Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-164-168

Создание головной платы погружной части системы управляемого бурения

С.Е. Чернышов, А.А. Мелехин, И.В. Домбровской, В.В. Прохоров, В.В. Дерендяев, А.В. Николаев✉
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация
✉ nikolaev0811@mail.ru

Резюме: В статье рассматривается актуальная проблема импортозамещения роторно-управляемых систем для наклонно-направленного и горизонтального бурения. Отмечается, что зарубежные системы типа Point-the-bit обладают высокими характеристиками, но их применение ограничено. В Пермском национальном исследовательском политехническом университете ведётся разработка отечественной роторно-управляемой системы, ключевым нестандартным элементом которой является управляющая плата погружной части телеметрической подсистемы. Авторами выполнены подбор и обоснование компонентов платы: микроконтроллер 1640РС4У, приёмопередатчики RS 485/RS 422 (5556ИН2Т), датчик давления Wika МН 2, операционный усилитель 1487УД1У, DC/DC преобразователь МДМ10 1В05ТУП. Определены класс точности и количество слоёв печатной платы. Представлена функциональная схема управляющей платы, предназначенная для использования в отечественной роторно-управляемой системе.

Ключевые слова: роторно-управляемая система, система управляемого бурения, плата управления, траектория бурения, контроллер, микросхема, бурение скважин

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0005).

Для цитирования: Чернышов С.Е., Мелехин А.А., Домбровской И.В., Прохоров В.В., Дерендяев В.В., Николаев А.В. Создание головной платы погружной части системы управляемого бурения. *Горная промышленность*. 2026;(5):164–168. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-164-168

Designing a control board for the submersible section of a rotary steer drilling system

S.E. Chernyshov, A.A. Melekhin, I.V. Dombrovsky, V.V. Prokhorov, V.V. Derendyaev, A.V. Nikolaev✉
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
✉ nikolaev0811@mail.ru

Abstract: The article discusses a current problem of import substitution of rotary steer systems for directional and horizontal drilling. It is noted that the imported Point-the-bit systems are characterized with high performance, but their use is limited. The Perm National Research Polytechnic University is developing a domestic rotary steer drilling system, which key non-standard element is the control board for the submersible part of the telemetry subsystem. The authors selected and justified the use of the following components of the board: the 1640RS4U microcontroller, RS 485/RS 422 (5556IN2T) transceivers, Wika MH 2 pressure sensor, 1487UD1U operational amplifier, MDM10 1V05TUP DC/DC converter. The accuracy class and the number of printed circuit board layers are determined. A functional diagram is presented of the control board designed for use in a domestic rotary steer drilling system.

Keywords: rotary steer drilling system, controlled drilling system, control board, drilling path, controller, microchip, borehole drilling

Acknowledgements: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSNM-2024-0005).

For citation: Chernyshov S.E., Melekhin A.A., Dombrovsky I.V., Prokhorov V.V., Derendyaev V.V., Nikolaev A.V. Designing a control board for the submersible section of a rotary steer drilling system. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):164–168. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-164-168

Введение

РВ настоящее время доля разработки сложных запасов с глубоким залеганием углеводородов, а также месторождений нефти плотных коллекторов постоянно возрастает. Для их эффективной разработки все чаще начинают использовать наклонно-направленное бурение [1; 2], при котором необходимо вести обязательный контроль траектории скважины. Связано это с тем, что роторно-управляемые системы (РУС), применяемые для бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин, в сравнении с традиционными способами имеют более высокую скорость и точность бурения.

В результате оценки надежности существующих РУС (Push-the-bit, Point-the-bit, комбинированной), проведенной в работе [3], было установлено, что наилучшими характеристиками обладает система Point-the-bit. Однако применяемые в настоящее время РУС данного типа производятся за рубежом такими компаниями, как Schlumberger, Halliburtoni Cruise и т.д.

В Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) разрабатывается отечественная РУС, работающая по принципу Point-the-bit. В этой системе большая часть элементов погружной части телеметрической подсистемы являются стандартными серийно выпускаемыми изделиями: бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), пульсатор, батарея гальванических элементов (аккумуляторов) и генератор.

В связи с этим необходимо подобрать элементы погружной части системы управляемого бурения (СУБ).

Результаты

Нестандартным устройством, которое разрабатывалось на базе ПНИПУ, является управляющая плата погружной части телеметрической подсистемы, концепция которой представлена в настоящей статье.

