавились плавучие АЭС: опытный проект «Академик Ломоносов» работает в г. Певек, Россия, есть опытные проекты плавучих АЭС во Франции, Великобритании и Японии [9]. Кроме того, в США, Китае и Японии разрабатывают проекты тихоокеанских круизных лайнеров с атомной энергетической установкой на борту. Это, с одной стороны, стимулирует разработку новых моделей ядерных реакторов для судовых электростанций, а с другой стороны – поиск новых решений по повышению эффективности выработки электрической энергии действующими моделями ядерных реакторов.

Одна из нерешённых пока проблем как для действующих, так и для разрабатываемых моделей реакторов, связана с оптимизацией коэффициента теплообмена k_H (критерий Нуссельта) между первым и вторым контурами ядерного реактора с целью выработки парогенератором электрической энергии максимальной мощности. Кроме того, в условиях

ограниченного пространства на подвижном объекте для обеспечения безопасности работы реактора крайне важно обеспечить эффективный отвод тепловой энергии от стержней ядерного реактора. Необходимо отметить, что стабильная работа реактора на высоких энергетических уровнях мощности без переключений увеличивает срок его эксплуатации минимум на 20 % [3, 4, 7, 10].

Коэффициент k_H реакторов СВБР-75 и СВБР-100, разработанных для подвижных объектов, зависит от расходов и теплоёмкостей теплоносителя и питательной воды в первом и втором контурах ядерного реактора. Проблема контроля расхода q_B и теплоёмкости C_B питательной воды частично решена. Погрешность ультразвукового расходомера при измерении расхода q_B составляет 1,0–1,5 % в зависимости от срока эксплуатации прибора (в ряде случаев используют специальный оптический расходомер с вертушкой). Теплоёмкость C_B определяется по измеренным значениям давления p_B питательной воды в трубопроводе с погрешностью не более 1 % (при стандартном $p_B=16$ МПа) и температуры T_B с погрешностью 0,2 °C (при стандартной $T_B=300$ °C). В этом случае погрешность определения C_B незначительно превышает 1 %. Контроль состояния питательной воды осуществляется в зоне её подготовки после конденсации от парогенератора до циркулярного насоса при $T_B<100$ °C. Для этих целей применяются различные оптические приборы с погрешностью измерения менее 1 %.

Наибольшие проблемы возникают при контроле расхода q_T и состояния теплоносителя. В качестве теплоносителя в указанных выше реакторах используется жидкий расплав свинца с висмутом (44,5 % Pb + 55,5 % Bi) при температуре теплоносителя $T_T=490$ °C. Теплоносителем в некоторых моделях реактора СВБР-100 служит расплав ^{23}Na при $T_T=500$ °C. Для подвижных объектов по причине высокой потенциальной химической энергии взаимодействия расплава с водой и воздухом указанные реакторы пока (до создания более надёжной системы защиты) не введены в эксплуатацию. В разрабатываемом для реактора СВБР-100 расходомере необходимо обязательно предусмотреть функцию контроля расхода и состояния расплава ^{23}Na .

В настоящее время в действующих моделях СВБР-75 и первых экспериментальных реакторах СВБР-100 на подвижных объектах для измерения расхода q_T используют механические расходомеры. В процессе эксплуатации этих приборов при высоких температурах и средних скоростях потока погрешность измерения увеличивается до 5 % и более. Использовать электромагнитные расходомеры для измерения q_T , как это делают на экспериментальных АЭС малой мощности с реактором СВБР-100, крайне сложно

из-за сильных электромагнитных помех при переключениях на судовой электростанции для управления мощным двигателем, рулями. Ограничения по размещению ядерного реактора, судовой электростанции не позволяют обеспечить электромагнитную защиту прибора. Это приводит к сложно предсказуемым погрешностям измерения q_T (эти помехи отсутствуют на стационарной АЭС и минимальны на плавучей АЭС при её стоянке в порту). Контроль состояния (теплоёмкость C_T) теплоносителя определяют по измеренным значениям давления и температуры. Для измерения температуры используют термодатчики и термосопротивления (погрешность измерения T составляет менее 0,5 %). Для измерения давления используют импульсные линии с контрольно-измерительным прибором. Погрешность измерения давления составляет порядка 3 %, при длительной эксплуатации ядерного реактора она увеличивается. Всё это не позволяет оптимизировать значения k_H , так как при таких погрешностях измерения q_T в первую очередь (с запасом) обеспечивают оптимальный отвод тепловой энергии от стержней ядерного реактора. В настоящее время по различным оценкам на подвижных объектах значение k_H отличается от оптимального более чем на 10 %.

Цель настоящей работы – разработка конструкции ядерно-магнитного расходомера-релаксометра для измерения расхода и состояния теплоносителей – расплавов 44,5 % Pb + 55,5 % Bi и ^{23}Na с погрешностью не более 1,5 %.

Конструкция ядерно-магнитного расходомера-релаксометра и методы контроля расхода и состояния теплоносителя. В случае длительной эксплуатации измерительного оборудования в сложных условиях (например, в зоне ядерного реактора, на химическом производстве) для измерений расхода жидких сред преимущественно применяют бесконтактные методы [7, 8, 10–12]. Среди них наибольшие функциональные возможности у методов, основанных на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [8, 13–15]. В данном случае можно эксплуатировать ЯМР-расходомеры, так как в первом контуре реакторов используются трубопроводы диаметром менее 100 мм (большинство конструкций СВБР-75 и СВБР-100 содержат два трубопровода диаметром 50 мм каждый), что позволяет обеспечить в магнитной системе индукцию порядка 1 Тл и неоднородность магнитного поля менее $0,002 \text{ см}^{-1}$ для регистрации сигнала ЯМР и проведения измерений q с погрешностью не более 1,5 %. Диаметр трубопровода в первом контуре реактора стационарных АЭС превышает 1000 мм, поэтому там использовать ЯМР-расходомер крайне сложно.

