

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРОВОГО ДОЛОТА ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ЗАБОЙНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН С ПРОДУВКОЙ ВОЗДУХОМ

Р.У. Джураев¹, М.В. Меркулов², Д.Н. Хатамова¹, К.Х. Нормаев¹

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет,
Навои, Узбекистан, e-mail: dilyon_hat@bk.ru

² Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия

Аннотация: Вынос буровой мелочи происходит при условии превышения подъемной силы восходящей струи над массой частиц породы. При этом немаловажным показателем является и размер частиц. При превышении размеров буровой мелочи над величиной зазора пробуренная порода не может подниматься вверх и требуется дополнительное дробление. Однако при значительном зазоре снижается скорость сжатого воздуха, следовательно, частицы не выносятся. По этой причине при продувке забоя скважины основными параметрами режима бурения являются расход и давление воздуха, от которых существенным образом зависят технико-экономические показатели бурения. При использовании очистных агентов низкой теплоемкости и теплопроводности (сжатый воздух, азированная жидкость) увеличивается влияние температурного фактора, по этой причине на сегодняшний день проблеме прогнозирования и нормирования температурного фактора посвящаются многие научные исследования. Исследовано влияние температурного режима на забое скважины при бурении скважин с пневмоочисткой, приведен краткий анализ научных трудов в данном направлении. Описана математическая модель нагрева зуба трехшарошечного долота на забое скважины при бурении с продувкой сжатым воздухом, доказывающая целесообразность охлаждения сжатого воздуха до отрицательных температур для нормализации температурного фактора. Представлены результаты экспериментальных исследований разработанного устройства двухстадийного охлаждения очистного воздуха, позволяющего увеличить эффективность очистки забоя скважины. Разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров режима.

Ключевые слова: сжатый воздух, бурение, температурный режим, двухстадийное охлаждение, режим бурения, вихревая трубка, долото, теплоизолированная буровая труба.

Для цитирования: Джураев Р. У., Меркулов М. В., Хатамова Д. Н., Нормаев К. Х. Повышение эффективности бурового долота путем снижения забойной температуры при бурении скважин с продувкой воздухом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 6. – С. 125–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_125.

Improvement of drill bit efficiency by bottom-hole temperature reduction in air blast drilling

R.U. Djuraev¹, M.V. Merkulov², D.N. Khatamova¹, Q.H. Normayev¹

¹ Navoi State University of Mining and Technology, Navoi, Uzbekistan, e-mail: dilyon_hat@bk.ru

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRU),
Moscow, Russia

Abstract: Removal of drilling chips takes place when the lifting force of the upward air current exceeds the weight of rock particles. The size of particles is of no less importance. When the size of drill chips exceeds the size of the annulus clearance, the chips are incapable to move upward, and their additional crushing is required. On the other hand, if the annulus clearance size is too big, compressed air velocity decreases and the chips become unremovable. Thus, the main drilling parameters are the air flow rate and pressure which greatly govern the technical and economic performance indicators of drilling. When the cleaning agents (compressed air, aerated liquid) have low heat capacity and thermal conductivity, the influence of the temperature factor jumps. For this reason, prediction and rating of the temperature factor is currently in focus of numerous scientific studies. The influence of the temperature regime at bottom-hole during air blast drilling is investigated, and the related research papers are reviewed in brief. The mathematical model of heating of a tricone bit tooth at bottom-hole during compressed air blast drilling is described: the model proves expediency of compressed air cooling down to negative temperatures toward the temperature factor normalization. The experimental test data of a developed two-stage cleaning air cooling facility, which enhances the bottom-hole cleaning efficiency, are described. The recommendations on selection of an efficient temperature regime are given.

Key words: compressed air, drilling, temperature regime, two-stage cooling, drilling regime, vortex tube, drill bit, heat-insulated drill pipe.

For citation: Djuraev R. U., Merkulov M. V., Khatamova D. N., Normayev Q. H. Improvement of drill bit efficiency by bottom-hole temperature reduction in air blast drilling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(6):125-138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_125.

Введение

Породоразрушающий инструмент является основной и самой нагруженной частью буровой установки. Значительная часть эксплуатационной производительности буровых установок зависит от работы породоразрушающего инструмента и правильной организации режимов бурения [1]. Улучшение эксплуатационных показателей породоразрушающего инструмента позволяет значительно сократить эксплуатационные расходы бурового оборудования [2].

Кроме свойств горных пород на эффективность буровых работ влияют также и режимные характеристики бурового оборудования, к которым можно отнести осевую нагрузку P_{oc} , расход очистного агента Q , скорость вращения буровой колонны v [3].

Процесс бурения происходит за счет передачи мощности от бурового станка к буровому долоту, в результате возникает износ и снижение стойкости долота. Одновременно с разбуриванием забой очищается сжатым воздухом, эф-

эффективность выноса буровой мелочи зависит от характеристик пневмосистемы и долота [4]. Значение давления и расхода сжатого воздуха влияют на энергоемкость и скорость бурения, а также на работоспособность породоразрушающего инструмента через его охлаждение, с одной стороны, конструктивные характеристики и аэродинамические характеристики долота влияют на скорость и эффективность удаления шлама, с другой стороны [5, с. 4–5].

Породоразрушающий инструмент выделяет тепло, воспринимающееся очистным агентом в призабойной зоне скважины, и является местным источником тепла, осложняющим процесс теплообмена в результате изменения температуры восходящего и нисходящего потоков [6]. Трение, возникающее в кольцевом пространстве, между бурильной трубой и стенкой скважины, массообменные процессы также являются дополнительным источником тепла [7]. Температура очистного агента зависит от расхода, начальной температуры, скорости движения и турбулентности промывочной среды, свойств породы, конструктивных особенностей и свойств материала буровой колонны, а также от режимов бурения [8]. Перечисленные факторы влияют по-разному на различных участках скважины и изменяются во времени.

Ликвидация последствий высокого температурного режима на забое скважины занимает в среднем 8–10% от общего времени, отведенного на бурение. Таким образом, повышение эффективности процесса бурения напрямую связано с решением вопросов по снижению температуры породоразрушающего инструмента.

