



© Коллектив авторов,
2024



УДК 622.24.063:543.427.4
<https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-2-116-129>

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ РАБОТ МОДУЛЯ ДЛЯ ПОТОКОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ШЛАМА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

М.М. Хасанов¹, М.А. Черевко², А.Ю. Губарев³, С.В. Лахтионов^{1,*}, И.С. Чумаков², Д.М. Чукин⁴, Е.Н. Ишметьев⁴

¹Группа компаний «Газпром нефть», РФ, Санкт-Петербург

²ООО «Нефтесервисные решения», РФ, Санкт-Петербург

³ООО «Инженерно-Технологический Сервис», РФ, Ноябрьск

⁴Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, РФ, Магнитогорск

Электронный адрес: ProNeft@gazprom-neft.ru

Цель работы заключается в представлении результатов реализации технологического проекта группы компаний «Газпром нефть» в сотрудничестве с МГТУ им. Г.И. Носова по созданию модуля потокового измерения химического состава бурового шлама методом РФА.

Материалы и методы. Отбор и изучение шлама во время бурения скважин является важной, неотъемлемой частью геолого-технологических исследований и сбора геологической информации для изучения литологической характеристики разреза и признаков нефтеносности в нем. При этом информация о химическом составе разбуриваемых пород может быть получена только после проведения специальной подготовки отобранных проб шлама и их лабораторного анализа, что исключает возможность ее оперативного применения во время строительства скважин. Поэтому разработка данного технологического решения является актуальной задачей, требующей оперативного решения.

Результаты. В статье приводится анализ возможности потокового определения качественного и количественного содержания элементов в выбуренном шламе методом РФА на спектрометре CON-X 02 с указанием предела обнаружения и относительной погрешности, а также анализ результатов определения элементного состава шлама на одной из скважин группы компаний «Газпром нефть» в интервале от 3673,2 до 4921,2 м с применением разработанного модуля анализа шлама методом РФА.

Заключение. Доказана работоспособность разработанного модуля потокового измерения химического состава бурового шлама методом РФА в промышленных эксплуатационных условиях и потенциальная эффективность его применения.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентный анализ, буровой раствор, шлам, потоковые измерения, непрерывные измерения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы благодарят Злобина Максима Сергеевича, руководителя программы, и Хомицкого Александра Николаевича, руководителя направления по инновационному развитию группы компаний «Газпром нефть», за помощь при проведении опытно-промышленных работ.

Для цитирования: Хасанов М.М., Черевко М.А., Губарев А.Ю., Лахтионов С.В., Чумаков И.С., Чукин Д.М., Ишметьев Е.Н. Результаты опытно-промышленных работ модуля для потокового определения элементного состава шлама методом рентгенофлуоресцентного анализа. PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024;9(2):116–129. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-2-116-129>

Статья поступила в редакцию 23.10.2023

Принята к публикации 11.12.2023

Опубликована 28.06.2024

RESULTS OF EXPERIMENTAL AND INDUSTRIAL WORK OF THE MODULE
FOR STREAM DETERMINATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF CUTTINGS
BY X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS

Mars M. Khasanov¹, Mikhail A. Cherevko², Alexey Y. Gubarev³, Sergey V. Lakhtionov^{1,*}, Ivan S. Chumakov², Dmitry M. Chukin⁴, Evgeny N. Ishmetiev⁴

¹Gazprom neft company group, RF, Saint Petersburg

²Oilfield service solutions LLC, RF, Saint Petersburg

³Engineering and Technological Service LLC, RF, Saint Petersburg

⁴Magnitogorsk State Technical University, RF, Magnitogorsk

E-mail: ProNeft@gazprom-neft.ru

The aim: to present the results of the implementation of the technological project of Gazprom нефт company group in cooperation with Nosov Moscow State Technical University on the creation of a module for the flow measurement of the chemical composition of drilling mud by the XFA method.

Materials and methods. The selection and study of cuttings during drilling is an important, integral part of geological and technological research and the collection of geological information to study the lithological characteristics of the section and signs of oil content in it. At the same time, information on the chemical composition of the drilled rocks can be obtained only after special preparation of the selected samples of cuttings and their laboratory analysis, which excludes the possibility of its operational use during the construction of wells. Therefore, the development of this technological solution is an urgent task that requires an operational solution.

Results. The article provides an analysis of the possibility of stream determination of the qualitative and quantitative content of elements in the drilled sludge by the XRF method on the CON-X 02 spectrometer with indication of the detection limit and relative error. And analysis of the results of determination of the elemental composition of the cuttings at well Gazprom нефт company group of Companies in the range from 3673.2 m to 4921.2 m using the module of flow measurement of the chemical composition of drilling mud by the XFA method.

Conclusion. The efficiency of the developed module for the flow measurement of the chemical composition of drilling mud by the XFA method in industrial operating conditions and the potential effectiveness of its application have been proven.

Keywords: X-ray fluorescence analysis, drilling mud, drilling mud, flow measurements, continuous measurements

Conflict of Interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgements: the authors thank Maxim Sergeevich Zlobin, the Head of the program, and Alexander Nikolaevich Khomitsky, the Head of the direction for Innovative Development of Gazprom нефт company group, for their assistance in carrying out pilot industrial works.

For citation: Khasanov M.M., Cherevko M.A., Gubarev A.Y., Lakhtionov S.V., Chumakov I.S., Chukin D.M., Ishmetyev E.N. Results of experimental and industrial work of the module for stream determination of the chemical composition of cuttings by x-ray fluorescence analysis. PRONEFT. Professionally about oil. 2024;9(2):116–129. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-2-116-129>

Manuscript received 23.10.2023

Accepted 11.12.2023

Published 28.06.2024

ВВЕДЕНИЕ

Отбор и изучение шлама во время бурения скважин является важной, неотъемлемой частью геолого-технологических исследований и сбора геологической информации для изучения литологической характеристики разреза и признаков нефтеносности в нем. При этом информация о химическом составе разбуриваемых пород может быть получена только после проведения специальной подготовки (промывки, сушки, измельчения) отобранных проб шлама и их лабораторного анализа, что исключает возможность ее оперативного применения во время строительства скважин.