В разработанных промышленных и лабораторных конструкциях ядерно-магнитного расходомера-релаксометра (в основном для углеводородов и биологических растворов) кроме расхода жидкости также измеряются времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксаций [8, 13, 14, 16, 17]. Времена релаксации являются характеристикой среды – изменяются при любом изменении среды. Это относится к неоспоримому преимуществу использования данного прибора по сравнению с магнитным расходомером [18]. Контакт измерительных элементов с текущей средой в конструкциях ЯМР-расходомеров-релаксометров полностью исключён.

Единственным условием применения всех измерителей на основе ЯМР являются ядра с магнитными моментами в среде [13–19]. В табл. 1 представлены характеристики ядер, используемых в ЯМР-спектроскопии: изотоп ядра; μ – магнитный момент; I – спин ядра; γ – гиромагнитное отношение; $I_{\text{отн}}/^{13}\text{C}$ – чувствительность (отношение относительной интенсивности ЯМР-сигнала к изотопу ядра углерода ^{13}C); $C_{\text{пр}}$ – природное содержание. Из анализа данных табл. 1 следует, что ЯМР-расходомеры-релаксометры можно использовать для измерения значений q_T , T_1 , T_2 , как для расплава Pb-Bi, так и для расплава Na.

В большинстве разработанных конструкций ЯМР-расходомеров-релаксометров используется импульсный метод регистрации сигнала ЯМР с использованием эффекта спинового эха [12, 16, 17, 20, 21]. Для его применения необходим единый прямолинейный участок трубопровода, как для намагничивания текущей среды, так и для измерения её расхода и времён T_1 , T_2 , поскольку турбулентность увеличивает погрешности измерения этих параметров [16, 17, 20–22]. Необходимое для измерения время t_p нахождения жидкости в системе импульсного ЯМР-расходомера-релаксометра для измерения значений q , T_1 , T_2 можно оценить по соотношению

$$t_p = t_n + t_c + t_1 + t_m + t_2, \quad (1)$$

где t_n – время полной намагниченности текущей жидкости; t_c – время прохождения текущей жидкостью соединительного

Таблица 1

Характеристики ядер для ядерно-магнитной спектроскопии

Изотоп	μ	I	γ , МГц/Тл	$I_{\text{отн}}/^{13}\text{C}$	$C_{\text{пр}}$, %
^1H	2,7928	1/2	42,57637513	$5,87 \cdot 10^3$	99,989
^2H	0,8574	1	6,560085	$5,52 \cdot 10^{-3}$	0,0155
^7Li	3,2564	3/2	16,561322	$1,59 \cdot 10^3$	92,41
^{11}B	2,6886	3/2	13,675834	$7,77 \cdot 10^2$	80,11
^{13}C	0,7024	1/2	10,707945	1,0	1,07
^{15}N	–0,2851	1	4,333247	$2,25 \cdot 10^{-3}$	0,368
^{19}F	2,6266	1/2	40,106214	$4,89 \cdot 10^3$	100,0
^{23}Na	2,2176	3/2	11,277214	$5,45 \cdot 10^2$	100,0
^{29}Si	–0,5552	1/2	8,496837	2,16	4,68
^{31}P	1,1316	1/2	17,253987	$3,91 \cdot 10^3$	100,0
^{33}S	0,6438	3/2	3,283846	0,101	0,76
^{35}Cl	0,8218	3/2	4,192008	7,69	75,78
^{37}Cl	0,6841	3/2	3,489402	8,87	24,22
^{55}Mn	3,4677	5/2	10,567234	10,5	100
^{65}Cu	2,3845	3/2	12,134765	8,76	31,1
^{75}As	1,4394	3/2	7,342051	$1,49 \cdot 10^2$	100,0
^{77}Se	0,5350	1/2	8,187478	3,15	7,61
^{81}Br	2,2696	3/2	11,532617	6,27	49,4
^{115}In	5,5006	9/2	9,331453	$2,18 \cdot 10^3$	4,5
^{119}Sn	–1,0473	1/2	16,025042	2,66	8,59
^{195}Pt	0,6095	1/2	9,326623	0,207	33,83
^{199}Hg	0,5058	1/2	7,740854	9,89	13,18
^{210}Pb	0,5822	1/2	8,908461	0,118	22,11
^{209}Bi	4,0796	9/2	6,657445	0,107	100

участка трубопровода между магнитом-поляризатором для предварительной намагниченности жидкости и магнитом-анализатором, в котором регистрируется сигнал ЯМР; t_1 – время нахождения текущей жидкости в магните-анализаторе для измерения расхода q и времени T_1 ; t_m – время между измерениями времён T_1 и T_2 для запуска новой последовательности импульсов; t_2 – время нахождения текущей жидкости в магните-анализаторе для измерения T_2 .

Для полной намагниченности текущей жидкости необходимо соблюдать условия $t_1 > 3T_1$ [8, 13, 14], $t_c > 0,5$ с (в типовых конструкциях ЯМР-расходомеров-релаксметров расстояние между магнитами составляет 15–25 см) [16, 17, 20–22]. Для обеспечения измерений расхода q , времени T_1 с погрешностью не более 1,5 % требуется время $t_1 > 2T_1$, для измерений T_2 с той же погрешностью – время $t_2 > 5T_2$ [16, 17, 20–22]. Для всех моделей импульсных ЯМР-расходомеров-релаксметров $t_m = 0,5$ с.

