

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2026.2.219-230>

EDN QAZBFT

УДК 622.24.051.64

Снижение вибраций при бурении скважин за счет изменения конструкции PDC-долот

¹Мингазов Р.Р., ²Валямов К.Р., ³Ишбаев Г.Г., ⁴Ковалевский Е.А.

^{1,3,4} ООО НПП «БУРИНТЕХ», Уфа, Россия

²ФГБОУ ВО «УГНТУ», Уфа, Россия

Reduction of vibrations during well drilling through modification of PDC bit design

¹R.R. Mingazov, ²K.R. Valyamov, ³G.G. Ishbayev, ⁴E.A. Kovalevskii

^{1,3,4} «Burintekh» Ltd, Ufa, Russia

² «USPTU», Ufa, Russia

E-mail: karimvaliam@yandex.ru

Аннотация. Представленная работа посвящена увеличению ресурса PDC-долота. Поставленная цель достигается за счет снижения вибраций бурильной колонны, создаваемых PDC-долотом при бурении твёрдых горных пород, путем модернизации режущей части инструмента. Для оценки влияния конструкции долота введён и обоснован коэффициент агрессивности AG, характеризующий изменение площади внедрения PDC-резцов в горную породу. На испытательном стенде ЗИФ-1200 установлена параболическая зависимость амплитуды колебаний реактивного момента от введенного коэффициента агрессивности AG. Установлено, что повышение AG подавляет возникающие вибрации в ходе бурения. Промышленные испытания на месторождении Восточной Сибири подтвердили эффективность предложенного подхода: проходка за рейс составила 1000 м, что на 200–3300 м превышает показатели стандартных конструкций, а механическая скорость бурения составила 8 м/ч при плановых 7 м/ч.

Ключевые слова: PDC-долото, вибрации при бурении, коэффициент агрессивности, цилиндрический PDC-резец, твёрдые горные породы, крутильные колебания

Для цитирования: Мингазов Р.Р., Валямов К.Р., Ишбаев Г.Г., Ковалевский Е.А. Снижение вибраций при бурении скважин за счет изменения конструкции PDC-долот // Нефтяная провинция.-2026.- №2(46).-С. 219-230. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2026.2.219-230>. - EDN QAZBFT

Abstract. The present study is devoted to extending the service life of a PDC bit. The stated objective is achieved by reducing drill string vibrations generated by the PDC bit during drilling in hard rock formations through modernization of the cutting structure of the tool.

To evaluate the influence of bit design, an aggressiveness coefficient AG was introduced and substantiated. This coefficient characterizes the change in the penetration area of PDC cutters into the rock. Experiments conducted on the ZIF-1200 test bench established a parabolic relationship between the amplitude of reactive torque oscillations and the introduced aggressiveness coefficient AG. It was found that increasing AG suppresses vibrations occurring during drilling. Field tests at a deposit in Eastern Siberia confirmed the effectiveness of the proposed approach: the footage per run reached 1000 m, which exceeds the performance of standard designs by 200–300 m, while the rate of penetration (ROP) reached 8 m/h compared to the planned 7 m/h.

Key words: *PDC bit, drilling vibrations, aggressiveness coefficient, cylindrical PDC cutter, hard rock formations, torsional vibrations*

For citation: R.R. Mingazov, K.R. Valyamov, G.G. Ishbayev, E.A. Kovalevskii Snizheniye vibratsiy pri burenii skvazhin za schet izmeneniya konstruktсии PDC-dolot [Reduction of vibrations during well drilling through modification of PDC bit design]. Neftyanaya Provintsiya, No. 2(46), 2026. pp. 219-230. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2026.2.219-230>. EDN QAZBFT (in Russian)

Современное развитие нефтегазового комплекса зависит от интенсивности ввода в эксплуатацию новых месторождений, которое реализуется за счет применения передовой техники и технологии. Для нашей страны такое развитие выражается в освоении месторождений Восточной Сибири. Но развитие нефтегазового комплекса в данном регионе сопряжено с множеством трудностей, одна из которых связана со строительством скважин в сложных геологических разрезах, представленных твердыми абразивными трещиноватыми горными породами. В данных условиях буровое долото в цепочке связанных инструментов, которая обеспечивает скорость строительства скважины, является самым высоконагруженным звеном. Именно буровое долото непосредственно взаимодействует с забоем и разрушает горную породу, и износ данного инструмента становится причиной спуско-подъемных операций, затягивающий цикл строительства скважины.