В поисках решения этой проблемы группой компаний «Газпром нефть» в сотрудничестве с МГТУ им. Г.И. Носова были проведены исследования возможности применения метода рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в потоке для определения содержания отдельных химических элементов в буровом шламе [1].

На основании успешных результатов проведенных исследований запущен технологический проект по разработке модуля анализа

шлама, инновационного продукта потокового (непрерывного) измерения химического состава бурового шлама методом РФА. Проект реализован группой компаний «Газпром нефть» в сотрудничестве с МГТУ им. Г.И. Носова и направлен на расширение функционала станции геолого-технологических исследований (ГТИ). Реализация проекта заняла около 2,5 года в период с 2020 по 2023 год.

РАЗРАБОТАННЫЙ МОДУЛЬ ПОТОКОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БУРОВОГО ШЛАМА МЕТОДОМ РФА ПОКАЗАЛ СВОЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

МЕТОДЫ

В рамках реализации проекта для определения оптимальной конструкции модуля анализа шлама был проведен обзор литературных источников, патентный поиск и анализ рынка современных систем технологического контроля и учёта материалов в потоке. По результатам проведенной работы было выявлено следующее:

- одновременное определение всех химических элементов методом РФА невозможно ввиду близких энергий фотонов, излучаемых некоторыми элементами;
- наиболее приемлемым решением для конструирования модуля, работающего в условиях буровой, является использование энергодисперсионных SDD-детекторов с разрешением 160–190 эВ;
- пределы обнаружения и погрешности измерений возможно определить с помощью дополнительных исследований, а также стандартных образцов с диапазоном концентраций элементов в интересующих границах.

Учитывая изложенное, была проведена серия экспериментов по определению состава шлама методом РФА в потоке с использованием анализатора CON-X 02 на 15 образцах проб, отобранных в различных интервалах одной из скважин группы компаний «Газпром нефть».

Выбор анализатора CON-X 02 для проведения исследований обусловлен тем, что данное оборудование имеет полупроводниковый кремниевый детектор с достаточным энергетическим разрешением (160 эВ), что обеспечивает возможность регулирования расстояния от детектора анализатора до образца и подходит для анализируемого материала (шлам).

Для количественной калибровки анализатора CON-X 02 был проведен полный химический анализ исследуемых проб шлама методом атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС), результаты которого приведены в **табл. 1**.

По данным химического анализа было установлено, что наличие элементов-маркеров: Nb, U, Th, Mo, Co, Cu, Rb, Cd, Ge, Hf, As, Cl, Se, Ag, Au в образцах шлама не обнаружено. Основные пороодообразующие элементы Al и Si обнаружены с изменением концентрации для Al от 7,13 мас. % до 14,03 мас. %, для Si от 48,12 мас. % до 68,01 мас. %.

Для имитации потока бурового шлама при проведении РФА на анализаторе CON-X 02 специалистами МГТУ им. Г.И. Носова была разработана модель конвейера со следующим принципом работы: через воронку анализируемый шлам загружался на поверхность, движущуюся по спирали, на которой он разравнивался до нужной высоты с помощью планки-разравнивателя, далее полученный равномерный слой шлама с определенной скоростью, регулируемой частотным преобразователем перемещался в зону проведения РФА анализатора CON-X 02, после чего сбрасывался в сборочный контейнер.

С анализатора CON-X 02 были сняты спектры при напряжении рентгеновской трубки 30 кВ, силе тока 150 мкА и расстоянии между образцом и детектором, равным 55 мм. Набор спектра осуществляли в течение 360 с, так как сравнительный анализ спектров, набранных при различном времени, показал, что при времени набора менее 180 с теоретическая погрешность измерения элементов резко увеличивается, поэтому оптимальное время набора одного спектра было определено от 180 до 600 с. Для уменьшения влияния неоднородности поверхности пробы для каждого образца было снято по три спектра с последующим усреднением.

Анализ полученных спектров образцов показал, что для обнаружения легких элементов с порядковым номером меньше 18 по периодической таблице (в данном случае это Al, Si, S, P и Cl) мешало наличие воздушной прослойки между детектором анализатора и образцом, вследствие чего происходило сильное поглощение фотонов от легких элементов воздухом. Для уменьшения данного негативного эффекта, были сняты спектры при минимально возможном расстоянии между образцом и детектором на данном анализаторе — 15 мм.

Полученные спектры были обработаны с помощью программного комплекса MSPA_B для определения интенсивности характеристических линий элементов, а также линий когерентного и некогерентного рассеяния рентгеновской трубки. Основываясь на методе стандарта фона, были построены графики зависимости отношения интенсивности аналитической линии к линии некогерентного рассеяния характеристической линии анода рентгеновской трубки в зависимости от концентрации элемента в образце, которые позволили количественно определять содержание элементов.

По данным АЭС анализа проб шламов была проведена калибровка спектрометра по элементам: Al, Si, K, Ca, Mn, Fe, Ti, Zn, Sr, по остальным элементам калибровку осуществить не представлялось возможным из-за малого изменения концентраций и малого процентного содержания элемента в образце.