Исследование влияния температурного режима работы породоразрушающего инструмента на эффективность при бурении скважин с очисткой забоя воздухом

Процесс бурения можно рассматривать как взаимодействие процесса разрушения горной породы и износ долота [9, с. 207]. При внедрении породоразрушающего инструмента в горную породу после достижения нагрузки, равной пределу упругости породы, порода скалывается по периферии зуба долота, при этом им образуется зона смятой породы, уплотняющейся в процессе дальнейшего бурения. За лункой скола образуется зона предразрушения, которая состоит из ослабленной породы. При сколе зуб начинает внедряться в породу, в момент t_M (рис. 1) скорость внедрения достигает максимального значения, а затем она снижается, так как под зубом порода по-

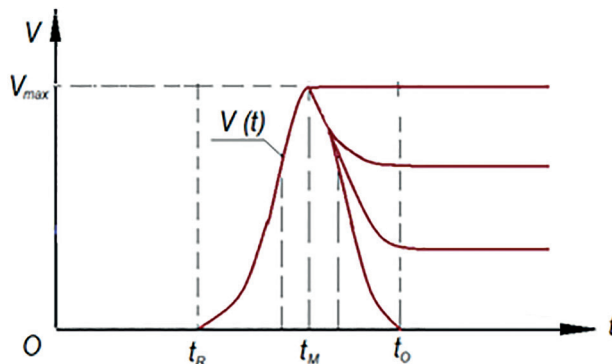


Рис. 1. Изменение во времени скорости внедрения зуба в породу [10, с. 13–17]

Fig. 1. Change over time in the rate of tooth penetration into the rock [10, p. 13–17]

стоянно уплотняется. В результате при дальнейшем увеличении осевой нагрузки наблюдается снижение скорости внедрения, с последующим разрушением зуба [10, с. 13–17].

В момент времени t_R наблюдается деформация породы, так как осевое усилие достигает предела упругости породы, усилие составляет P_R , что вызывает скол породы. При этом значительная часть осевой нагрузки уплотняет смятую под долотом породу, и лишь малая ее доля действует на забой скважины. Так для продолжения внедрения зуба возникает необходимость повышения нагрузки (участок $t_M - t_O$), однако при достижении момента внедрения прекратится полностью. Для возобновления процесса внедрения необходимы вынос смятой породы из-под зуба с помощью очистного агента и перемещение зуба по забою вращением инструмента. Дальнейшее бурение породы возможно только при таком значении частоты вращения, при котором период обращения зуба по забою скважины находится в пределах $t_O - t_R$ [10, с. 13–17].

При условии $t_O < t_R$ происходит резкое увеличение частоты вращения, так как зуб долота не внедряется в горную породу. Породоразрушающий инструмент, вращаясь по забою, не разрушает породу, в результате забойная энергия преобразуется в теплоту трения, что приводит к перегреву породоразрушающего инструмента и возникновению температурной деформации [10, с. 13–17].

Увеличение забойной мощности и частоты вращения приводит к температурным деформациям, возникшим по различным причинам (образование шламового режима, прекращение или неудовлетворительная циркуляция очистного агента, нерациональный режим бурения и др.) [11, с. 586–590].

Согласно литературным источникам [10, с. 5–6], на разбуривание породы

расходуется до 15–20% механической энергии, остальная часть преобразуется в тепловую, в результате возникают высокие температурные режимы, приводящие к снижению твердости и разрушению алмазов, деформации матриц, а также прижогам инструментов. Увеличение температуры до 650 °С вызывает заполирование резцов алмазных долот, до 800 °С – растрескивание и выпадение из матрицы алмазных зерен. Нагрев алмазных долот до 600 °С приводит к снижению микротвердости на 30%, до 1000 °С – на 60%. Для крупных зерен характерно растрескивание по поверхности спайности или двойникования, для мелких зерен – зашлифование поверхности [12].

При бурении в скальных породах наблюдается высокое сопротивление породы внедрению породоразрушающего инструмента, впоследствии алмазные зубья скалываются или раздавливаются, в результате воздействия на малой площади повышенной забойной мощности происходит перегрев зубьев, снижение абразивности и микротвердости, с соответствующими механическими деформациями. Возникающие деформации, как температурные, так и механические, в результате воздействия высокой температуры могут накладываться друг на друга, что затрудняет определение природы их возникновения [13, с. 24].

В результате конвективного теплообмена очистной агент одновременно отводит выделяемое тепло, однако вскоре количество поступающего и отводимого тепла уравнивается и на теле породоразрушающего инструмента возникает тепловое поле [14, с. 3].

Впервые вопросы температурного режима исследованы Б.Б. Кудряшовым, которым доказана значительная зависимость температуры буровой коронки от забойной мощности, свойств материала и очистного агента, габаритных

размеров инструмента, определены основные направления нормализации температурного режима в процессе бурения, что послужило основой для исследований О.В. Зорэ, Л.К. Горшкова, П.Н. Курочкина, А.В. Касаточкина и др. В процессе изучения прижога породоразрушающих инструментов определено образование значительного количества шлама при бурении горных пород низкой категории буримости, что приводит к истиранию породоразрушающего инструмента «всухую».

При бурении горных пород более высокого показателя буримости нагревание долота доходит до значений, приводящих к плавлению некоторых частиц. Также прекращение подачи сжатого воздуха для очистки забоя приводит к интенсивному тепловому износу долота [14, с. 3].

Исключение или нормализация температурного фактора позволит снизить степень деформируемости породоразрушающего инструмента, а также исключить одну из причин удорожания буровых работ [15, с. 35].

Математическое моделирование нагрева зуба трехшарошечного долота

При бурении скважин тепловой поток поступает через зуб к телу матрицы и корпусу долота и отводится очистным агентом.

Если обозначить температуру сжатого воздуха в призабойной зоне $t_{в.з.}$, прирост температуры сжатого воздуха будет равен

$$\varepsilon_{сжк} = t_{тек} - t_{в.з.}, \quad (1)$$

где $t_{тек}$ — текущее значение температуры, $^{\circ}\text{C}$.