Износ PDC-долот, работающих в сложных геологических условиях, происходит в основном из-за разрушения PDC-резцов. Известны две основные причины выхода их из строя. Первая это абразивный износ, в ходе которого твёрдые частицы в составе горной породы постепенно истирают алмазные зерна PDC-резца, что приводит к изменению первоначальной формы режущей кромки и снижению эффективности резания. Скорость износа имеет нелинейную зависимость от температуры в зоне резания и при перегреве выше 600-700°C структура алмаза PDC-резца начинает разрушаться. Второй тип износа это хрупкое ударное разрушение, связанное с резкими динамическими нагрузками, порождающее трещины и сколы. Данный тип износа характеризуется непредсказуемыми объёмами разрушения, в результате которого размер сколотой поверхности может достигать до диаметра самого PDC-резца [1, 2].

Причиной абразивного и ударного износа PDC-резцов долота является нестабильное вращение бурового инструмента, находящегося в скважине, длина которого во много раз превышает его диаметр. Такое нестабильное поведение бурового инструмента характеризуется тремя типами колебания (осевой, радиальной и торсионной). Осевые - это тип колебаний, характеризующийся периодическими ударами PDC-долота о забой вдоль оси скважины. Причиной данного явления могут стать неравномерность разрушения горной породы и изменение гидродинамических условий в трубном пространстве. Каждый такой удар нагружает PDC-резцы, создавая усилия, способные скалывать алмазный слой. Крутильные колебания, также известные как «stick-slip», характеризуются периодическим скручиванием и раскручиванием бурильной колонны. PDC-долото в ходе работы подклинивает до полной остановки вращения, затем резко срывается, и инструмент раскручивается. Накопленная в бурильной колонне потенциальная энергия высвобождается за доли секунды, и резцы испытывают ударные нагрузки о

стенки скважины. По данным промысловых исследований максимальная угловая скорость долота в момент срыва может в 2-6 раз превышать номинальную частоту вращения бурильной колонны. Радиальные колебания характеризуются поперечными смещениями PDC-долота относительно оси скважины. PDC-долото бьёт о стенки ствола скважины, скалывая основное вооружение [3, 4, 5].

В практике бурения для снижения вибрации возможны использования три подхода. Первый - изменение технологических параметров бурения: снижение нагрузки на долото, изменение частоты вращения. Недостатком данного метода является возможное снижение механической скорости бурения. Второй подход - включение в состав КНБК амортизирующих устройств. Особенностью данного решения является то, что данные устройства гасят уже возникшие колебания, но не устраняют их источник. К тому же, когда одновременно возникают несколько колебаний, амортизирующее устройство, настроенное на одну частоту, малоэффективно против других. Третий подход - изменение конструкции самого PDC-долота. Именно он является наиболее перспективным, поскольку устраняется первопричина колебаний, изменяется характер взаимодействия долота с горной породой [6, 7, 8].

Исследования показывают, что нестабильное вращение PDC-долота на забое в основном зарождается при поперечном смещении его корпуса относительно оси скважины, в результате чего генерируются колебания реактивного момента. Чтобы количественно оценить склонность долота к такому поведению, авторами было предложено ввести коэффициент агрессивности AG режущей части PDC-долота. Данный коэффициент отражает интенсивность изменения площади внедрения S резца PDC в горную породу на глубину d при смещении PDC-долота относительно оси скважины (Рис. 1).

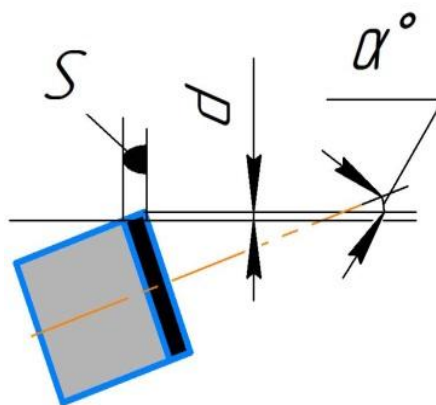


Рис. 1. Схема площади внедрения резца

Математически коэффициент агрессивности можно определить по формуле:

$$AG = \Delta S / (1000 \cdot \Delta d),$$

где:

ΔS - изменения площади внедрения PDC-резца;

Δd – изменение глубины внедрения.