По результатам проведенных работ было определено следующее:

- одновременная идентификация легких и тяжелых элементов методом РФА в потоке затруднительна вследствие наложения K-линий спектров легких элементов и L-, M-линий спектров тяжелых элементов;
- оптимальное время набора одного спектра составляет от 180 с, при этом для определения элементов с низким процентным

Таблица 1. Сводная таблица содержания компонентов по образцам шлама в массовых процентах
Table 1. Summary table of the content of components according to samples of cuttings in mass percentages

Наименование элемента	Наименование компонента	Интервал отбора образца, м														
		150-160	390-400	650-660	770-780	890-900	900-910	920-930	990-1000	1120-1130	1350-1360	1440-1450	2150-2200	2350-2400	2650-2700	2950-3000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Al	Al ₂ O ₃	12,39	10,46	12,5	13,09	13,61	13,81	14,03	7,46	7,96	13,71	12,32	6,44	5,45	11,12	7,13
Ba	BaO	1,28	1,96	1,91	1,41	1,45	1,52	1,5	1,99	1,71	1,61	1,24	0,09	0,07	0,07	0,07
Ca	CaO	1,97	2,84	1,46	1,32	1,7	1,58	2,94	1,98	1,77	2,16	1,85	2,69	1,94	1,28	5,09
Co	CoO	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0
Cu	CuO	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	Fe ₂ O ₃	5,56	4,15	4,59	4,99	4,83	5,45	5,58	3,34	3,63	5,92	6,41	3,92	2,63	3,21	2,82
K	K ₂ O	1,89	1,74	1,73	1,89	1,72	5,19	5,1	3,22	3,45	5,27	1,82	4,25	4,19	5,01	4,71
Li	Li ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0	0	0,01	0
Mg	MgO	1,22	0,99	1,41	1,41	1,51	1,6	1,66	0,97	1,01	1,54	1,35	0,6	0,4	0,65	0,48
Mn	MnO ₂	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,02	0,03	0,07	0,1	0,09	0,06	0,07	0,07
Mo	MoS ₂	0	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nb	Nb ₂ O ₅	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	NiO	0	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Si	SiO ₂	61,24	60,82	64,47	61,78	58,69	57,8	56,11	65,02	66,18	53,92	48,12	62,36	68,01	57,64	54,75
Sr	SrO	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,07
Ti	TiO ₂	0,66	0,61	0,71	0,76	0,69	0,78	0,81	0,39	0,42	0,73	0,63	0,31	0,24	0,59	0,34
V	V ₂ O ₅	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Zn	ZnO	0,3	0,26	0,17	0,15	0,33	0,01	0,04	0,02	0,44	0,14	0,02	0,04	0,01	0,03	0,02
Zr	ZrO ₂	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
Re	Re ₂ S ₇	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	CO ₂	10,55	10,26	4,58	4,43	5,2	5,24	4,95	4,8	4,8	7,99	10,3	9,09	6,74	8,43	10,96
S	сульфид	0,95	2	1,08	0,98	0,96	1,01	1,04	0,91	0,94	0,83	1,55	0,05	0,03	0,07	0,03
Общее содержание, %		98,25	96,28	94,8	92,38	90,85	94,17	93,95	90,2	92,44	94,01	85,8	89,99	89,81	88,23	86,59

содержанием время набора спектра можно увеличить до 600 с;

- качественное определение средних и тяжелых элементов (в данном случае элементов-маркеров U, Th, Ge, Hf) методом РФА в потоке при низких напряжениях рентгеновской трубки не представляется возможным из-за недостаточной энергии рентгеновских квантов для возбуждения атомов и при использовании трубки, способной работать при высоких напряжениях (>40 кВ);
- определение количественного содержания S возможно при высоком содержании (более 30% м.д.) в образце и при использовании рентгеновской трубки с родиевым анодом;

- легкие элементы (с атомным номером <18, такие как Al, Si, S, Cl) можно определить более точно при малом расстоянии между образцом и детектором (15 мм) и работе рентгеновской трубки при низких напряжениях или с использованием фильтров;
- при использовании полупроводникового кремниевого детектора в рентгенофлуоресцентном анализаторе CON-X 02 возможно количественное определение Ca, K, Zn, Ti, Fe, Mn, Sr в потоке, при этом однозначное получение калибровочной зависимости для количественного определения элементов на всем диапазоне глубин возможно только для железа. Для остальных элементов однозначно можно было

установить только полуколичественную зависимость. Также необходимо определение однозначных маркеров для изменения коэффициентов калибровочных функций;

- подтверждена возможность определения качественного и количественного содержания элементов в выбуренном шламе (реальные образцы) методом РФА в потоке на спектрометре CON-X 02 с указанием предела обнаружения и относительной погрешности (табл. 2), на основе данного анализа разработаны требования к конструкции модуля анализа шлама и предполагаемый перечень определяемых химических элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С учетом результатов выполненных исследований разработана конструкция модуля анализа шлама, наиболее полно отвечающая всем предъявляемым требованиям, включая требования по взрыво-, пылевлагозащите и массогабаритным характеристикам.

В качестве источника первичного рентгеновского излучения в модуле анализа шлама выбрана металлокерамическая рентгеновская трубка с анодом из родия, оснащенная кожухом, обеспечивающим полную защиту от рентгеновского излучения и держателем, изготовленным из чистой меди, поддерживающим водяное, воздушное и кондуктивное охлаждение. В качестве приемника вторичного излучения пробы шлама в модуле установлен полупроводниковый кремниевый детектор, имеющий чип площадью 65 мм², коллимированный до 50 мм² активной области при помощи многослойного коллиматора, с толщиной активной области 450 мкм, обладающий очень низкой емкостью ASIC, имеющий встроенный элемент охлаждения Пельтье и бериллиевую мембрану толщиной 12,5 мкм. Регистрация вторичного излучения в модуле анализа шлама и первичная обработка данных выполняется цифровым импульсным процессором, оснащенным встроенным драйвером высокого напряжения и регулятором температуры для элемента Пельтье. Формирование пучка ионизирующего излучения и определение его направления, а также точное

Таблица 2. Возможность определения качественного и количественного содержания элементов в шламе методом РФА в потоке на спектрометре CON-X 02