Основным элементом платы является управляющий микроконтроллер, осуществляющий управление всеми устройствами платы, а также внешними устройствами, подключенными к управляющей плате, согласно управляющей программе загруженной в память микроконтроллера:

– передача данных с забоя на поверхность посредством генерации управляемых импульсов давления в буровом растворе осуществляется при помощи гидравлического пульсатора, для взаимодействия с которым предполагается использование специальных схем согласования и формирования управляющих сигналов для пульсатора, а также согласования выхода его датчика с уровнями сигналов микроконтроллера;

– определение местоположения и скорости бурения осуществляется при помощи БИНС, для связи с которой предполагается использование встроенного контроллера коммуникационного интерфейса микроконтроллера;

– изменение траектории бурения за счет подачи управляющих сигналов на переламывающийся переводник;

– получение информации с датчиков давления и датчиков обратной связи положения долота, осуществляемое через схему сопряжения, подключаемую к входу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера;

– экспресс-диагностика погружной части и считывание данных с Flash-памяти, которое производится за счет внешнего терминала, подключаемого к микроконтроллеру по отдельному интерфейсу;

– запись и хранение данных в Flash-память, которая подключается к одному из коммуникационных интерфейсов микроконтроллера.

Для хранения журнала работы погружной части, который может быть использован для сбора телеметрической информации (например, сохранение углов, получаемых от БИНС) используется микросхема памяти. От ее характеристик будет зависеть количество хранимой информации и возможность подключения других измерительных приборов.

После проведения сравнительного анализа и исходя из характеристик микроконтроллера (малое количество выводов, напряжение питания 3,3 В и т.д.) была выбрана микросхема 1640РС4У, производимая на АО «Ангстрем» [1].

Ввиду того что связь с БИНС осуществляется без внешних сигналов (например, таких как GPS), для связи с ней используются интерфейсы полевых шин RS-485 или RS-422. В описываемой системе необходимо было предусмотреть возможность использования обоих типов интерфейсов. Для этого решено реализовать с помощью трех приемопередатчиков RS-485 два канала связи: с БИНС – два приемопередатчика, один из которых будет настроен на постоянную передачу, другой будет иметь возможность работы в двух режимах: приемника RS-422 или приемопередатчика RS-485 в зависимости от установленных перемычек; другой – для подключения внешнего терминала посредством интерфейса RS-485. В этом случае к микросхемам приемопередатчиков предъявляется требование возможности работы как в режиме интерфейса RS-485, так и в режиме интерфейса RS-422.

После проведенного сравнительного анализа в качестве приемопередатчиков для связи с БИНС и терминалом оператора было решено использовать микросхемы 5556ИН2Т[2].

В качестве датчика давления бурового раствора, который может быть использован для приема команд наземной части (в случае, если сигнал датчика пульсатора не будет улавливать передаваемые наземной аппаратурой команды), был применен преобразователь Wika МН-2[3]. Код, полученный от АЦП, к которому через согласующие цепи подключен выход датчика, можно пересчитать в численное значение измеренной датчиком физической величины по формуле:

$$Val = \frac{(Val_{\max} - Val_{\min}) * (ADC - ADC_{\min})}{ADC_{\max} - ADC_{\min}} + Val_{\min} \quad (1)$$

где $Val_{\max}$ и $Val_{\min}$ – максимальное и минимальное значение тока, измеряемое датчиком, мА; ADCmax и $ADC_{\min}$ – коды, получаемые от АЦП, соответствующие токам 4 и 20 мА соответственно; Val – текущее значение измеряемой датчиком физической величины, мА; ADC – код АЦП, соответствующий текущему значению выходного тока датчика, мА.

При проведении сравнительного анализа микросхем операционных усилителей для схемы сопряжения с дат-

1 Микросхемы запоминающих устройств: каталог 2017. АО «Ангстрем». 62 с. Режим доступа: http://integral-zapad.ru/upload/iblock/aae/aae06dc8fd4f1490ada5cab18945807f.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

2 Интерфейсный приемопередатчик последовательных данных стандартов RS-485, RS-422. ОАО «Интеграл». 4 с. Режим доступа: https://integral.by/upload/iblock/52a/5559_IN2T.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

3 Преобразователи давления Wika МН-2. ООО «ОвенКомплектАвтоматика». Режим доступа: https://www.owenkomplekt.ru/manufacturers/wika/preobrazovateli-davleniya-wika-/preobrazovateli-davleniya-wika-mh-2/ (дата обращения: 23.05.2026).