Соответственно, прирост температуры зубьев долота будет равен

$$\varepsilon_{зуб} = t_{зуб} - t_{тек}, \quad (2)$$

где $t_{зуб}$ — температура зубьев, $^{\circ}\text{C}$.

Уравнение теплового баланса рассматриваемого элемента dx (рис. 2) с учетом закона Фурье [16]:

$$\begin{aligned} dQ &= Q_x - Q_{x+dx} = -S_{зуб} \lambda \frac{d\varepsilon_{сжк}}{dx} - \\ &- \left[-S_{зуб} \lambda \frac{d}{dx} \left(\varepsilon_{сжк} + \frac{d\varepsilon_{сжк}}{dx} dx \right) \right] =, \quad (3) \\ &= S_{зуб} \lambda \frac{d^2 \varepsilon_{сжк}}{dx^2} dx \end{aligned}$$

где dQ — тепло, отводимое в окружающую среду от элемента dx , Вт; Q_x — тепло, поступающее на элемент dx , Вт; Q_{x+dx} — тепло, выходящее из противоположной стороны элемента dx , Вт; λ — теплопроводность зуба долота, Вт/м $^{\circ}\text{C}$.

По закону Ньютона–Рихмана [16],

$$dQ = \alpha Q_{зуб} \Pi_{зуб} dx. \quad (4)$$

Приравняв правые части уравнений (3) и (4)

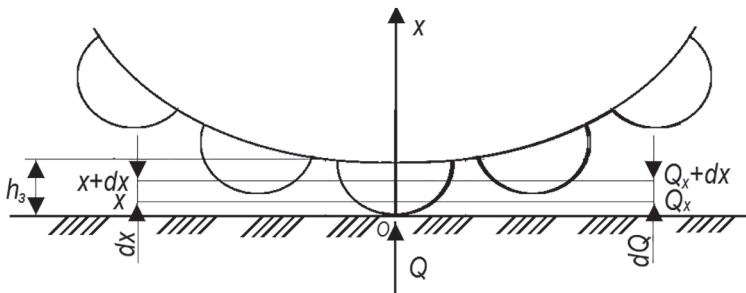


Рис. 2. Расчетная схема определения температуры нагрева зубьев долота
Fig. 2. Calculation scheme for determining the heating temperature of the bit teeth

$$S_{зуб} \lambda \frac{d^2 \varepsilon_{сжс}}{dx^2} dx = \alpha Q_{зуб} P_{зуб} dx ,$$

получаем дифференциальное уравнение изменения температуры зуба:

$$\frac{d^2 \varepsilon_{сжс}}{dx} = \frac{\alpha P_{зуб}}{\lambda S_{зуб}} \varepsilon_{сжс} = \zeta^2 \varepsilon_{сжс} , \quad (5)$$

где ζ – условное обозначение,

$$\zeta = \sqrt{\frac{\alpha P_{зуб}}{\lambda S_{зуб}}} .$$

Полученное дифференциальное уравнение (5) показывает, что при условии $\alpha = const$ и $\lambda = const$ для рассматриваемого интервала температуры $\zeta = const$.

Аналогичным образом получаем дифференциальные уравнения для изменения температуры матрицы и лапы долота:

$$\frac{d^2 \varepsilon_{мат}}{dx^2} = \varphi^2 \varepsilon_{мат} ; \frac{d^2 \varepsilon_{лоп}}{dx^2} = \sigma^2 \varepsilon_{лоп} , \quad (6)$$

где φ – условное обозначение, $\varphi = \sqrt{\frac{\alpha P_{мат}}{\lambda S_{мат}}}$; σ – условное обозначение,

$\sigma = \sqrt{\frac{\alpha P_{лоп}}{\lambda S_{лоп}}}$; $\varepsilon_{мат}$ и $\varepsilon_{лоп}$ – прирост температуры, соответственно для матрицы и лапы долота, °C; $P_{мат}$ и $P_{лоп}$ – периметр матрицы и лапы долота соответственно, м; $S_{мат}$ и $S_{лоп}$ – площадь поперечного сечения матрицы и лапы долота соответственно, м²; λ – теплопроводность матрицы и лапы долота соответственно, Вт/м·°C.

Выразим тепловой поток, проходящий через зуб:

$$Q = -\lambda S_{зуб} \frac{d}{dx} [\varepsilon(x)]_{x=0} . \quad (7)$$

Подставив в уравнение (7) значение градиента температуры $\frac{d}{dx} [\varepsilon(x)]_{x=0}$ и проведя соответствующие преобразования, получим

$$Q = \lambda S_{зуб} \left\{ \zeta \varepsilon_{зуб} - \frac{\lambda_{мат}}{\lambda} \left[\varphi \varepsilon_{лоп} - 2 \frac{\varphi \varepsilon_{лоп} e^{\varphi h}}{e^{\varphi(h-h_{зуб})} + 1} + \frac{\sigma \frac{\lambda_{лоп} S_{лоп}}{\lambda_{мат} S_{мат}} \varepsilon_{мк}}{e^{-\varphi(h-h_{зуб})}} \right] \right\} . \quad (8)$$

Решая (8) относительно $\varepsilon_{зуб}$, получим выражение для тепла, способствующего приросту температуры зуба:

$$Q_{зуб} = \frac{S_{зуб} \lambda_{мат} \varepsilon_{лоп} \left[2 \cdot \frac{\varphi e^{\varphi h + \sigma \frac{\lambda_{лоп} S_{лоп}}{\lambda_{мат} S_{мат}}}}{e^{\varphi(h-h_{зуб})} + e^{-\varphi(h-h_{зуб})}} - \varphi \right]}{\lambda S_{зуб} \zeta} . \quad (9)$$

В скважине происходит нагрев сжатого воздуха в результате теплообменных процессов со стенками канав, а также с поверхностью долота, нагревающегося в процессе разрушения горной породы. В результате значение температуры очистного воздуха на забое скважины можно записать в виде формулы

$$t_{\text{в.з.}} = \frac{Q}{2Gc_{\text{СЖ.в.}}} + \varphi \frac{\mu v^2}{2gc_{\text{СЖ.в.}}} + t_{\text{СЖ.в.}}^0, \quad (10)$$

где G – расход сжатого воздуха, кг/с; μ – коэффициент, учитывающий превращения кинетической энергии в тепловую, при очистке воздуха продувкой принимают турбулентный поток, $\mu = 0,89$; φ – тепловой эквивалент работы.