Table 2. The possibility of determining the qualitative and quantitative content of elements in the cuttings by the X-ray method on the CON-X 02 spectrometer

Элемент	Возможность определения	Примечание	Предел обнаружения, %	Погрешность относительная, %		
				теоретическая	фактическая	
					расстояние 55 мм	расстояние 15 мм
1	2	3	4	5	6	7
Al	+	При условии, что анализатор будет располагаться от образца на расстоянии не более 15 мм	5	10/1	-	23,4
Ca	+	-	0,1	10/1	40	38,5
Fe	+	-	0,01	5/0,8	14	13,8
K	+/-	При отсутствии в пробе Cd, In	0,1	10/1	6	5
Mg	-	-	-	-	-	-
Mn	+	-	0,01	5/0,8	37	35,7
Si	+/-	При содержании Si в образце более 30 % и при условии, что анализатор будет располагаться от образца на расстоянии не более 15 мм	10	40	16	14,9
S	+/-	При условии, что анализатор будет располагаться от образца на расстоянии не более 15 мм, использовании рентгеновской трубки с родиевым анодом	0,1	30	Нет данных, требуются доп. исследования	
Ti	+	-	0,1	20/5	16	15,6
Na	-	-	-	-	-	-
Cr	+	-	0,01	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Nb	+	-	0,05	1	Нет данных, требуются доп. исследования	

Продолжение таблицы 2

Элемент	Возможность определения	Примечание	Предел обнаружения, %	Погрешность относительная, %		
				теоретическая	фактическая	
					расстояние 55 мм	расстояние 15 мм
1	2	3	4	5	6	7
Ni	+	-	0,01	1	Нет данных, требуются доп. исследования	
Sr	+	-	0,05	0,8	47	60
U	+	При использовании РТ с родиевым анодом	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
V	+/-	Затруднительно при одновременном присутствии Се (наложение V-Ka и Ce-La)	0,1	5	Нет данных, требуются доп. исследования	
Zn	+	-	0,005	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Zr	+	-	0,005	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Mo	+	При использовании РТ с родиевым анодом	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
Th	+	При использовании РТ с родиевым анодом	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
Ce	+/-	Затруднительно при одновременном присутствии V (наложение V-Ka и Ce-La)	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
Pr	+	-	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
Lu	+	-	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
Yb	+/-	Затруднительно при наличии Ni (наложение Ni-Ka и Yb-La)	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
Ba	+/-	Затруднительно при наличии Ti и Fe (наложение Ti-Ka, отсвета Fe и Ba-La)	0,005	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Co	+/-	При малых концентрациях затруднительно (наложение Fe-Kβ и Co-La)	0,01	10	Нет данных, требуются доп. исследования	
Cu	+	Необходимо использовать алюминиевый или свинцовый коллиматор	0,005	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Rb	+		0,005	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Cd	+/-	Затруднительно при одновременном присутствии K (наложение K-Ka и Cd-La)	0,005	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Ge	+		0,005	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Hf	+	При использовании РТ с родиевым анодом	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
As	+	При отсутствии в пробе Pb	0,005	0,8	Нет данных, требуются доп. исследования	
Cl	+	При использовании РТ с молибденовым анодом	1	10	Нет данных, требуются доп. исследования	
Se	+	-	0,05	1	Нет данных, требуются доп. исследования	
Ag	+	-	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	
Au	+	-	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	Нет данных, требуются доп. исследования	

расположение рентгеновской трубки в сборе с кожухом охлаждения и полупроводникового детектора относительно друг друга обеспечивается коллиматором, разработанным специалистами МГТУ им. Г.И. Носова. Управление, сбор, обработка, передача данных, питание рентгеновской трубки и цифрового приемника происходит посредством платы управления модуля, имеющей искробезопасную цепь, спроектированной специалистами МГТУ им. Г.И. Носова. Полная обработка данных, формирование архива и передача данных на внешний ресурс обеспечивается программным обеспечением (ПО), разработанным также сотрудниками МГТУ им. Г.И. Носова. Все составляющие компоненты модуля анализа шлама размещены во взрывозащищенном корпусе, обеспечивающем выполнение требований Технического регламента ТР ТС012/2011 в части взрывозащиты оборудования, используемого в зоне взрывоопасности 1, и «Правил безопасности в нефтяной и газовой промышленности».

По завершении изготовления опытно-промышленного образца модуль был откалиброван по стандартным образцам и протестирован на работоспособность и надежность в лабораторных условиях. На **рис. 1** показана компоновка элементов модуля при демонтированной крышке взрывозащищенного корпуса модуля анализа шлама, где цифрами обозначены:

1. Рентгеновская трубка высокого напряжения.
2. Коллиматорный узел.
3. Полупроводниковый детектор.
4. Блок питания и управления модулем.

Общий вид модуля анализа шлама представлен на **рис. 2**.

На завершающем этапе проекта предусмотрено проведение опытно-промышленных работ (ОПР) с использованием опытно-промышленного образца модуля анализа шлама в реальных эксплуатационных условиях буровой установки.

Для реализации целей ОПР специалистами МГТУ им. Г.И. Носова и группой компаний «Газпром нефть» разработан поршневой пробоотборник с пневматическим приводом, встраиваемый в вертикальную секцию шнекового конвейера для транспортировки шлама. Пробоотборник обеспечивает автоматический отбор образца шлама, его перемещение в зону РФА анализатора для измерения и последующий сброс пробы. Важно отметить, что проба отбирается в виде шламовой пульпы, идущей с системы очистки бурового раствора без какой-либо предварительной подготовки.

Для исключения экранирования вторичного излучения пробы шлама вторичным излучением материала пробоотборника поршень и часть корпуса пробоотборника, попадающая в зону рентгеновского излучения, были изготовлены из фторопласта.