Данный коэффициент оценивает интенсивность увеличения площади контакта при радиальном смещении долота. Большая площадь контакта создает большее сопротивление смещению оси долота, которое в результате стабилизирует соосное вращение инструмента в скважине. Таким образом, выдвигается гипотеза, что долото с заданным показателем AG стабилизирует само себя за счет геометрии режущей части.

Для экспериментальной проверки гипотезы было принято решение изготовить и испытать PDC-долота диаметром 146 мм с различными значениями коэффициента агрессивности. В качестве стенда использовался буровой станок ЗИФ-1200, дополнительно дооснащённый системами измерения реактивного момента и осевой нагрузки. Испытания проводились при следующих режимах. Осевая нагрузка - 40 кН, частота вращения шпинделя – 150 об/мин, промывка - водой, в качестве забоя использовалась гранитный блок горной породы. Каждое испытуемое PDC-долото пробурило по 0,5 м в одинаковых условиях.

Были испытаны три разные конструкции PDC-долота: с классическим PDC-резцом ($AG = 15$), резцом с двойной фаской ($AG = 27$) и цилиндрической режущей частью ($AG = 53$). Значения AG являются максимально возможными с учетом конструктивных особенностей долота способные обеспечить заданную скорость бурения 5 м/ч. Дальнейшее увеличение AG уменьшает скорость бурения. Анализ спектра частот реактивного момента в среде MatLab выявил закономерность, показывающую, что при повышении коэффициента агрессивности PDC-долота возникающая амплитуда колебаний реактивного момента снижается, а доминирующая частота смещается в высокочастотную область. Долото с коэффициентом агрессивности 15 показало амплитуду 360 Н·м при частоте 40 Гц, что характеризуется низкочастотными ударами. Для долота с $AG = 53$ амплитуда снизилась до 177 Н·м, частота выросла до 100 Гц (Рис. 2). Высокая частота при малой амплитуде свидетельствует о переходе от разрушительных ударов высокой амплитуды к устойчивому резанию.

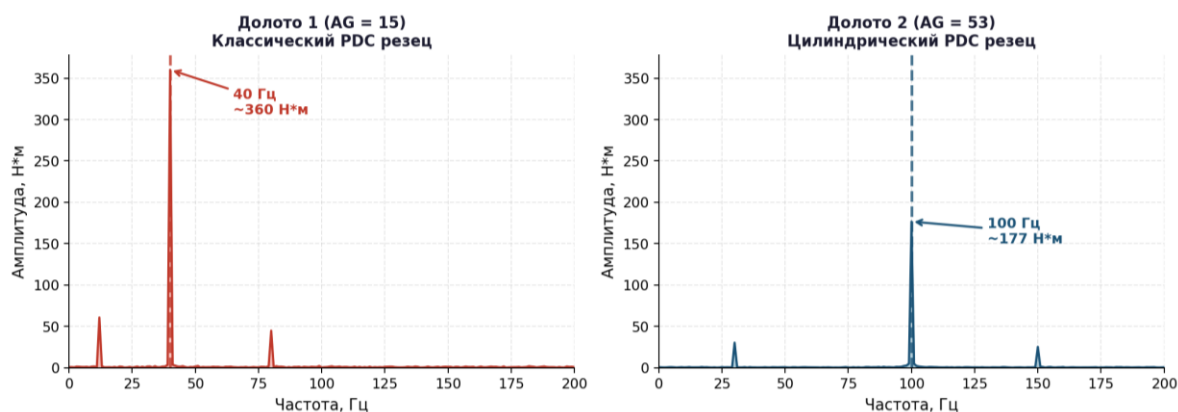


Рис. 2. Спектрограммы колебаний реактивного момента для долот с различным коэффициентом агрессивности

По результатам трех лабораторных испытаний построена кривая регрессии (Рис. 3), описывающая зависимость амплитуды колебаний реактивного момента ΔM_d от коэффициента агрессивности AG .