Соответственно, температуру нагрева зуба при воздействии теплового потока можно определить по формуле

$$t_{\text{зуб}} = t_{\text{в.з.}} + \frac{Q_n \left\{ 1 - \frac{S_{\text{зуб}} 2\sigma\xi \frac{\lambda_{\text{лоп}} S_{\text{лоп}}}{\lambda_{\text{мат}} S_{\text{мат}}} + 2\varphi e^{\varphi h} - \varphi \left[e^{\varphi(h-h_{\text{зуб}})} + e^{-\varphi(h-h_{\text{зуб}})} \right]}{S_{\text{мат}} 2\sigma\xi \frac{\lambda_{\text{лоп}} S_{\text{лоп}}}{\lambda_{\text{мат}} S_{\text{мат}}} + \varphi e^{\varphi h} - \varphi \left[e^{\varphi(h-h_{\text{зуб}})} - e^{-\varphi(h-h_{\text{зуб}})} \right]} \right\}}{\lambda S_{\text{зуб}} \zeta \tau}. \quad (11)$$

Из анализа вышеприведенной математической модели нагрева долота следует, что путем непосредственного охлаждения очистного воздуха в призабойной зоне возможно нормализовать температурный фактор и, как следствие, повысить эффективность бурения [15, с. 38].

Экспериментальное исследование устройства двухстадийного охлаждения очистного воздуха

На современном этапе развития научно-исследовательских работ предложено большое количество способов эффективного охлаждения забоя скважины путем нормализации температурного режима. Общеизвестными из них являются: использование охлажденных на поверхности растворов, при бурении глубоких скважин с промывкой скважины применение химически обработанных растворов, теплоизоляция бурильной колонны для придания термостойкости [17]. В случае использования сжатого воздуха или других газов эффективным считается снижение начальной температуры очистного агента, испарительное охлаждение путем увлажнения продувочного воздуха в призабойной зоне, а также продувка опор. Как показывает практика бурения, имеется положительный опыт использования вихревой трубки в качестве холодильной установки [18, с. 32 – 33].

При бурении с пневмоочисткой из компрессорной установки поступает нагретый сжатый воздух температурой $50 \div 60$ °С, он продолжает нагреваться за счет теплового потока, направляющегося от забоя скважины к устью [19, с. 509]. Подача нагретого воздуха в вихревой охладитель на забое снижает эффективность температурного разделения потоков воздуха [20], поэтому предлагается охлаждение продувочного воздуха на поверхности до отрицательных температур и применение теплоизолированных труб для предотвращения теплообмена подаваемого воздуха в скважину с поднимающимся потоком в кольцевом зазоре скважины и породы. Для этого разработана усовершенствованная конструкция бурового инструмента, представленная на рис. 3 [15, с. 38].

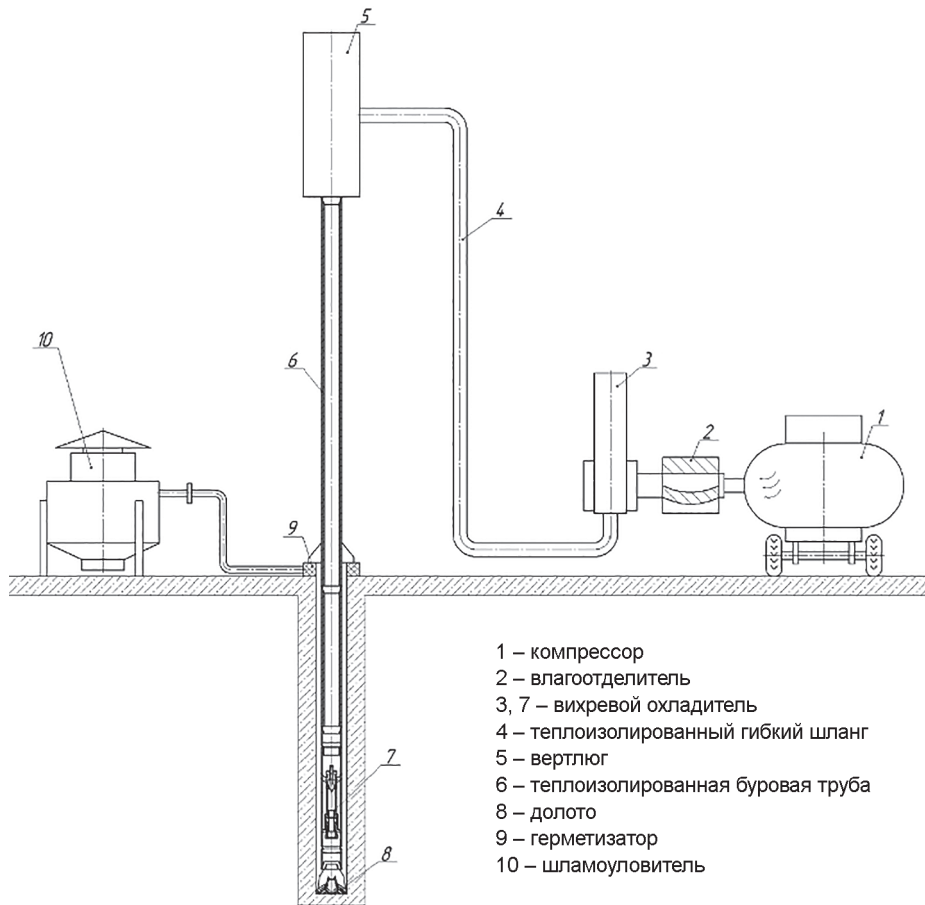


Рис. 3. Устройство для бурения скважин с двухстадийным охлаждением очистного воздуха [15, с. 38]
 Fig. 3. Device for drilling wells with two-stage cooling of purification air [15, p. 38]