Проверим предложенную авторами настоящей статьи оценку t_p для сорта тяжёлой нефти (Татнефть, Россия). Измеренные при температуре окружающей среды $T < 22,3$ °C значения времён релаксации составили $T_1 = (2,031 \pm 0,020)$ с, $T_2 = (0,892 \pm 0,008)$ с. В этом случае получим время $t_p > 15,5$ с нахождения нефти в трубопроводе длиной около 6,3 м при средней скорости течения 40 см/с. Длина трубопровода в импульсном ЯМР-расходомере-релаксметре соответствует размерам приборов представленных в [16, 17, 20, 21]. Такие размеры прибора уже превышают требуемые значения для измерительных систем подвижного объекта. Но основная проблема состоит в следующем. С увеличением температуры T возрастают значения T_1 и T_2 . Температура теплоносителя в реакторах варьируется в диапазоне 490–500 °C. Промышленных приборов для измерения T_1 и T_2 конденсированных сред при таких значениях T нет. Авторы настоящей статьи используют промышленный ЯМР-релаксметр Minispec mq 20M (BRUKER, Германия) с калориметрическим блоком, который позволяет измерять при температурах до 120 °C. В других промышленных ЯМР-релаксметрах обеспечиваются измерения времен релаксации при более низких T . Температуры плавления свинца, висмута и натрия порядка 347 °C, 272 °C и 98,86 °C соответственно. Необходимо

также отметить, что значения T_1 , T_2 натрия выше, чем свинца и висмута. Поэтому при измерениях импульсным ЯМР можно без проблем заменить ядра натрия на ядра свинца или висмута. На рис. 1 представлены температурные зависимости изменения значений T_1 , T_2 натрия в присутствии воздуха. Исследован характер изменения времён релаксации при переходе среды из твёрдого состояния в жидкое (расплав при $T = 98,86$ °C). При этом для температур менее 120 °C результаты измерений T_1 , T_2 получены с использованием ЯМР-релаксметра Minispec mq 20M, для температур выше 120 °C характерные изменения зависимостей T_1 , T_2 экстраполированы в область более высоких температур (до 500 °C) с использованием разработанной авторами настоящей статьи математической модели. Использование подобной модели экстраполяции для определения температурного изменения теплоёмкости воды C и сопоставления результатов экстраполяции с экспериментальными данными показало, что погрешность определения C при $T \approx 500$ °C составляет порядка 6–7 %. Этого достаточно для оценки возможностей использования импульсных ЯМР-расходомеров-релаксметров в текущем расплаве натрия. Определённые при экстраполяции значения времён релаксации при $T = 500$ °C составили $T_1 = (6,34 \pm 0,44)$ с, $T_2 = (4,29 \pm 0,30)$ с. В этом случае $t_p > 61$ с. В моделях реакторов СВБР-100 средняя скорость течения теплоносителя по трубопроводу составляет 10–20 см/с (в зависимости от диаметра трубопровода). По правилам эксплуатации АЭС необходимо учитывать критический случай, при котором для измерений в импульсном ЯМР-расходомере-релаксметре необходимо использовать прямолинейный участок трубопровода длиной более 12,5 м. Обеспечить такое расстояние в защитной зоне реактора подвижного объекта является крайне сложной задачей. Это намного превышает все допустимые габаритные размеры измерительных систем.

Поэтому авторами настоящей статьи на основе анализа различных данных о конструкциях ЯМР-расходомеров [4, 7, 11, 13, 16, 17, 20–22] и результатов исследований [8, 23, 24] разработана конструкция лабораторного ЯМР-расходомера-релаксметра меточного типа, структурная схема представлена на рис. 2. Текущая среда по трубопроводу поступает в сосуд-поляризатор СП, расположенный в магнитной системе с магнитом-поляризатором МП, которая создаёт сильное неоднородное магнитное поле с индукцией $B_n = 1,532$ Тл с неоднородностью $0,02$ см⁻¹ в зазоре между полюсными наконечниками. В этом сосуде среда приобретает вектор ядерной намагниченности M_n , параллельный вектору B_n . Далее из сосуда-поляризатора текущая среда по соединительному участку трубопровода диаметром $d_1 = 50$ мм поступает в катушку нутации КН. В катушке нутации под действием резонансного переменного радиополя напряжённостью H_1 изменяется ориентация вектора ядерной намагниченности M_n относительно направления вектора B_n – жидкость получает «отметку» [8, 13, 23, 24]. Это изменение ориентации вектора M_n после прохождения жидкостью измерительного участка трубопровода фиксируется катушкой регистрации КР сигнала ЯМР, расположенной в поле магнита-анализатора МА с индукцией $B_a = 0,453$ Тл

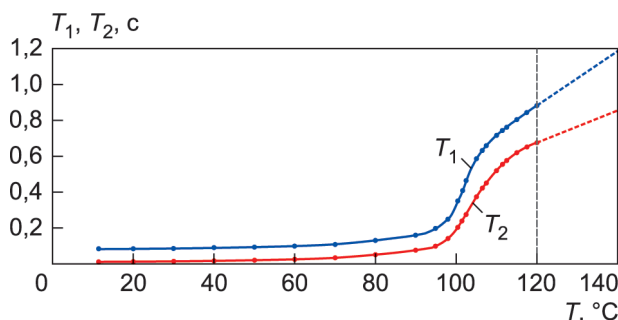


Рис. 1. Изменение времён продольной T_1 и поперечной T_2 релаксаций натрия от температуры T

Fig. 1. The change in the times of longitudinal T_1 and transverse T_2 relaxation of sodium on temperature T

(неоднородность $0,001 \text{ см}^{-1}$, $d_a=110 \text{ мм}$), подключённой к высокочастотному генератору слабых колебаний (автодину), входящему в состав схемы регистрации *СП* [23–25]. Для регистрации сигнала ЯМР в разработанной конструкции меточного ЯМР-расходомера-релаксометра используется модуляционная методика (поле магнита-анализатора модулируется переменным магнитным полем с индукцией B_{m-a} и частотой f_{m-a}). Для этого применяются катушки модуляции магнита-анализатора *КММА*, на которые от радиочастотного генератора *РЧГ* поступает сигнал ($f_{m-a}=0,01...100 \text{ Гц}$). В моменты прохождения магнитного поля B_a через резонанс регистрируется сигнал ЯМР. На рис. 3 представлен зарегистрированный сигнал ЯМР от текущего потока водопроводной воды на резонансной частоте протонов.