На **рис. 3** представлен общий вид пневматического поршневого пробоотборника. Оранжевым цветом обозначены элементы, выполненные из фторопласта.

На этапе проведения опытно-промышленных работ требуется убедиться в правильности принятых на этапе НИОКР инженерно-конструкторских и технических решений, устранить возможные недочёты и перевести оборудование из опытно-промышленного в серийное производство.

В качестве объекта для проведения ОПР по определению элементного состава



Рис. 1. Компоновка элементов модуля анализа шлама. Составлено авторами
Fig. 1. Layout of module elements. Figure prepared by the authors

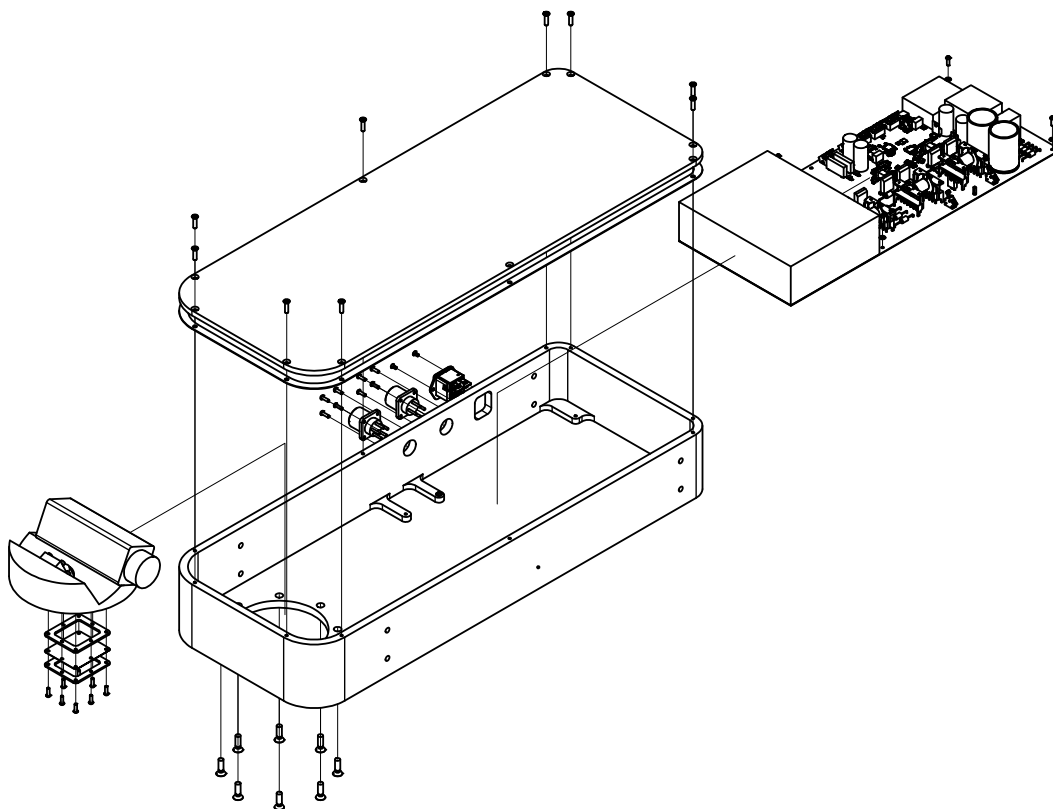


Рис. 2. Общий вид модуля анализа шлама (сборочный чертёж). Составлено авторами
Fig. 2. General view of the module (assembly drawing). Figure prepared by the authors

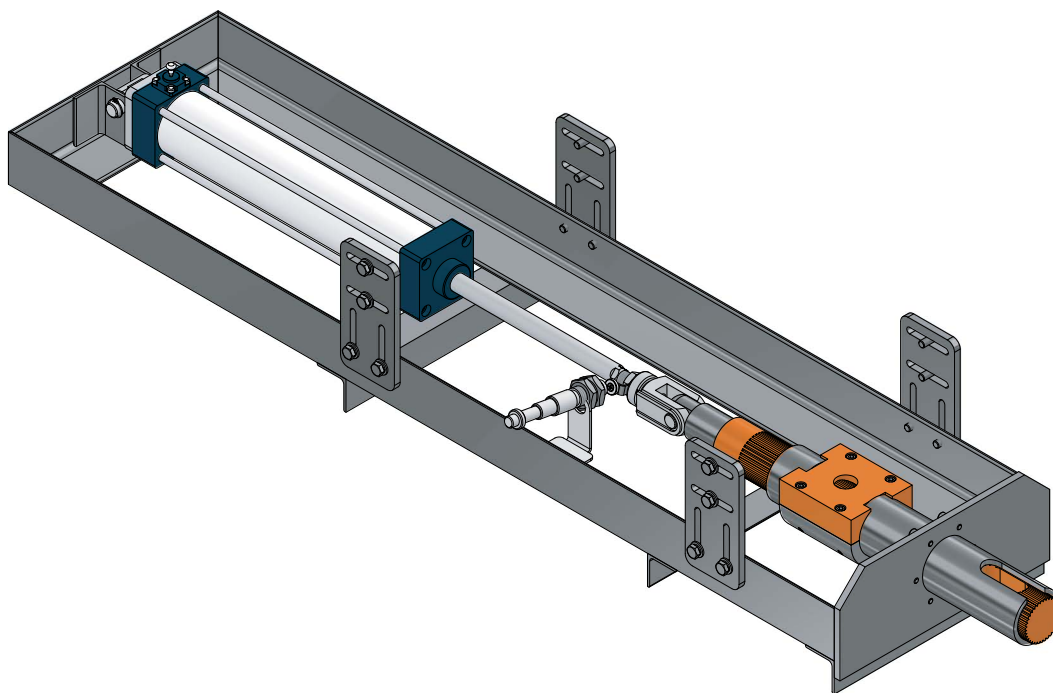


Рис. 3. Общий вид поршневого пробоотборника с пневматическим приводом (сборочный чертёж). Составлено авторами
Fig. 3. General view of the piston sampler with pneumatic drive (assembly drawing). Figure prepared by the authors

шлама потоковым методом была выбрана одна из скважин на месторождении группы компаний «Газпром нефть». Весь цикл ОПР (монтаж/демонтаж, пусконаладка, сопровождение и т.д.) проводился силами

и под авторским надзором специалистов МГТУ им. Г.И. Носова. После доставки оборудования на объект был произведён монтаж модуля анализа шлама в месте сопряжения секций

транспортировочных шнеков. Общий вид модуля в сборе с пробоотборником приведён на **рис. 4**.