Таблица 1
Минимальные значения параметров печатной платы, соответствующие различным классам точности

Table 1
The minimum values of the printed circuit board parameters corresponding to different accuracy classes

Параметр	Классы точности и значения параметров						
	1	2	3	4	5	6	7
Ширина проводника, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,05
Расстояние между проводниками, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,05
Гарантийный поясок контактной площадки, мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015

чиком аналоговой «токовой петли» была выбрана микросхема 1487УД1У, которая рассчитана на использование в диапазоне температур –60…+85 °С[4].

Еще одним важным элементом любого электрического и электронного устройства являются цепи питания. В электронном устройстве данные цепи формируют напряжение, необходимое для различных элементов: для питания микросхем, микропроцессоров, различных цепей сопряжения, опорных напряжений АЦП, обслуживания и зарядки резервного аккумулятора и т.д. В таких цепях могут применяться:

– параметрические стабилизаторы для цепей с малым током потребления;

– DC/DC преобразователи в виде законченных встраиваемых модулей или специализированных микросхем;

– линейные стабилизаторы напряжения;

– источники опорного напряжения – для АЦП и других схем, требующих напряжения повышенной чистоты и стабильности.

В современных электронных изделиях промышленного назначения достаточно часто одним из основных элементов цепей питания является DC/DC преобразователь. Его задача – понижение высокого напряжения питания, подаваемого с общего источника питания (обычно 12, 24, 27 В) до напряжения, используемого для питания расположенных на плате низковольтных устройств (обычно 5, 3,3, 1,8 В). В большинстве случаев используется DC/DC преобразователь на 5 В. Более низкие напряжения – 3,3 и 1,8 В – вырабатываются из этого напряжения с помощью линейных стабилизаторов.

В разрабатываемой плате напряжение питания 5 В применяется для питания приемопередатчиков RS-485 (они подключены к выводам микроконтроллера, толерантным к 5 В), операционного усилителя для согласования с датчиком 4–20 мА и микросхемы для согласования с входом пульсатора давления.

Входное напряжение питания, которое будет подаваться на плату управления от внешнего источника – 24 В. При понижении такого напряжения до 5 В посредством линейного стабилизатора будет выделяться большое количество тепла, что приведет к необходимости установки дополнительного радиатора, а также холостой трате большой мощности источника энергии. Импульсный преобразователь напряжения DC/DC имеет более высокий КПД, что позволяет снизить рассеиваемую мощность и подключить к нему нагрузку с большим током потребления.

Для питания были выбраны схемы импульсных стабилизаторов, использующих встраиваемые модули DC/DC преобразователей. Несмотря на относительно большие габаритные размеры, встраиваемый модуль DC/DC преобразователя уже содержит в своем составе большую часть элементов импульсного стабилизатора, таких как схема контроллера импульсного стабилизатора, намоточные узлы, фильтрующие конденсаторы, диоды Шоттки.

В разрабатываемой плате управления также решено использовать встраиваемый модуль DC/DC преобразователя. Данный преобразователь должен осуществлять понижение напряжения 24 В до 5 В и обеспечивать питание нагрузки с потреблением тока до 1 А.

Из существующих наиболее предпочтительным является модуль МДМ10-1В05ТУП компании АЕДОН[5].

Также необходимо определить класс точности разрабатываемой печатной платы и количество слоев.

Класс точности печатных плат, который нормируется согласно ГОСТ Р 53429–2009[6], определяется минимальной шириной проводников и расстоянием между проводниками. Минимальные значения, соответствующие различным классам точности, приведены в табл. 1.

Ширина проводника обычно не превышает ширину вывода элемента, к которому этот проводник подводится. Но расстояние между ближайшими выводами не всегда определяет минимальное расстояние между проводниками. Так, для компонентов навесного монтажа часто практикуется прокладка проводника между выводами (в том числе и для микросхем в корпусах DIP), что делает минимальное расстояние между соседними проводниками меньше, чем шаг выводов микросхемы. Для элементов поверхностного монтажа (особенно микросхем) это практикуется реже, так как расстояние между соседними выводами этих компонентов меньше, чем у компонентов навесного монтажа (шаг выводов микросхем в корпусах DIP составляет 2,54 мм, у микросхем в корпусах QFP, используемых для поверхностного монтажа – до 0,5 мм), поэтому прокладка проводника между выводами потребует очень высокого класса точности печатной платы, что, в свою очередь, повысит стоимость ее изготовления.