Для повышения отношения сигнал/шум S/N регистрируемого сигнала ЯМР, а следовательно, и точности измерений, изготовлен сосуд-анализатор специальной формы в виде цилиндра диаметром 100 мм , на котором расположена катушка регистрации. Для измерения расхода q_T теплоносителя в разработанной конструкции меточного ЯМР-расходомера-релаксометра на резонансной частоте ядер натрия $f_{Na}=5108578 \text{ Гц}$ регистрировались два сигнала ЯМР от водного раствора гидроксида натрия NaOH – с инверсией и без инверсии намагниченности (рис. 4, а, б). Во время измерения q_T теплоносителя (расплав натрия) в первом контуре реактора концентрация ядер натрия в теплоносителе минимум на два порядка больше, чем в растворе NaOH . Это повышает отношение S/N регистрируемого сигнала ЯМР минимум в 100 раз.

Полная инверсия намагниченности – поворот её вектора на угол $\varphi_n=180^\circ$ – происходит на резонансной частоте f_n радиополя напряжённостью H_1 . Частота f_n связана с магнитным полем напряжённостью H_0 , в котором находится катушка нутации [8, 13, 23–25]:

$$f_n = \gamma H_0, \quad (2)$$

где γ – гиромагнитное отношение ядер.

Максимальное значение S/N сигнала ЯМР с инверсией намагниченности в схеме регистрации (см. рис. 2) соответствует некоторой амплитуде радиополя H_1 в катушке нутации с частотой f_n , которая определяется в соответствии с (2). Схема автоматической подстройки частоты, расположенная в схеме обработки и управления *СОУ*, подстраивает частоту f_n генератора нутации под максимальное значение S/N .

В разработанном приборе используется следующий метод измерения расхода. Инверсия намагниченности в текущей

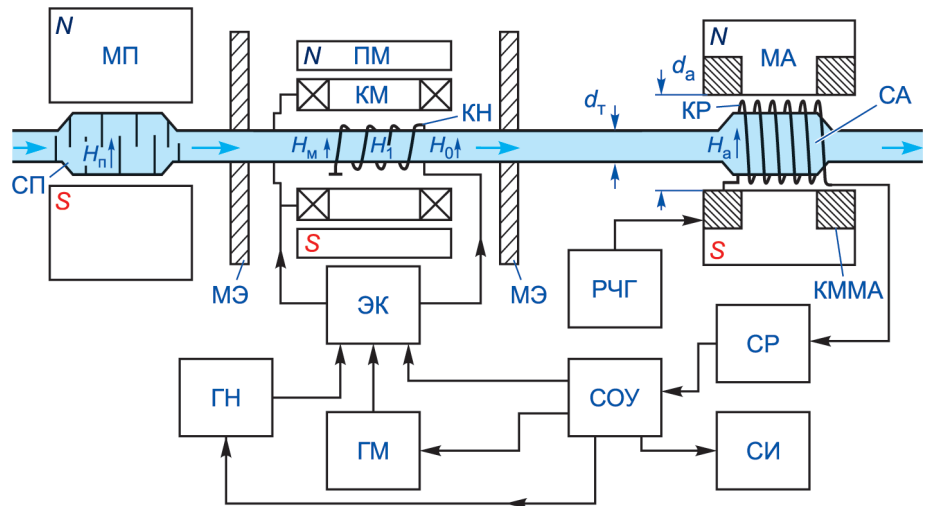


Рис. 2. Структурная схема лабораторного макета меточного ЯМР-расходомера-релаксометра:

МП – магнит-поляризатор; *СП* – сосуд-поляризатор; *КН* – катушка нутации; *КМ* – катушки модуляции; *ГН*, *ГМ* – генераторы катушек нутации и модуляции соответственно; *СА* – сосуд-анализатор; *КММА* – катушки модуляции поля магнита-анализатора; *МА* – магнит-анализатор; *КР*, *СП* – соответственно катушка и схема регистрации сигнала ЯМР; *СОУ* – схема обработки и управления; *ЭК* – электронные ключи; *РЧГ* – радиочастотный генератор; *СИ* – схема индикации; *МЭ* – магнитный экран; *ПМ* – постоянный магнит; H_n , H_m , H_a – напряжённости полей *СП*, *КМ*, *МА* соответственно

Fig. 2. Structural diagram of the laboratory model of NMR label flow meter and relaxometer: *PM* – polarizer magnet; *PV* – polarizer vessel; *NC* – nutation coil; *MC* – modulation coils; *GN*, *GM* – generators of nutation and modulation coils; *AV* – analyzer vessel; *CMAM* – coils for modulating the field of the analyzer magnet; *AM* – analyzer magnet; *CR* – coil for recording NMR signal; *CrR* – circuit for recording an NMR signal; *PCD* – processing and control diagram; *EK* – electronic keys; *RFG* – radio frequency generator; *IC* – indication circuit; *MS* – magnetic shield; *CM* – constant magnet; H_p , H_m , H_a – field strengths *PV*, *MC*, *AM*, respectively

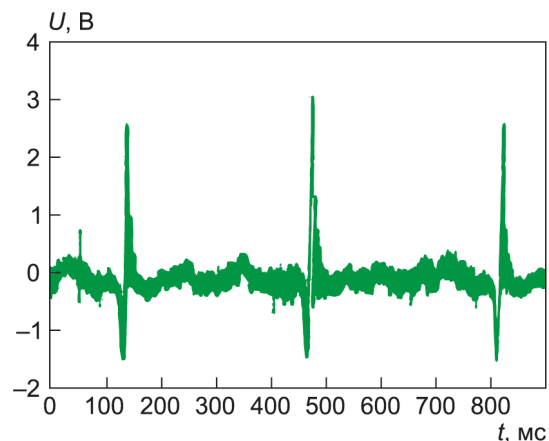


Рис. 3. Сигнал ЯМР от водопроводной воды, зарегистрированный на резонансной частоте протонов $f_p=19287097 \text{ Гц}$ при $T=21,4^\circ\text{C}$; частота модуляции поля магнита-анализатора $f_{m-a}=1,48 \text{ Гц}$