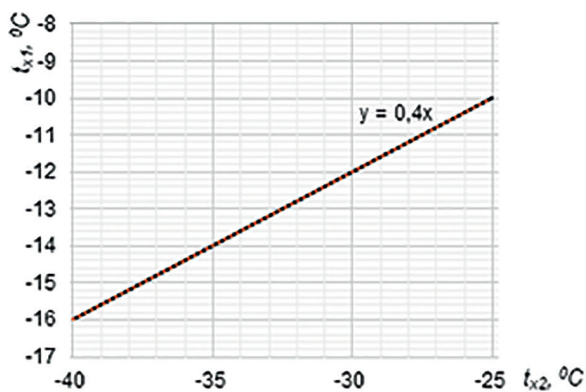


Рис. 4. Зависимость температуры охлажденного воздуха, выходящего из бурового снаряда с вихревым охладителем (t_{x2}), от температуры подаваемого воздуха (t_{x1}) [15, с. 39]
 Fig. 4. Dependence of the temperature of the cooled air leaving the drill string with a vortex cooler (t_{x2}) on the temperature of the supplied air (t_{x1}) [15, p. 39]

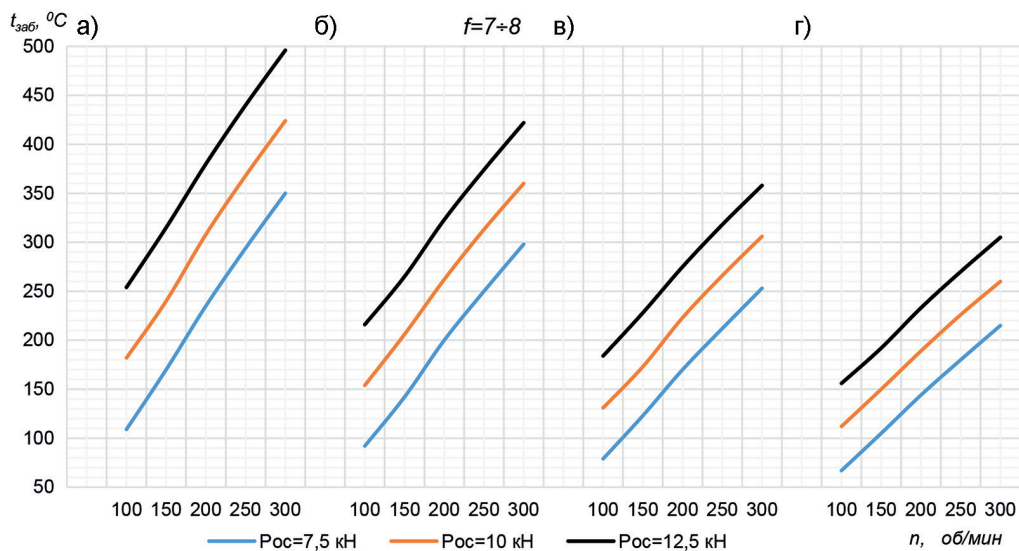


Рис. 5. Зависимость температуры на забое ($t_{заб}$) от начальной температуры очистного воздуха ($t_{х2}$), частоты вращения долота (n) и осевой нагрузки на долота ($P_{ос}$), для горных пород с коэффициентом крепости породы $f = 7 \div 8$: $t_{х2} = -25$ °C, $G = 0,11$ кг/с (а); $t_{х2} = -30$ °C, $G = 0,13$ кг/с (б); $t_{х2} = -35$ °C, $G = 0,15$ кг/с (в); $t_{х2} = -40$ °C, $G = 0,17$ кг/с (г)

Fig. 5. Dependence of the temperature at the bottom ($t_{заб}$) on the initial temperature of the cleaning air ($t_{х2}$), bit rotation speed (n) and axial load on the bits ($P_{ос}$), for rocks with rock strength coefficient $f = 7 \div 8$: $t_{х2} = -25$ °C, $G = 0.11$ kg/s (a); $t_{х2} = -30$ °C, $G = 0.13$ kg/s (b); $t_{х2} = -35$ °C, $G = 0.15$ kg/s (v); $t_{х2} = -40$ °C, $G = 0.17$ kg/s (g)

С целью определения эффективности разработанного устройства двухстадийного охлаждения и использования теплоизолированных труб получены зависимости (рис. 4 и 5), доказывающие, что путем охлаждения очистного воздуха до отрицательных температур можно снизить температуру на забое скважины, следовательно, применить наиболее оптимальные режимы бурения [15, с. 39].

Температура на забое скважины ($t_{заб}$) оказывает значительное влияние на стойкость долота (l_{pec}), повышение температуры забоя скважины снижает работоспособность долота, в результате снижается его проходная способность.

Для исследования зависимости стойкости долота (l_{pec}) от забойной температуры ($t_{заб}$) при определенных режимах бурения ($P_{ос} = 7,5$ кН; $n = 100; 150; 200; 250$ и 300 мин⁻¹) построена гистограмма, приведенная на рис. 6. Из гистограммы следует, что снижение температуры

очистного воздуха позволяет увеличить стойкость долота и применить высокооборотное бурение, вследствие чего увеличивается скорость бурения скважины.

Повышение температуры долота, работающего на забое, ухудшает разрушающую способность зубьев, т.е. вместо объемного разрушения наблюдается усталостное бурение, и приводит к снижению механической скорости бурения.

На рис. 7 приведена зависимость механической скорости бурения ($v_{мех}$) от температуры охлажденного воздуха ($t_{х2}$), выходящего из бурового снаряда с вихревым охладителем, при бурении горных пород коэффициентом крепости $f = 7 \div 8$, осевой нагрузкой $P_{ос} = 7,5$.