Модуль с пробоотборником был закреплён под верхней секцией шнекового конвейера с возможностью движения по двутавровым балкам для безопасной установки/снятия и возможности осмотра пробоотборника без необходимости полного демонтажа оборудования. На **рис. 5** приведен опытно-промышленный образец модуля потокового измерения химического состава бурового шлама методом РФА, установленный на буровой.

Основная часть ОНР проведена при бурении горизонтального ствола (фишбон №2) в интервале от 3673,2 до 4921,2 м. В эксплуатационных промышленных условиях опытно-промышленный образец модуля анализа шлама отработал 330 часов в полностью автоматическом режиме без каких-либо отклонений. Данный факт подтверждает достаточную надёжность разработанного оборудования. Формирование базы данных измерений модуля анализа шлама с функцией визуализации, а также возможность получения данных в режиме реального времени для удалённого мониторинга обеспечивалась посредством передачи данных с модуля на станцию ГТИ (ПО GeoScape 2.0). Также осуществлялась привязка данных по времени и глубине и передача данных по стандартным каналам в «Систему Мониторинга Бурения» (СМБ 1.0). Передача данных с модуля на станцию ГТИ

производилась как по проводному, так беспроводному каналам связи.

По результатам работы модуля в период ОНР проведён анализ возможности определения химических элементов в шламе (**табл. 3**). Поточковый РФА проводился из расчета обнаружения значимых концентраций для 67 химических элементов (от Al до U).

Для определения сходимости данных, полученных модулем анализа шлама в автоматическом режиме, со стандартными методами определения элементного состава отобраны пробы шлама и выполнен их лабораторный РФА со стандартной пробоподготовкой. По результатам сравнения показаний модуля анализа шлама и лабораторного спектрометра выбраны четыре наиболее информативные пробы, для которых проведен количественный масс-спектрометрический анализ. После получения результатов количественного масс-спектрометрического анализа была проведена корреляция лабораторных данных и данных, полученных по итогам проведения ОНР. Были выявлены определенные закономерности, на основании которых можно сделать следующие выводы:

- потоковый РФА шлама в процессе бурения позволяет типизировать породы разреза на хемотипы на основе породообразующих элементов;
- химический состав пород указывает на поликомпонентность состава обломочных пород (высокое содержание полевых шпатов, обломков пород, пр.);

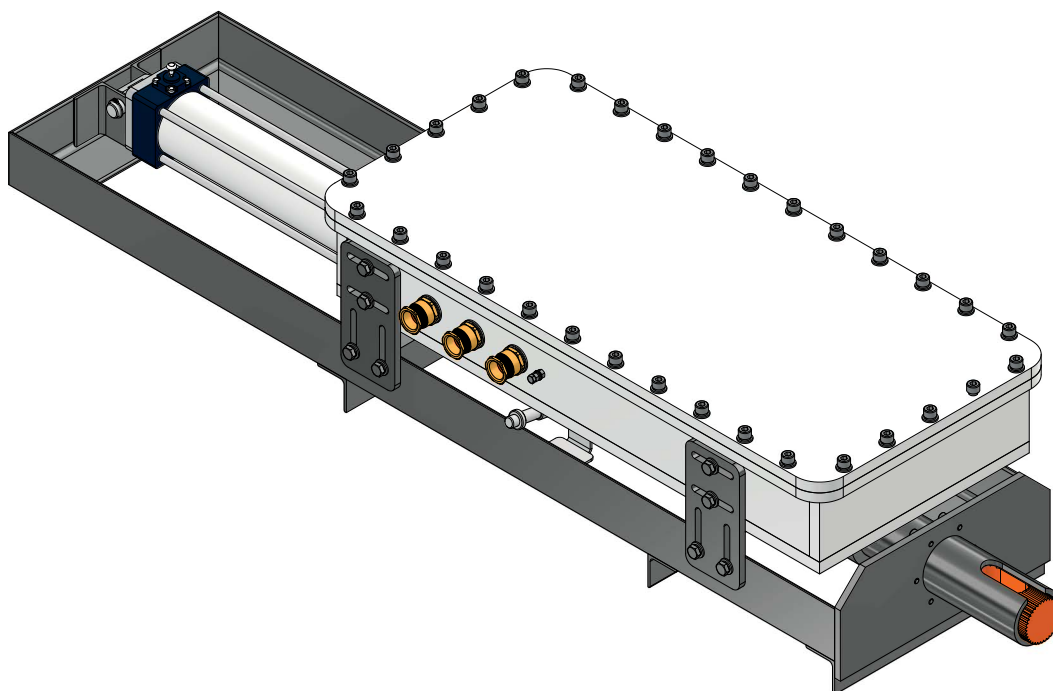


Рис. 4. Общий вид модуля «Анализ шлама» с поршневым пробоотборником. Составлено авторами
Fig. 4. General view of the module with a piston sampler. Figure prepared by the authors



Рис. 5. Опытно-промышленный образец модуля анализа шлама, смонтированный на буровой установке.
Составлено авторами

Fig. 5. A prototype of the module mounted on a drilling rig. Figure prepared by the authors