Fig. 3. The NMR signal from tap water, registered at the resonant frequency of protons $f_p=19287097 \text{ Hz}$ at $T=294.4 \text{ K}$; frequency of modulation of the field of the magnet analyzer 1.48 Hz

среде формируется в катушке нутации и через определённый промежуток времени t_n поступает в катушку регистрации, где записывается сигнал ЯМР с инверсией намагниченности

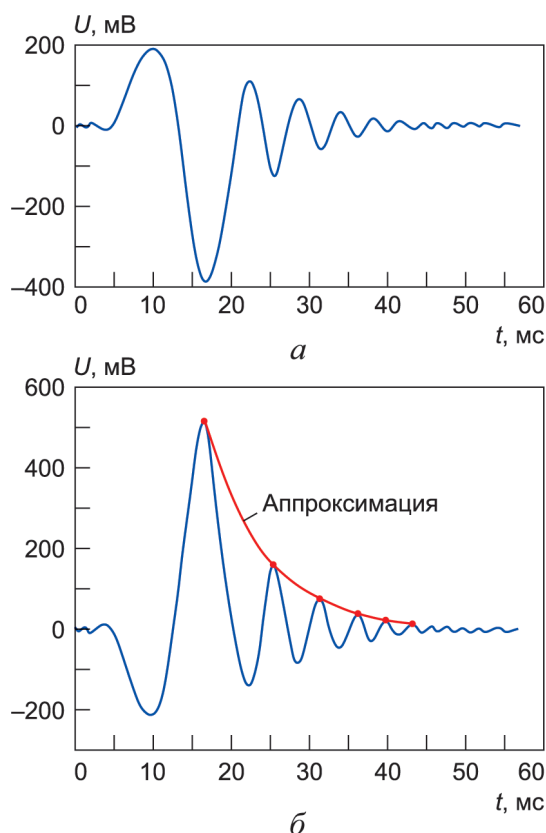


Рис. 4. Формы линий ЯМР-сигналов с инверсией намагниченности (а) и без инверсии (б), полученных от водного раствора гидроксида натрия при $T=21,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте магнита-анализатора $f_{m-a}=10\text{ Гц}$ и зарегистрированных на резонансной частоте ядер натрия $f_{Na}=5108578\text{ Гц}$

Fig. 4. The line shapes of NMR signals registered at the resonant frequency of sodium nuclei $f_{Na}=5108578\text{ Hz}$ from an aqueous solution of sodium hydroxide at $T=294.3\text{ K}$ $f_{m-a}=10\text{ Hz}$, is with magnetization inversion (a); isn't to inversion (b)

(см. рис. 4, а). После регистрации в схеме обработки и управления вырабатывается импульс, который размыкает один из электронных ключей. В катушку нутации перестаёт поступать синусоидальное напряжение генератора нутации. С этого момента в катушке нутации не происходит инверсия намагниченности текущей среды. Через некоторое время текущая среда без инверсии намагниченности поступает в катушку регистрации. После регистрации сигнала ЯМР без инверсии намагниченности (см. рис. 4, б) в схеме обработки и управления вырабатывается прямоугольный импульс, который замыкает один из электронных ключей и в катушку нутации поступает синусоидальное напряжение генератора нутации. В этой катушке формируется инверсия намагниченности текущей среды и т. д. В этом случае информация о расходе теплоносителя представляется в виде прямоугольного импульса длительностью t_n , а расход определяется по формуле

$$q = V_c / t_n, \quad (3)$$

где V_c – объём соединительного участка трубопровода между катушками нутации и регистрации.

Погрешность измерения расхода Δq (может быть достаточно большой – более 1 %) обусловлена стабильностью уровней срабатывания компараторов в схеме управления из-за различия амплитуды сигналов ЯМР с инверсией намагниченности и без неё (см. рис. 4) и зависимостью амплитуды от значения q . Кроме того, Δq связана с погрешностью определения объёма V_c , которая при всех допустимых погрешностях измерения внутреннего диаметра трубопровода и расстояния между катушками нутации и регистрации составляет менее 0,2 %. Поэтому в зоне размещения катушки нутации с помощью катушек модуляции КМ (см. рис. 2) реализована дополнительная модуляция магнитного поля H_0 переменным магнитным полем с индукцией B_m и частотой f_m . Магнитное поле H_0 создаётся постоянным магнитом ПМ. Регулируя значения B_m , f_m , можно добиваться, чтобы амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности была на уровне шумов [23, 25]. Это позволяет установить уровень срабатывания компараторов в автоматическом режиме по половине амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР. В этом случае в схеме обработки и управления для измерения расхода будет формироваться меандр (вклад погрешности уровня срабатывания компараторов в Δq будет менее 0,5 %).

В рамках описанной выше методики измерений намагничивать жидкость можно в участке трубопровода любой конфигурации. Для измерений расхода q с учётом формулы (2) требуется прямолинейный участок трубопровода, на который наматываются катушки нутации и регистрации и который содержит мерный объём V_c (длина соединительного участка трубопровода не более 30 см). Чтобы исключить влияние полей постоянного магнита на однородность поля в магните-анализаторе, между ними установлен магнитный экран МЭ (см. рис. 2). Для размещения катушки нутации достаточно прямолинейного участка трубопровода длиной 10 см.