Согласно графику, представленному на рис. 7, при бурении пород с коэффициентом крепости $f = 7 \div 8$ охлаждение продувочного воздуха на каждые 5 °C, увеличение его расхода на 0,02 кг/с приводит к увеличению механической ско-

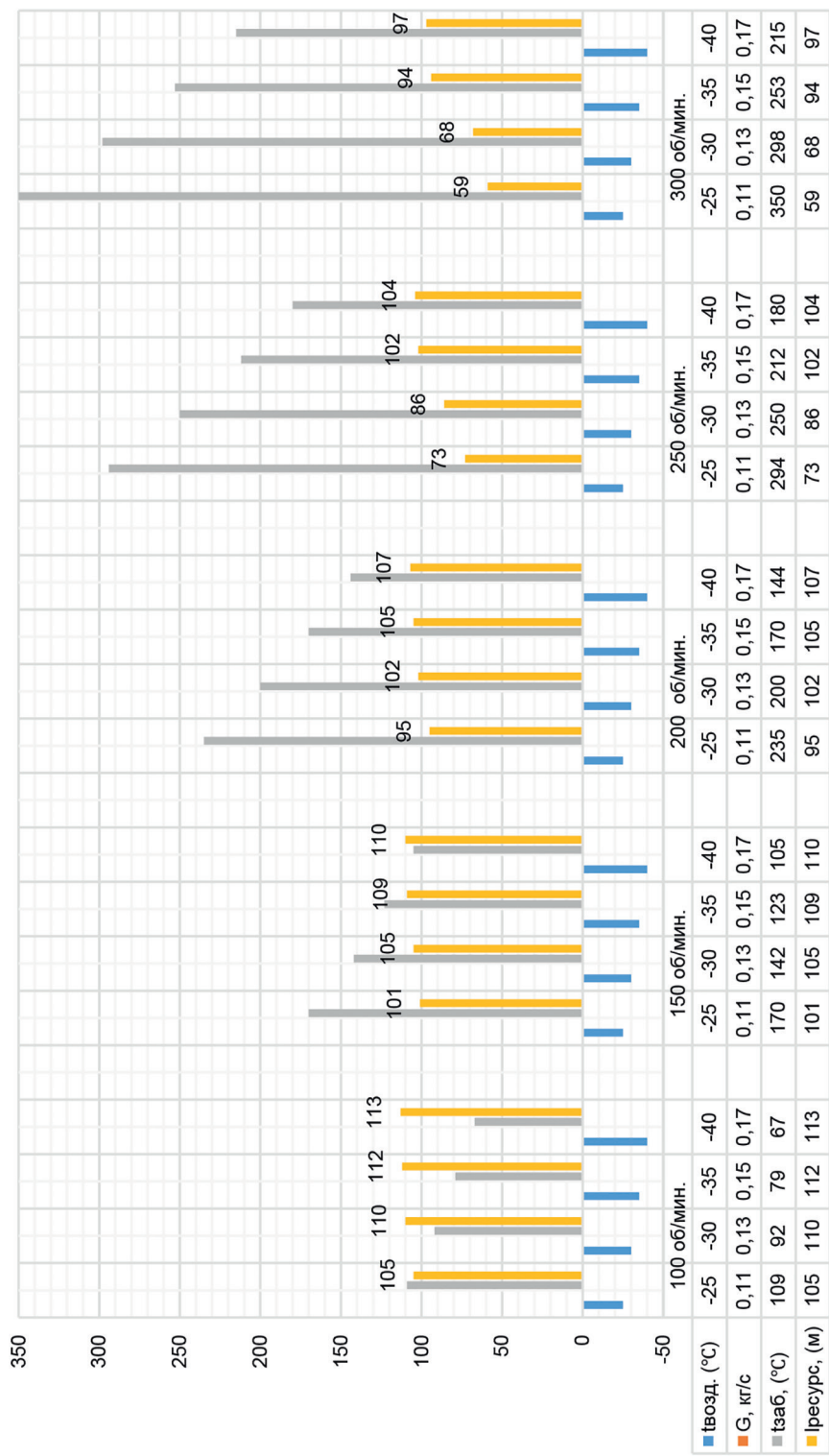


Рис. 6. Зависимость стойкости долота ($l_{бит}$) от температуры на забое ($t_{заб}$) при $f = 7 \div 8$; $P_{oc} = 7,5$ кН; $n = 100$; 150; 200; 250 и 300 мин⁻¹
 Fig. 6. Dependence of bit life (l_{bit}) on bottomhole temperature ($t_{заб}$) at $f = 7 \div 8$; $P_{oc} = 7.5$ kN; $n = 100$; 150; 200; 250 and 300 min⁻¹

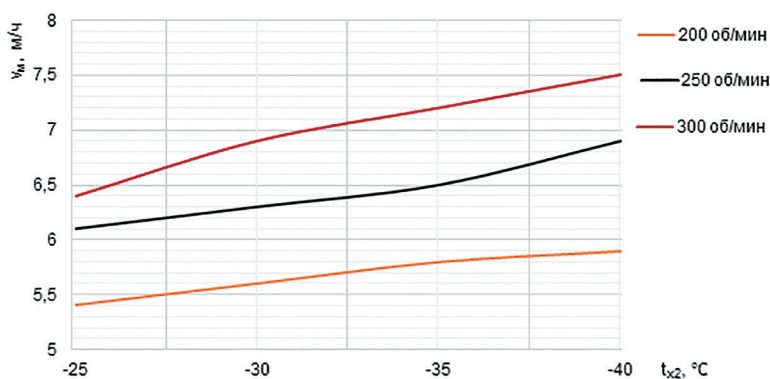


Рис. 7. Зависимость механической скорости бурения ($v_{\text{мех}}$) от температуры (t_{x2}) воздуха
 Fig. 7. Dependence of mechanical drilling speed ($v_{\text{мех}}$) on air temperature (t_{x2})

рости бурения $v_{\text{мех}}$ в среднем на 5–6%. Также в ходе экспериментальных испытаний установлено, что повышение коэффициента крепости горной породы на 1–2 единицы приводит к уменьшению механической скорости бурения в среднем на 10–15%.

Анализ практики бурения с продувкой скважин показывает отсутствие рекомендаций по выбору рационального режима бурения, обеспечивающего высокую эффективность бурения с пневмоочисткой [20].