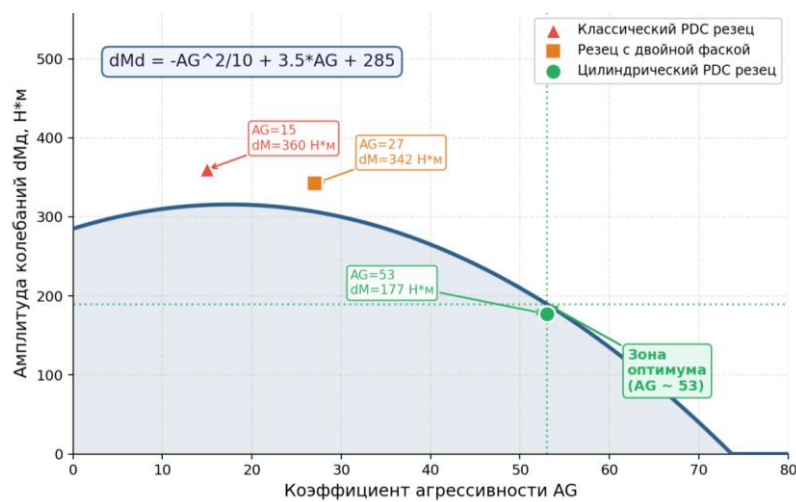


Рис. 3. Параболическая зависимость амплитуды колебаний реактивного момента от коэффициента агрессивности режущей части

Полученная зависимость имеет вид полинома второй степени:

$$\Delta M_d = -\frac{AG^2}{10} + 3,5AG + 285$$

Точка $AG \approx 53$, для которой были проведены лабораторные испытания и получены минимальные значения амплитуды колебаний, принята в качестве проектной для разработки опытного PDC-долота и проведения полевых испытаний.

На основе полученных данных в ООО «НПП «БУРИНТЕХ» было спроектировано семилопастное PDC-долото с цилиндрическими резцами диаметром 13 мм. Выбор цилиндрической геометрии PDC-резца и способа его размещения создает дополнительные преимущества. Цилиндрический резец создаёт предсказуемую площадь контакта при радиальном смещении PDC-долота, обеспечивая высокое значение AG без снижения скорости бурения. Кроме того, цилиндрическая форма обеспечивает более равномерное распределение контактных напряжений по поверхности резца, что снижает вероятность локального скола алмазного слоя. Гидравлическая система рассчитана методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS:

расход 12 л/с, давление на входе 200 атм, частота вращения 180 об/мин. Расположение насадок сконструировано так, чтобы исключить застойные зоны и обеспечить охлаждение резцов.

Промысловые испытания проведены на месторождении в Восточной Сибири в интервале 900–1900 м при бурении под эксплуатационную колонну. Геологический разрез представляет собой чередование пластов различной твёрдости: доломиты и ангидриты с труднопредсказуемым характером разрушения под горным давлением. Традиционно средняя проходка стандартных PDC-долот в данном интервале составляла 600 - 800 м. После такой проходки PDC-долота получали катастрофические износ вооружения до достижения проектного забоя, что вынуждало заказчика выполнять дополнительную спуско-подъёмную операцию.

Опытное долото пробурило запланированный интервал за один рейс. Проходка составила 1000 м, что на 200 - 300 м превышает результаты, получаемые ранее. Механическая скорость достигла 8 м/ч при плановых 7 м/ч (Рис.4). Телеметрическая система на протяжении всего рейса фиксировала предсказуемый, плавный характер роста реактивного крутящего момента при увеличении осевой нагрузки, что свидетельствовало о стабильном взаимодействии инструмента с горной породой. После подъёма инструмента зафиксирован износ по коду IADC 1-1-NS-X-IN-RR-HP, что является допустимым, без катастрофических разрушений PDC-вооружения.