Для измерения времени поперечной релаксации T_2 применяется аппроксимация по спаду свободной индукции (уменьшение амплитуды пиков в регистрируемом сигнале ЯМР, см. рис. 4, б) с использованием функции [26, 27]:

$$U(t) = U_0 \exp(-t/T_2^*) \cos(at^2/2); \quad (4)$$

$$a = \gamma \frac{dH_z}{dt} = d \frac{\Delta\omega}{dt}, \quad (5)$$

где U_0 – максимальное значение амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР; T_2^* – эффективное время поперечной релаксации; a – скорость изменения расстройки магнитного поля; H_z – напряжённость магнитного поля в направлении z ; ω – частота сканирования магнитного поля.

Время поперечной релаксации текущей среды находят из выражения [26, 27]:

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{\gamma \Delta B_a}{\pi}, \quad (6)$$

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

Таблица 2

Результаты измерения расхода, см³/с, водного раствора NaOH

η_i	ЯМР-расходомер-релаксометр	WATERFLUX 3050
1	422,3±3,3	420,2±3,2
2	1004,4±8,0	1001,7±7,5
3	1407,8±11,2	1409,1±10,6
4	1695,3±13,6	1692,5±12,7
5	2107,4±16,8	2111,2±15,8
6	2304,1±18,4	2297,1±17,2
7	2695,4±21,6	2682,3±20,1
8	3009,5±24,1	3021,7±22,6
9	3682,3±29,5	3661,3±27,4
10	4004,6±32,0	3978,9±29,8
11	4207,6±33,6	4232,7±31,7
12	4862,6±38,9	4824,9±36,1

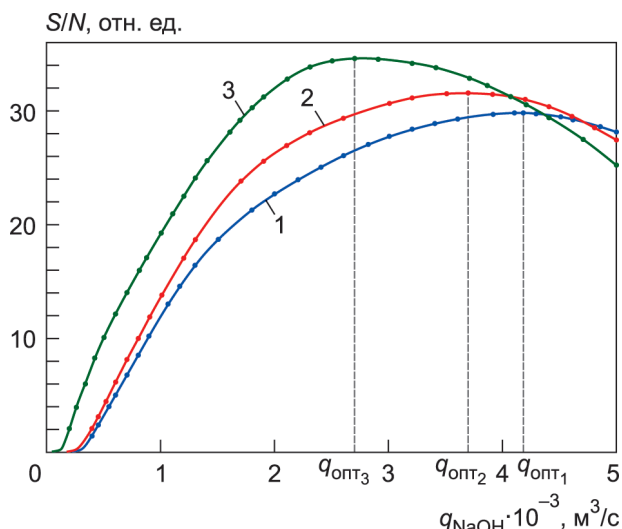


Рис. 5. Зависимости изменения отношения сигнал/шум S/N от расхода q_{NaOH} водного раствора гидроксида натрия NaOH при температурах 21,3 °C, 33,4 °C, 52,6 °C – кривые 1–3 соответственно

Fig. 5. The dependence of S/N change from expenditure q_{NaOH} a water solution of sodium hydroxide NaOH. The charts 1, 2 and 3 corresponds the value T in K: 294.3, 306.4, 325

При малых значениях ΔB_a вкладом этого слагаемого в формулу (6) при определении времени T_2 можно пренебречь, тогда $T_2 \approx T_2^*$. Время T_2 можно сразу определить по зарегистрированному сигналу ЯМР. В процессе эксплуатации АЭС в теплоноситель могут попадать различные примеси (окалина, масло вследствие износа главного центрального насоса или различные кусочки трубопровода по причине деградации трубы или сварного соединения). Поэтому для контроля состояния теплоносителя разработанным ЯМР-расходомером-релаксометром необходимо измерять значения двух времён релаксации T_1 , T_2 , так же, как и при использовании импульсных ЯМР-расходомеров для контроля состояния различных углеводородов [16, 17, 20–22]. Для измерения значения времени продольной релаксации T_1 в конструкции ЯМР-расходомера-релаксометра используется предложенный авторами настоящей статьи метод двух режимов модуляции поля B_a [28]. Этот метод успешно применяется в созданных авторами ЯМР-спектрометрах и ЯМР-релаксометрах для экспресс-контроля состояния конденсированных сред.

Реализация в конструкции ЯМР-расходомера-релаксометра меточного метода измерения q , а также двух методов измерения констант релаксации с использованием модуляционной методики позволила сократить до $2,5T_2$ необходимое для измерений q , T_1 , T_2 время нахождения текущей среды в катушке регистрации. Увеличение диаметра сосуда-анализатора в два раза по сравнению с диаметром соединительного трубопровода дало возможность в два раза уменьшить скорость протекания среды в катушке. При этом для измерений разработанным прибором требуется прямолинейный участок трубопровода длиной не более 1,6 м. Такие длины трубопроводов и размеры магнитных систем позволяют разместить созданный ЯМР

в зоне ядерного реактора, где невозможно использовать импульсные ЯМР-расходомеры и ЯМР-релаксометры.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Исследовали основной интересующий параметр при изучении явления ЯМР – отношение S/N регистрируемого сигнала меточного ЯМР. На рис. 5 представлены температурные зависимости изменения S/N от расхода q_{NaOH} водного раствора гидроксида натрия NaOH. Сигнал ЯМР регистрировали на резонансной частоте ядер натрия $f_{Na} = 5108578$ Гц. В результате получили соответствующие максимальному значению S/N регистрируемого сигнала ЯМР [8, 13, 23–25] значения оптимальных расходов водного раствора гидроксида натрия NaOH: $q_{opt1} = (4189,4 \pm 33,5) \text{ см}^3/\text{с}$; $q_{opt2} = (3698,3 \pm 29,6) \text{ см}^3/\text{с}$; $q_{opt3} = (2695,4 \pm 21,6) \text{ см}^3/\text{с}$ для температур 21,3 °C; 33,4 °C; 52,6 °C соответственно.