На основе проведенных экспериментальных исследований разработаны ре-

комендации по выбору оптимальных режимов бурения (таблица), позволяющих обеспечить высокоэффективное и бюджетное бурение с пневмоочисткой путем применения двухстадийного охлаждения очистного воздуха.

Применение устройства с двухстадийным охлаждением очистного воздуха при бурении скважин с продувкой сжатым воздухом позволило увеличить механическую скорость бурения и стойкость долота. Однако для достижения наибольшей эффективности при применении данного устройства необходимо выбрать рациональный режим бурения.

Рекомендации по выбору параметров режима бурения [15, с. 41]

Recommendations for choosing drilling mode parameters [15, p. 41]

Коэффициент крепости	Осевая нагрузка $P_{\text{ос}}$, кН	Частота вращения n , об/мин	Расход сжатого воздуха G , кг/с	Температура очистного воздуха t_{x2} , °C
$f = 7 - 8$	5–7,5	150–300	0,15–0,17	от –35 до –40
	7,5–10	150–250	0,15–0,17	от –35 до –40
	10–12,5	150–200	0,15–0,17	от –35 до –40
$f = 9 - 10$	5–7,5	200–300	0,15–0,17	от –35 до –40
	7,5–10	100–250	0,15–0,17	от –35 до –40
	10–12,5	100–200	0,17	–40
$f = 11 - 12$	5–7,5	200–250	0,13–0,17	от –30 до –40
	7,5–10	150–200	0,17	–40
	10–12,5	100–150	0,17	–40

Выбранный по таблице, исходя из коэффициента крепости породы, рациональный режим бурения позволит повысить эффективность буровых работ.

Заключение

Разработанная математическая модель нагрева зуба шарошечного бурового долота при бурении с очисткой забоя воздухом позволяет рассчитать температуру нагрева зуба и матрицы трехшарошечного бурового долота с учетом комплекса технологических, конструктивных и теплофизических факторов, а также физико-механических свойств горных пород при бурении скважин с продувкой воздухом.

Проведенные экспериментальные исследования эффективности применения устройства для бурения скважин с двухстадийным охлаждением очистного воздуха позволили получить зависимость механической скорости бурения и стойкости долота от температуры и расхода очистного воздуха.

В результате проведенных экспериментальных исследований определены оптимальные параметры режима бурения, обеспечивающие высокую эффективность и низкую себестоимость бурения с очисткой продувкой сжатым воздухом с использованием устройства для бурения скважин с двухстадийным охлаждением очистного воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закиров Н. Н. Влияние технологических параметров процесса бурения на износ узлов долота // Известия вузов. Нефть и газ. — 2004. — № 9. — С. 69–74.
2. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Зигангиров Р. Р., Мифтахов А. А., Суворов Ю. И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 231–245.
3. Долгий И. Е. Сопротивление горных пород разрушению при бурении скважин // Записки Горного института. — 2016. — № 5. — С. 655–660.
4. Двойников М. В., Куншин А. А. Повышение эффективности бурения наклонных и горизонтальных скважин // Нефтегаз. — 2020. — № 4. — С. 98–103.
5. Шигин А. О. Методология проектирования адаптивных вращательно-подающих органов буровых станков и технологий их применения в сложноструктурных породных массивах: Автореферат дис. ... докт. техн. наук. — Красноярск: ИНИТУ, 2015. — 22 с.
6. Mostafa M. A., Luiz A. H., Joachim F. O. Temperature modeling for wellbore circulation and shut-in with application in vertical geothermal wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021, vol. 204, article 108660.
7. Буткин В. Д., Минеев А. В., Вершинский С. Н. Новые методы очистки скважин при проведении буровых работ // Территория Нефтегаз. — 2007. — № 5. — С. 76–79.
8. Страупник И. А., Чистяков В. К. Расчет и оценка эффективности теплообменных скважин / Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин. Сборник докладов. — Томск: ТПУ, 2009. — С. 84–89.
9. Ramsey M. S. Practical wellbore hydraulics and hole cleaning: unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations (gulf drilling guides). Gulf Professional Publishing, 2019, 340 p.
10. Горшков Л. К., Гореликов В. Г. Температурные режимы алмазного бурения. — М.: Недра, 1992. — 173 с.
11. Stefan Z. M., Robert F. M. Drilling mechanics: Advanced applications and technology. McGraw Hill, 2022, 688 p.
12. Djuraev R. U., Khatamova D. N. Forecasting and regulating the temperature regime while drilling wells with stall air cleaning // International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences. 2019, vol. 9, no. 3, pp. 57–61.
13. Нескоромных В. В., Попова М. С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: Монография. — Красноярск: СФУ, 2020. — 268 с.
14. Семенова А. Н. Теоретическое изучение теплопереноса в скважине и горном массиве применительно к задачам геометрии. Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. — М.: РГГПУ, 2006. — 30 с.

15. Хатамова Д. Н. Научные основы эффективной эксплуатации буровых установок на основе разработки ресурсосберегающих технологий: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Навои: НГГТУ, 2024. — 58 с.

16. Ramey H. Wellbore heat transmission // *Journal of Petroleum Technology*. 2013, vol. 14, no. 4, pp. 427 – 435. DOI: 10.2118/96-PA.

17. Li W., Xie T., Xu K., Huo H. Thermal insulation performance evaluation and installation length optimization of inner coating thermal insulation drillpipe // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2023, vol. 59, no. 1. DOI: 10.1007/s10553-023-01612-7.

18. Ramsey M. *Practical wellbore hydraulics and hole cleaning: unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations*. Texas, Gulf Professional Publishing, 2019, 329 p.

19. Crumpton H. *Well control for completions and interventions*. Texas, Gulf Professional Publishing, 2018, 815 p.

20. Merkulov M. V., Djuraev R. U., Leontyeva O. B., Makarova G. Y., Tarasova Y. B. Simulation of thermal power on bottomhole on the bases of experimental studies of drilling tool operation // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020, vol. 8, no. 8, pp. 4383 – 4389. DOI: 10.30534/ijeter/2020/55882020. **WAS**

REFERENCES

1. Zakirov N. N. Influence of technological parameters of the drilling process on the wear of bit components. *Oil and Gas Studies*. 2004, no. 9, pp. 69 – 74. [In Russ].