4 Микросхемы для жестких условий эксплуатации. 1487УД1У. АО «Микрон». Режим доступа: https://mikron.ru/catalog/mikroskhemy-dlya-zhestkikh-usloviy-ekspluatatsii/1487ud1u/ (дата обращения: 23.05.2026).

5 Серии МДМ-Б и МДМ-С включены в ЕРРРП и ТОРП. ООО «АЕДОН». Режим доступа: https://aedon.ru/news/post/serii-mdm-b-i-mdm-s-vklyuchenyi-v-errrp-i-torp (дата обращения: 23.05.2026).

6 ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ; 2010. 11 с. Режим доступа: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293824/4293824336.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

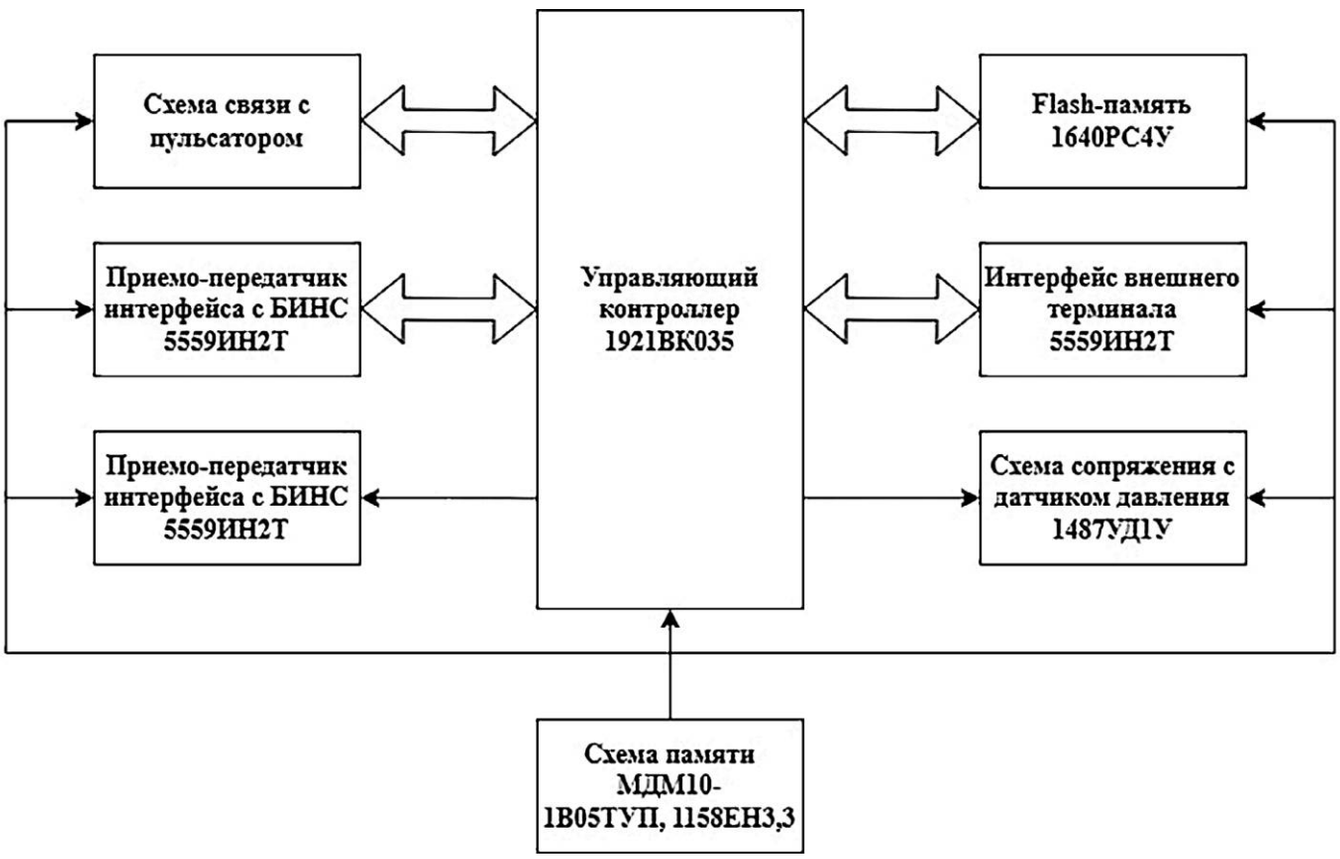


Рис. 1
Функциональная схема управляющей платы погружной части системы управляемого бурения

Fig. 1
A functional diagram of the control board for the submersible part of the controlled drilling system

Для определения класса точности необходимо сравнить расстояния между выводами всех элементов, устанавливаемых на печатной плате и выбрать минимальный. Для упрощения задачи необходимо заранее отбросить элементы, имеющие относительно большие шаг выводов или расстояние между ними. Это элементы, предполагающие навесной монтаж, наличие резисторов и конденсаторов. Ввиду того что наименьшее расстояние между выводами имеют микросхемы, именно они будут использованы для определения класса точности разрабатываемой платы.