С увеличением T уменьшается оптимальный расход q_{opt} , но при этом медленно увеличивается отношение S/N . В какой-то момент для одного из оптимальных значений q_{opt} будет достигнут максимум S/N , так как параметры конструкции прибора не изменяются. Далее отношение S/N медленно уменьшается, низкая скорость процесса уменьшения, как и увеличения S/N обусловлена релаксацией. Поэтому при использовании разработанного прибора для измерения расхода теплоносителя на основе расплава натрия при $T = 500$ °C отношение $S/N > 5$, так как помимо медленного спада S/N значительно (минимум на два-три порядка) увеличивается концентрация ядер натрия по сравнению с водным раствором гидроксида натрия. С увеличением количества ядер с магнитными моментами увеличивается амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР от среды [13–28]. Отношение $S/N > 5$ в ЯМР-расходомерах-релаксометрах позволяет измерять различные параметры с погрешностью менее 1 % [8, 13, 16–25].

Для проверки достоверности результатов измерений расхода q_{NaOH} разработанным ЯМР-расходомером-релаксометром их сравнивали с результатами измерений расхода электромагнитным расходомером WATERFLUX 3050 (KROHNE, Германия). Погрешность измерения WATERFLUX 3050 на начальном этапе его эксплуатации при диаметрах трубопровода порядка

Таблица 3

Измеренные времена релаксации T_1 , T_2 водного раствора NaOH при различных температурах T

T , °C	ЯМР-расходомер-релаксометр		Minispec mq 20M	
	T_1 , мс	T_2 , мс	T_1 , мс	T_2 , мс
15,1	784,2±7,1	16,4±0,1	782,84±2,34	16,27±0,05
21,3	832,4±7,5	17,2±0,1	830,06±2,49	17,08±0,05
25,6	883,6±8,0	18,6±0,2	881,14±2,64	18,38±0,05
33,4	942,2±8,5	19,4±0,2	943,21±2,82	19,21±0,06
42,2	1083,7±9,7	22,6±0,2	1080,25±3,24	22,37±0,06
52,6	1294,3±11,6	27,1±0,3	1291,34±3,87	26,81±0,06
61,3	1534,6±13,8	36,2±0,3	1530,69±4,59	35,82±0,11
68,4	1845,7±16,6	58,4±0,5	1841,44±5,52	57,78±0,17
75,2	2436,8±22,1	89,6±0,8	2431,62±7,29	88,76±0,27

50 мм составляет менее 0,8 %. Результаты сравнения расходов, измеренных в трубопроводе экспериментального стенда при температуре 52,6 °C двумя приборами, представлены в табл. 2 (n_i – номер измерения), откуда следует, что измеренные значения расходов совпадают в пределах погрешности измерений.

Разработанным ЯМР-расходомером-релаксометром измерили значения времён релаксации T_1 , T_2 водного раствора гидроксида натрия NaOH при различных температурах T и сравнили их с результатами измерений промышленным ЯМР-релаксометром Minispec mq 20M. Сравнение полученных результатов представлено в табл. 3. Нагрев водного раствора на экспериментальном стенде с циркулярным насосом ограничен температурой 77,3 °C, поэтому последние значения T_1 , T_2 измерены при температуре 75,2 °C. Времена релаксации, измеренные двумя приборами, совпали в пределах погрешности измерений.

Закключение. Полученные результаты подтверждают, что разработанный авторами настоящей статьи ЯМР-расходомер-релаксометр меточного типа может быть успешно применён для контроля расхода и состояния теплоносителей на основе расплавов Pb-Bi или Na в ядерных реакторах для подвижных объектов, а также для перспективных вариантов теплоносителя на основе расплавов Li-Pb и Rb-Bi. Для определения значений q_T , T_1 , T_2 расплава на основе Rb-Bi при использовании разработанного прибора необходимо учитывать соотношение концентраций рубидия и висмута.

Полученные погрешности определения q_T , T_1 , T_2 и погрешности измерения q_B , C_B питательной воды могут обеспечить оптимальное значение k_H с погрешностью менее 3 % при работе реактора на высоких энергетических уровнях мощности в режиме наиболее эффективного отвода тепла от стержней реактора. Оптимизация k_H на 1 % увеличивает вырабатываемую парогенератором мощность минимум на 0,5 %. В случае подвижного объекта мощность, вырабатываемая парогенератором, увеличится минимум на 3,5 % (например, для стандартной атомной паропроизводящей установки с номинальной производительностью 240 т/ч

увеличение будет минимум на 8,3 т/ч в зависимости от модели, электрическая мощность увеличится от 1,6 до 2,1 МВт – ядерный реактор может обслуживать две такие установки).

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

1. Sergeev V., Anikina I., Kalmykov K., *Energies*, 2021, vol. 14, 2685. <https://doi.org/10.3390/en14092685>
2. 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.
3. Dong Z., Liu M., Jiang D., Huang X., Zhang Y., Zhang Z., *Energies*, 2018, vol. 11, 2782. <https://doi.org/10.3390/en11102782>
4. Гулевич А. В., Декусар В. М., Чебесков А. Н., Кучинов В. П., Волошин Н. П. Возможность экспорта быстрых реакторов в условиях международного режима ядерного нераспространения // Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 3. С. 171–176.
5. Elistratov V. V., Diuldin M. V., Denisov R. S., *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 180, no. 1, 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/180/1/012006>
6. Савченко А. В., Костылев В. П., Бобыль А. В., Шварц М. З., Евстигнеев М. А. Влияние толщины базы на эффективность фотопреобразования текстурированных солнечных элементов на основе кремния // Письма в Журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 19. С. 40–49. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.19.46681.17362>
7. Абрамов Л. В., Бакланов А. В., Бахметьев А. М. и др. Опыт АО «ОКБМ Африкантов» в развитии методов и программ анализа надежности и вероятностного анализа безопасности ядерных установок // Атомная энергия. 2020. Т. 129. № 2. С. 105–110.
8. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Величко Е. Н., Карсеев А. Ю. Волоконно-оптическая система имитации аварий в контурах охлаждения атомной энергетической установки // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 3. С. 4–9.
9. Lee K.-H., Kim M.-G., Lee J.I., Lee P.-S., *Energies*, 2015, vol. 8, 11470. <https://doi.org/10.3390/en81011470>
10. Семенухин А. В., Саунин Ю. В., Рясный С. И. Методика определения достоверности внутриреакторного контроля ВВЭР в режиме реального времени // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 1. С. 8–13.
11. Dayev Zh. A., Latyshev L. N., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, vol. 56, pp. 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.07.001>
12. Dong Z., Li B., Li J., Zhang Y., Zhang Z., *Energy*, 2021, vol. 221, 119906. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119906>