2. Vinogradov Yu. I., Khokhlov S. V., Zigangirov R. R., Miftakhov A. A., Suvorov Yu. I. Optimization of specific energy consumption for crushing rocks by explosion in deposits with a complex geological structure. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 231 – 245. [In Russ].

3. Dolguy I. E. Resistance of rocks to fracture during well drilling. *Journal of Mining Institute*. 2016, no. 5, pp. 655 – 660. [In Russ].

4. Dvoynikov M. V., Kunshin A. A. Increasing the efficiency of drilling inclined and horizontal wells. *Neftegaz*. 2020, no. 4, pp. 98 – 103. [In Russ].

5. Shigin A. O. *Metodologiya proektirovaniya adaptivnykh vrashchatel'no-podayushchikh organov burovyykh stankov i tekhnologiy ikh primeneniya v slozhnostrukturnykh porodnykh massivakh* [Methodology for the design of adaptive rotary-feeding bodies of drilling rigs and technologies for their use in complex structural rock masses: Abstract of the dissertation of a doctor of technical sciences], Doctor's thesis, Krasnoyarsk, INITU, 2015, 22 p.

6. Mostafa M. A., Luiz A. H., Joachim F. O. Temperature modeling for wellbore circulation and shut-in with application in vertical geothermal wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021, vol. 204, article 108660.

7. Butkin V. D., Mineev A. V., Vershinsky S. N. New methods of well cleaning during drilling operations. *Territory of Neftegaz*. 2007, no. 5, pp. 76 – 79. [In Russ].

8. Straupnik I. A., Chistyakov V. K. Calculation and evaluation of the efficiency of heat exchange wells. *Problemy nauchno-tekhnicheskogo progressa v burenii skvazhin. Sbornik dokladov* [Problems of scientific and technological progress in drilling wells. Collection of reports], Tomsk, TPU, 2009, pp. 84 – 89. [In Russ].

9. Ramsey M. S. *Practical wellbore hydraulics and hole cleaning: unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations (gulf drilling guides)*. Gulf Professional Publishing, 2019, 340 p.

10. Gorshkov L. K., Gorelikov V. G. *Temperaturnye rezhimy almaznogo bureniya* [Temperature regimes of diamond drilling], Moscow, Nedra, 1992, 173 p.

11. Stefan Z. M., Robert F. M. *Drilling mechanics: Advanced applications and technology*. McGraw Hill, 2022, 688 p.

12. Djuraev R. U., Khatamova D. N. Forecasting and regulating the temperature regime while drilling wells with stall air cleaning. *International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences*. 2019, vol. 9, no. 3, pp. 57 – 61.

13. Neskoroimnykh V. V., Popova M. S., Baochang L. *Razrushenie gornyykh porod pri burenii skvazhin almaznym burovym instrumentom: Monografiya* [Rock destruction during drilling with a diamond drilling tool: monograph], Krasnoyarsk, SFU, 2020, 268 p.

14. Semenova A. N. *Teoreticheskoe izuchenie teplotoperenosa v skvazhine i gornom massive primenitel'no k zadacham geometrii* [Theoretical study of heat transfer in a well and a rock mass in relation to problems of geometry], Candidate's thesis, Moscow, RGGRU, 2006, 30 p.

15. Khatamova D. N. *Nauchnye osnovy effektivnoy ekspluatatsii burovnykh ustanovok na osnove razrabotki resursoberegayushchikh tekhnologiy* [Scientific principles of effective operation of drilling rigs based on the development of resource-saving technologies], Doctor's thesis, Navoi, NGGTU, 2024, 58 p.

16. Ramey H. Wellbore heat transmission. *Journal of Petroleum Technology*. 2013, vol. 14, no. 4, pp. 427 – 435. DOI: 10.2118/96-PA.

17. Li W., Xie T., Xu K., Huo H. Thermal insulation performance evaluation and installation length optimization of inner coating thermal insulation drillpipe. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2023, vol. 59, no. 1. DOI: 10.1007/s10553-023-01612-7.

18. Ramsey M. *Practical wellbore hydraulics and hole cleaning: unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations*. Texas, Gulf Professional Publishing, 2019, 329 p.

19. Crumpton H. *Well control for completions and interventions*. Texas, Gulf Professional Publishing, 2018, 815 p.

20. Merkulov M. V., Djuraev R. U., Leontyeva O. B., Makarova G. Y., Tarasova Y. B. Simulation of thermal power on bottomhole on the bases of experimental studies of drilling tool operation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020, vol. 8, no. 8, pp. 4383 – 4389. DOI: 10.30534/ijeter/2020/55882020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Джурев Рустам Умарханович¹ – д-р техн. наук, профессор, e-mail: r.u.djuraev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2712-3003,

Меркулов Михаил Васильевич – д-р техн. наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), e-mail: mvm.07@mail.ru,

Хатамова Дилшода Нармуратовна¹ – д-р техн. наук, доцент, e-mail: dilyon_hat@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0002-8336-9884,

Нормаев Кобилбек Хусанович¹ – PhD, доцент,

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, 210100, Узбекистан.

Для контактов: Хатамова Д.Н., e-mail: dilyon_hat@bk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.U. Djuraev¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: r.u.djuraev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2712-3003,

M.V. Merkulov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), 117997, Moscow, Russia, e-mail: mvm.07@mail.ru,

D.N. Khatamova¹, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, e-mail: dilyon_hat@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0002-8336-9884,

Q.H. Normayev¹, PhD, Assistant Professor,

¹ Navoi State University of Mining and Technology, 210100, Navoi, Uzbekistan.

Corresponding author: D.N. Khatamova, e-mail: dilyon_hat@bk.ru.

Получена редакцией 14.01.2025; получена после рецензии 20.02.2025; принята к печати 10.05.2025.

Received by the editors 14.01.2025; received after the review 20.02.2025; accepted for printing 10.05.2025.