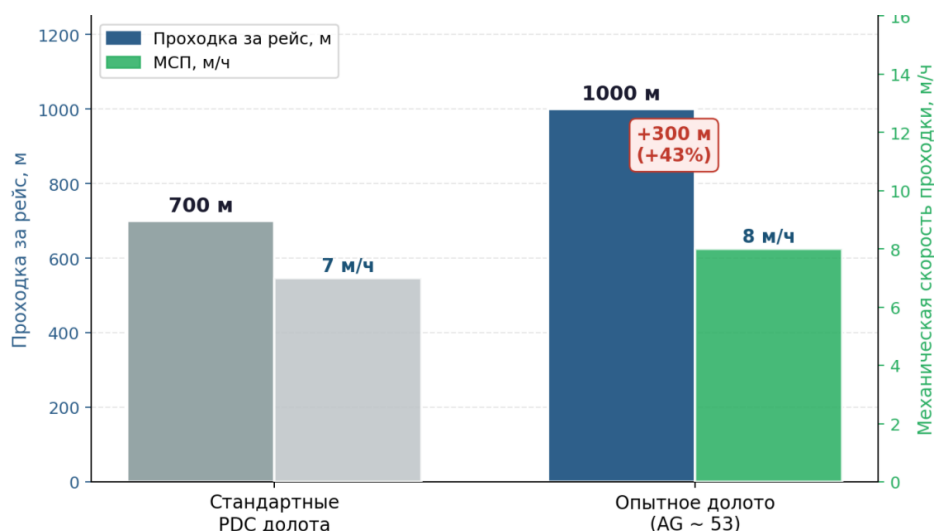


Рис. 4. Сравнение проходки за рейс и механической скорости бурения

Таким образом, в ходе проделанной работы был реализован способ борьбы с вибрациями. Выявлен конкретный источник на забое скважины представленный PDC-долотом, изменение геометрии режущей части которого способно повлиять на динамику бурового инструмента. Введённый коэффициент агрессивности AG связывает форму резца с амплитудой крутильных колебаний всей бурильной колонны.

Лабораторные и промысловые испытания подтверждают, что долото, спроектированное при экспериментально обоснованном значении $AG \approx 53$, демонстрирует пониженный уровень колебаний реактивного момента в составе бурильной колонны. Кроме того, отмечено уменьшение износа режущего вооружения и увеличение на 15-25 % проходки за рейс по сравнению со стандартными конструкциями. Дополнительно можно отметить, что при снижении коэффициента агрессивности и падении амплитуды колебания реактивного момента, снижается амплитуда крутильных колебаний бурильной колонны. Такое влияние конструкции PDC-долота на снижение усталостных нагрузок в КНБК и бурильную колонну в целом повышает ценность предложенных решений.

Возможность бурения интервала за один рейс вместо нескольких сокращает непроизводительное время и снижает стоимость строительства

скважины. На труднодоступных месторождениях, где важна каждая СПО, экономический эффект от применения модернизированной конструкции PDC-долота становится одним из ключевых факторов определяющая её применение. Предложенный коэффициент агрессивности AG является масштабируемым параметром, что раскрывает перспективу уверенного перехода от теоретических к практическим методам влияния на динамические характеристики породоразрушающего инструмента.

Список литературы

1. Miska S., Yu M., Ozbayoglu E. Modeling of Cutting Rock: From PDC Cutter to PDC Bit-Modeling of PDC Cutter // Society of Petroleum Engineers Journal. 2021. Vol. 26. No. 06. P. 3444-3464.
2. Валюнин Д. А., Бугаев К. А., Волков Д. А. Инновационные резцы Stabilis и долота Talon Force позволяют достичь новых рекордов при бурении карбонатов Самарской Области // Бурение и нефть. - 2016. - № 2. - С. 57-61.
3. Бадретдинов Т.В., Ишбаев Г.Г., Балута А.Г., Шарипов А.Н. Снижение вибрационной нагрузки на породоразрушающий инструмент и элементы КНБК путем применения демпфирующего переводника // Бурение и нефть. -2017. -№7.-С.44 - 49.
4. Мингазов Р.Р., Ишбаев Г.Г., Балута А.Г. Снижение вибрации в процессе бурения путем совершенствования конструкции PDC долот // Бурение и нефть. - 2021. - № 4. - С. 14-17.
5. Третьяк А.А. Влияние вибраций на прочностные свойства буровых коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2016.-№ 10.-С. 20-24.
6. Нескормных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Влияние среды призабойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. -2021. Т. 332. -№ 9. -С. 119-127.
7. Заляев М.Ф., Ямалиев В.У. Исследование влияния искривления ствола скважины на колебательные процессы компоновки низа бурильной колонны // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. -2017. -№2. -С. 229-234.
8. Ишбаев Г.Г., Ковалевский, А. Г. Оценка эффективности разрушения горной породы PDC резцами с различной геометрией алмазного слоя // Бурение и нефть. - 2024. - № 11. - С. 18-20.