Таблица 3. Анализ возможности определения химических элементов модуля анализа шлама
Table 3. Analysis of the possibility of determining chemical elements by the module

Элемент	Определён (Да/Нет)	Максимальное значение (по модулю анализа шлама)	Комментарии
1	2	3	4
Породообразующие элементы			
Al	Да	17,67	Отмечена изменчивость значений в приемлемом диапазоне
Ca	Да	31,46	Отмечена изменчивость значений в приемлемом диапазоне (1–5 %, в карбонатах до 40 %)
Fe	Да	23,99	Отмечена изменчивость значений в приемлемом диапазоне (по оксидам 6–17 %, в карбонатах и пирите до 50 %)
K	Да	20,53	Отмечена изменчивость значений в приемлемом диапазоне (2–6 %, в ортоклазе К до 15 %)
Mg	Нет		Не определяется модулем в текущей реализации
Mn	Да	0,318	Отмечена изменчивость значений в приемлемом диапазоне (0,02–0,15 %, повышенные концентрации в марганцевых карбонатах и силикатах, до 15 %)
Si	Да	60,32	Отмечена изменчивость значений в приемлемом диапазоне (30–68 %)
S	Да	0,0013	Определяется в достаточном кол-ве измерений, вариативность оценить сложно. В осадочных породах встречается повсеместно (содержания 0,04–0,17 %, кларковое содержание 0,075 %, в пробах до было до 2 %, вероятно из пирита)
Ti	Да	2,23	Отмечена изменчивость значений в приемлемом диапазоне (по пробам 0,2–0,8 %, в оксиде до 1,6 %)
P	Да	0,0026	Определяется в достаточном кол-ве измерений, вариативность оценить сложно. В осадочных породах встречается повсеместно (содержания 0,02–0,2 %, наименьшие кол-ва в песчаниках, в пробах было до 2,5 % в оксиде, в общем до 15 %)
Основные элементы-маркеры			
Cr	Да	0,049	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне (по пробам 0,007–0,5 % в оксиде)

Продолжение таблицы 3

Элемент	Определён (Да/Нет)	Максимальное значение (по модулю анализа шлама)	Комментарии
1	2	3	4
Nb	Да	0,075	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне (в пробах присутствовал единично, в целом до 0,002 % в оксиде, корреляция обычно с содержанием Ti)
Ni	Да	0,026	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне (по пробам 0,01–0,05 %, во многих пробах отсутствовал)
Sr	Да	0,1	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне (по пробам 0,02–0,07 %, в целом до 0,28 %)
U	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, в следах часто присутствует до 0,01 %
Th	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, в следах часто присутствует
V	Да	0,022	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне (по пробам 0,001–0,27 % в оксиде, в целом до 0,4%)
Zn	Да	0,174	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне (по пробам 0,01–0,26 %, в целом до 0,5 %)
Zr	Да	0,084	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне (в пробах 0,007–0,04 % в оксиде, присутствует в следах, но везде)
Mo	Да	0,068	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не определялся, в следах довольно часто до 0,0004 %
Ba	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, притом что в небольших кол-вах всегда присутствует (по пробам 0,1–2 % в оксиде, в целом до 8 %,)
Co	Да	0,026	Определяется в некотором кол-ве измерений, вариативность оценить сложно (в пробах присутствовал единично, в целом до 0,03 % в оксиде)
Cu	Да	0,054	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне (в пробах 0,01–0,09 % в оксиде, во многих пробах отсутствует)
Rb	Да	0,1	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не определялся (в целом до 0,06 %)
Cd	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, в следах часто до 0,0001 %, корреляция с Zn
Ge	Да	0,08	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее нами не определялся, присутствует в следах в определенных породах
Hf	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, в следах часто присутствует в очень низких концентрациях
As	Да	0,087	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не обнаруживался, часто в следах до 0,02 %
Cl	Да	0,0027	Определяется в достаточном кол-ве измерений, вариативность оценить сложно (в целом до 0,24 %)
Se	Да	0,09	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не определялся (в целом до 0,03 %)
Ag	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, в целом часто в виде примесей до 0,0004 %
Au	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, в целом часто в виде примесей до 0,01 %
Дополнительные элементы-маркеры			
Ga	Да	0,062	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не обнаруживался, часто в следах до 0,005 %
Y	Да	0,087	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не обнаруживался, часто в следах до 0,02 %
Ru	Да	0,043	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не обнаруживался, приурочен к определённым породам, в осадочных редко
Rh	Да	0,024	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не обнаруживался, приурочен к определённым породам, в осадочных редко
Br	Да	0,096	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не обнаруживался, примеси крайне редко из-за хорошей растворимости, в большем кол-ве может быть в воде, либо солях
Kr	Да	0,096	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, в природе в виде газа, образуется при распаде U–Th

Продолжение таблицы 3

Элемент	Определён (Да/Нет)	Максимальное значение (по модулю анализа шлама)	Комментарии
1	2	3	4
Tc	Да	0,056	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, в природе в крайне ограниченном кол-ве в урановых рудах
Ag	Да	0,027	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, в природе в виде растворенного газа в воде
Ce	Нет		Не определяется модулем в текущей реализации
Pr	Нет		Не определяется модулем в текущей реализации
Lu	Нет		Не определяется модулем в текущей реализации
Yb	Нет		Не определяется модулем в текущей реализации
Sc	Да	0,111	Определяется в достаточном кол-ве измерений, изменчивость значений в приемлемом диапазоне, ранее не обнаруживался, часто в следах до 0,01 %
Pd	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
In	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Sn	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Sb	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Te	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
I	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Xe	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Cs	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
La	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Ta	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
W	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, хотя в следах часто присутствует
Re	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Os	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Ir	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Pt	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Hg	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Tl	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Pb	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен, хотя в следах часто присутствует (до 0,01 %)
Bi	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Po	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
At	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Rn	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Fr	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Ra	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Ac	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен
Pa	Нет		В исследуемых пробах не обнаружен

- прямых химических индикаторов ФЕС и насыщения не выявлено, что для разреза на этом месторождении вполне ожидаемо (сочетание первичных и вторичных процессов в формировании коллекторов);
- отсутствие данных по определению Na и Mg несколько ограничивает возможности выявления различных закономерностей для расчленения пород разреза.

ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных ОПР:

- определено соответствие разработанного модуля потокового измерения химического состава непромытого бурового шлама методом РФА техническому заданию (модуль анализа шлама отработал в реальных условиях в требуемом режиме необходимое для проведения ОПР время);
- подтверждена возможность передачи данных с модуля анализа шлама в реальном времени в систему мониторинга бурения для удалённого мониторинга;
- на качественном уровне определены концентрации по 33 химическим элементам (с 13 по 45 порядковые номера в таблице Менделеева). При этом применение модуля анализа шлама позволило на качественном уровне определить изменение элементного состава шлама в процессе бурения и сформировать базу данных с высокой дискретностью.

Данные, полученные при использовании модуля анализа шлама в процессе бурения

скважины, представляют наибольшую ценность, для петрофизиков при подготовке оперативных петрофизических заключений.

Предполагается проведение последующих ОПР с применением модуля анализа шлама с целью расширения базы данных по геохимии для различных месторождений, а также уточнения математических моделей для более точной калибровки оборудования.

Со стороны группы компаний «Газпром нефть» подтверждена научная обоснованность технологии, примененной при ОПР.

Начиная с 2024 года запланировано поэтапное внедрение модуля для потокового определения элементного состава шлама методом рентгенофлуоресцентного анализа на буровых установках, ведущих бурение поисково-разведочных и эксплуатационных скважин со значительной геологической нагрузкой.

Результаты разработки защищены патентом №27977486 «Устройство и способ автоматизированного измерения элементного состава буровых шламов».

Список литературы

1. Лахтионов С.В., Чумаков И.С., Филингов С.Г., Чукин Д.М., Ишметьев Е.Н. Использование потокового рентгенофлуоресцентного анализа для определения химического состава бурового шлама // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти, 2021. — Т. 6 (4). — С. 147–153. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2021-6-4-147-153>

References

1. Lakhtionov S.V., Chumakov I.S., Filinkov S.G., Chukin D.M., Ishmetyev E.N., The use of streaming X-ray fluorescence analysis to determine the chemical composition of drilling mud. *PRONEFT. Professionally about oil*, 2021, vol. 6 (4), pp. 147–153. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2021-6-4-147-153> (In Russ.).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

М.М. Хасанов — разработал общую концепцию статьи, подготовил текст разделов статьи и рисунки, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

М.А. Черевко — разработал общую концепцию статьи, подготовил текст разделов статьи и рисунки, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

А.Ю. Губарев — разработал общую концепцию статьи, подготовил текст разделов статьи и рисунки, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

С.В. Лахтионов — разработал общую концепцию статьи, подготовил текст разделов статьи и рисунки, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы. подготовил текст разделов статьи и рисунки.

Mars M. Khasanov — developed the article general concept, prepared sections of the article and illustrations, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Mikhail A. Cherevko — developed the article general concept, prepared sections of the article and illustrations, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Alexey Y. Gubarev — developed the article general concept, prepared sections of the article and illustrations, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Sergei V. Lakhtionov — developed the article general concept, prepared sections of the article and illustrations, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

И.С. Чумаков — разработал общую концепцию статьи, подготовил текст разделов статьи и рисунки, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы. разработал общую концепцию исследования.

Д.М. Чукин — разработал общую концепцию статьи, подготовил текст разделов статьи и рисунки, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы. подготовил текст разделов статьи и рисунки.

Е.Н. Ишметьев — разработал общую концепцию статьи, подготовил текст разделов статьи и рисунки, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы. подготовил текст разделов статьи и рисунки.

Ivan S. Chumakov — developed the article general concept, prepared sections of the article and illustrations, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Dmitriy M. Chukin — developed the article general concept, prepared sections of the article and illustrations, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Yevgeniy N. Ishmetyev — developed the article general concept, prepared sections of the article and illustrations, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Марс Магналиевич Хасанов — доктор физико-математических наук, директор по науке, группа компаний «Газпром нефть»

Михаил Александрович Черевко — кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «Нефтесервисные решения»

Алексей Юрьевич Губарев — генеральный директор, ООО «Инженерно-Технологический Сервис»

Сергей Владимирович Лахтионов* — кандидат технических наук, руководитель проекта по разработке продукта, группа компаний «Газпром нефть»
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Почтамтская, д. 3–5.
E-mail: ProNeft@gazprom-neft.ru

Иван Сергеевич Чумаков — руководитель направления по ГТИ и цифровым инструментам, ООО «Нефтесервисные решения»

Дмитрий Михайлович Чукин — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Евгений Николаевич Ишметьев — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Mars M. Khasanov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director of science, Gazprom нефt company group

Mikhail A. Cherevko — Cand. Sci. (Eng.), Generaldirector, Oilfield service solutions LLC

Alexey Y. Gubarev — General director,, Engineering tehnological service LLC

Sergey V. Lakhtionov* — Cand. Sci. (Eng.), Project manager for product Development, Gazprom нефt company group
3–5, Pochtamtskaya str., 190000, Saint Petersburg, Russia.
E-mail: ProNeft@gazprom-neft.ru

Ivan S. Chumakov — The head of the direction of the Mudlogging and Digital Tools, Oilfield service solutions LLC

Dmitry M. Chukin — Cand. Sci. (Eng.), Senior researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University

Evgeny N. Ishmetyev — Dr. Sci. (Eng.) Leading researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author