В результате сравнительного анализа была выбрана микросхема 1921ВК035[7]. Она имеет наименьший шаг – 0,5 мм. У этого же корпуса минимальный размер вывода – 0,25 мм. Данные параметры соответствуют третьему классу печатной платы.

Что касается количества слоев, то на сегодняшний день широкое распространение получили четырехслойные печатные платы. Такие платы имеют два внутренних слоя медной фольги и два наружных слоя.

На основе результатов выбора компонентов была сформирована функциональная схема управляющей платы (рис. 1).

Единственными элементами, для которых не были выбраны микросхемы, являются «Схема связи с пульсатором» и «Цепи управления переламывающимся переводником». Данные блоки представляют собой схемы, собранные на дискретных элементах и мелкой логике. Причем большая часть логики работы интерфейса реализуется аппаратно-программными средствами в составе управляющего микроконтроллера. Поэтому для сопряжения с внешним устройством не требуется наличие аппаратного приемопередатчика – достаточно относительно простых согласующих, буферных и защитных цепей, которые могут быть реализованы с использованием обычных полупроводниковых диодов, резисторов, микросхем мелкой логики или ключей. Данные цепи необходимо подбирать в процессе разработки принципиальной электрической схемы.

Заключение

В результате проведенной работы были выбраны составные части для сборки управляющей платы погружной части СУБ и сформирована ее функциональная схема, которая будет использована в разрабатываемой отечественной РУС.

7 АО «НИИЭТ». Режим доступа: https://niiet.ru/product/1921%D0%B2%D0%BA035/ (дата обращения: 23.05.2026).

Список литературы / References

1. Chen X., Deli G. The maximum-allowable well depth while performing ultra-extended-reach drilling from shallow water to Deepwater target. *SPE Journal*. 2018;*23*(1):224–236. https://doi.org/10.2118/183025-PA

2. Bouldin B., Verma C., Bellaci I., Black M., Dyer S., Algerøy J. et al. Prototype test of an all-electric intelligent-completion system for extreme-reservoir-contact wells. *SPE Drilling & Completion*. 2014;29(3):353–362. https://doi.org/10.2118/166507-PA

3. Епихин А.В., Жиронкин В.С., Яночко Ю. Влияние нагрузок на надежность роторной управляемой системы наклонно-направленного бурения типа «Push-the-bit». *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2020;(3):45–47. https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-45-57
Epikhin A.V., Zhironkin V.S., Janočko J. Influence of loads on reliability of rotary steerable system of directional drilling of "Push-the-bit" type. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020;(3):45–47. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-45-57

Информация об авторах
Чернышов Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-2034-3014; e-mail: chernyshov@pstu.ru
Мелехин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-0737-1360; e-mail: melehin.sasha@mail.ru
Домбровский Игорь Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства автоматических машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация e-mail: dombrovskii1960@mail.ru
Прохоров Виталий Вячеславович – ассистент кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0007-4596-2755; e-mail: vvprokhorov@pstu.ru
Дерендяев Вадим Валерьевич – старший преподаватель кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0001-5506-2178; e-mail: v.v.derendyaev@pstu.ru
Николаев Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазовых технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-4601-5780; e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 17.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 02.07.2026

Information about the authors
Sergey E. Chernyshov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-2034-3014; e-mail: chernyshov@pstu.ru
Aleksandr A. Melekhin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-0737-1360; e-mail: melehin.sasha@mail.ru
Igor V. Dombrovsky – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Design and Manufacture of Automatic Machines, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; e-mail: dombrovskii1960@mail.ru
Vitaly V. Prokhorov – Postgraduate Student, Assistant of the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0007-4596-2755; e-mail: vvprokhorov@pstu.ru
Vadim V. Derendyaev – Senior Lecturer, Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0001-5506-2178; e-mail: v.v.derendyaev@pstu.ru
Aleksandr V. Nikolaev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Oil and Gas Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-4601-5780; e-mail: nikolaev0811@mail.ru

Article info
Received: 17.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 02.07.2026