References

1. S. Miska, M. Yu, E. Ozbayoglu. Modeling of cutting rock: from PDC cutter to PDC bit – modeling of PDC cutter. Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 26, No. 6, 2021. pp. 3444–3464.
2. D.A. Valyunin, K.A. Bugaev, D.A. Volkov. Innovatsionnye reztsy Stabilis i dolota Talon Force pozvolyayut dostich' novykh rekordov pri burenii karbonatov Samarskoi oblasti [Innovative Stabilis cutters and Talon Force bits allow achieving new drilling records in carbonate formations of the Samara region]. Burenie i nef't', No. 2, 2016. pp. 57–61. (in

- Russian)
3. T.V. Badretdinov, G.G. Ishbaev, A.G. Baluta, A.N. Sharipov. Snizhenie vibratsionnoi nagruzki na porodorazrushayushchii instrument i elementy KNBK putem primeneniya dempfiruyushchego perevodnika [Reduction of vibration load on the rock-cutting tool and BHA elements by using a damping sub]. *Burenie i nef't*, No. 7, 2017. pp. 44–49. (in Russian)
 4. R.R. Mingazov, G.G. Ishbaev, A.G. Baluta. Snizhenie vibratsii v protsesse bureniya putem sovershenstvovaniya konstruktsii PDC dolot [Reduction of vibrations during drilling by improving the design of PDC bits]. *Burenie i nef't*, No. 4, 2021. pp. 14–17. (in Russian)
 5. A.A. Tretyak. Vliyanie vibratsii na prochnostnye svoystva burovykh koronok, armirovannykh almazno-tverdosplavnymi platinami [Influence of vibrations on the strength properties of drill bits reinforced with diamond-carbide plates]. *Stroitel'stvo nef'tyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, No. 10, 2016. pp. 20–24. (in Russian)
 6. V.V. Neskromnykh, M.S. Popova, L. Baochang. Vliyanie sredy prizaboinoi zony skvazhiny na effektivnost' razrusheniya gornoi porody reztsom PDC [Influence of the bottom-hole zone environment on the efficiency of rock destruction by a PDC cutter]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, Vol. 332, No. 9, 2021. pp. 119–127. (in Russian)
 7. M.F. Zalyaev, V.U. Yamaliev. Issledovanie vliyaniya iskrivleniya stvola skvazhiny na kolebatel'nye protsessy komponovki niza buril'noi kolonny [Study of the influence of wellbore curvature on vibration processes of the bottom-hole assembly]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, No. 2, 2017. pp. 229–234. (in Russian)
 8. G.G. Ishbaev, A.G. Kovalevskii. Otsenka effektivnosti razrusheniya gornoi porody PDC reztsami s razlichnoi geometriei almaznogo sloya [Evaluation of rock destruction efficiency by PDC cutters with different diamond layer geometry]. *Burenie i nef't*, No. 11, 2024. pp. 18–20. (in Russian)

Сведения об авторах

Мингазов Рафис Рафилевич, инженер - конструктор, ООО НПП «БУРИТНЕХ»
Россия, 450112, г. Уфа, ул. Юбилейная 4/1
E-mail: rafm8607@gmail.com

Валямов Карим Рамилевич, кандидат технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
E-mail: karimvaliam@yandex.ru;

Ишбаев Гниятулла Гарифуллович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО НПП «БУРИТНЕХ»
Россия, 450112, г. Уфа, ул. Юбилейная, 4/1
E-mail: bit@burinteh.com;

Ковалевский Евгений Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела ПРИ ЦР ООО НПП «БУРИТНЕХ»
Россия, 450112, г. Уфа, ул. Юбилейная, 4/1
E-mail: KovalevskiiEA@burinteh.ru

Authors

R.R. Mingazov, drill bit designer, «Burintekh» Ltd
4/1 Yubileinaya St., Ufa, 450112, Russian Federation
E-mail: rafm8607@gmail.com

K.R. Valyamov, PhD, associate professor, Ufa National Research Technical University
1 Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation
E-mail: karimvaliam@yandex.ru

G.G. Ishbaev, DSc, Professor, General Director, «Burintekh» Ltd
4/1 Yubileinaya St., Ufa, 450112, Russian Federation
E-mail: bit@burinteh.com

E.A. Kovalevskii, PhD, Head of Department PRI CR, «Burintekh» Ltd
4/1 Yubileinaya St., Ufa, 450112, Russian Federation
E-mail: KovalevskiiEA@burinteh.ru

Статья поступила в редакцию 08.03.2026
Принята к публикации 24.06.2026
Опубликована 30.06.2026