13. 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.
14. D'yachenko S. V., Zhernovoi A. I., *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 12, pp. 1835–1837. <https://doi.org/10.1134/S1063784216120112>
15. Gizatullin B., Gafurov M., Vakhin A., Rodionov A., Mamin G., Orlinskii S., Mattea C., Stapf S., *Energy and Fuels*, 2019, vol. 33, no. 11, 10923. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03049>
16. 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>
17. 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)
18. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Магнитный расходомер жидких металлов // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 24–28.
19. Неронов Ю. И., Серегин Н. Н. Определение разности экранирования протонов воды и водорода и оценка абсолютного экранирования протонов в воде // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 41–45.
20. 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>
21. Fridjonsson E. O., Stanwix P. L., Johns M. L., *Journal of Magnetic Resonance*, 2014, vol. 245, pp. 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2014.06.004>
22. Elkins C. J., Alley M. T., *Express Fluids*, 2007, vol. 43, pp. 823–858. <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0383-2>
23. Давыдов В. В. О некоторых особенностях исследования ядерным магнитным резонансом потоков жидких сред // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 121. № 1. С. 20–27. <https://doi.org/10.7868/S0030403416070096>
24. 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.
25. 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>
26. Leshe A., *Nuclear induction*, Veb Deutscher Verlag Der Wissenschaften, Berlin, 1963, 864 p.
27. Абрагам А. Ядерный магнетизм / Пер. с англ. под ред. Г. В. Скроцкого. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 551 с.
28. 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.
2. 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>
3. Dong Z., Liu M., Jiang D., Huang X., Zhang Y., Zhang Z., *Energies*, 2018, vol. 11, 2782. <https://doi.org/10.3390/en11102782>
4. Gulevich A. V., Dekusar V. M., Chebeskov A. N., Kuchinov V. P., Voloshin N. P., *Atomic Energy*, 2020, vol. 127, no. 3, pp. 192–195. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00609-3>
5. Elistratov V. V., Diuldin M. V., Denisov R. S., *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 180, no. 1, 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/180/1/012006>
6. Sachenko A. V., Kostilyov V. P., Bobyl A. V., Shvarts M. Z., Evstigneev M. A., *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44, no. 10, pp. 873–876. <https://doi.org/10.1134/S1063785018100139>
7. Abramov L. V., Baklanov A. V., Bakmetiev A. M., Kiselev V. V., *Atomic Energy*, 2020, vol. 129, no. 2, pp. 103–108. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00611-2>
8. Davydov V. V., Dudkin V. I., Velichko E. N., Karseev A. Yu., *Journal of Optical Technology*, 2015, vol. 82, no. 3, pp. 132–135. <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000132>
9. Lee K.-H., Kim M.-G., Lee J.-I., Lee P.-S., *Energies*, 2015, vol. 8, 11470. <https://doi.org/10.3390/en81011470>
10. Semenikhin A. V., Saunin Y. V., Rysnyi S. I., *Atomic Energy*, 2018, vol. 124, no. 1, pp. 8–13. <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0367-8>
11. Dayev Zh. A., Latyshev L. N., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, vol. 56, pp. 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.07.001>
12. Dong Z., Li B., Li J., Zhang Y., Zhang Z., *Energy*, 2021, vol. 221, 119906. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119906>
13. 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>
14. D'yachenko S. V., Zhernovoi A. I., *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 12, pp. 1835–1837. <https://doi.org/10.1134/S1063784216120112>
15. Gizatullin B., Gafurov M., Vakhin A., Rodionov A., Mamin G., Orlinskii S., Mattea C., Stapf S., *Energy and Fuels*, 2019, vol. 33, no. 11, 10923. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03049>
16. 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>
17. 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)
18. Velt I. D., Mikhailova Yu. V., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 283–288. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0196-z>
19. Neronov Y. I., Seregin N. N., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 55, no. 11, pp. 1287–1293. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0123-3>
20. 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>

References

1. Sergeev V., Anikina I., Kalmykov K., *Energies*, 2021, vol. 14, 2685. <https://doi.org/10.3390/en14092685>

21. Fridjonsson E. O., Stanwix P. L., Johns M. L., *Journal of Magnetic Resonance*, 2014, vol. 245, pp. 110–115.
<https://doi.org/10.1016/j.jmr.2014.06.004>
22. Elkins C. J., Alley M. T., *Express Fluids*, 2007, vol. 43, pp. 823–858. <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0383-2>
23. Davydov V. V., *Optics and Spectroscopy*, 2016, vol. 121, no. 1, pp. 18–24. <https://doi.org/10.1134/S0030400X16070092>
24. 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>
25. 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>
26. Leshe A., *Nuclear induction*, Veb Deustscher Verlag Der Wissenschaften, Berlin, 1963, 864 p.
27. Abragam A., *The principles of nuclear magnetism*, Oxford, Clarendon Press, 1961, 599 p.
28. Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Y., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 912–918.
<https://doi.org/10.1007/s11018-014-0559-0>

Статья поступила в редакцию 23.01.2022; одобрена после рецензирования 03.02.2022; принята к публикации 16.02.2022.
The article was submitted 23.01.2022; approved after reviewing 03.02.2022; accepted for publication 16.02.2022.