

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКА ВОЗДУХА В ПОГРУЖНЫХ ПНЕВМОУДАРНИКАХ СТАНКОВ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ

Д. А. Юнгмейстер¹, Э. Э. Гасымов¹, А. И. Исаев¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия д.2

Аннотация: Многие карьеры РФ расположены в труднодоступной местности с тяжелыми климатическими и горно-геологическими условиями. Также массивы разрабатываемых пород часто бывают весьма переменными по крепости и трещиноватости, поэтому для увеличения скорости бурения могут использоваться буровые станки с погружными пневмоударниками (ППУ) для бурения. В статье рассматриваются вопросы о совершенствовании бурения взрывных скважин станком шарошечного бурения с погружным пневмоударником. Предлагается модернизированный погружной пневмоударник с воздушной заслонкой, через которую проходит регулируемый поток воздуха. Приведены результаты лабораторных исследований по определению потерь давления на воздушной задвижке; теоретически показано, что регулирование потока воздуха, поступающего в пневмоударник, может снижаться в заданном диапазоне с помощью открытия или закрытия воздушной задвижки. Увеличение скорости бурения самоходного оборудования путем использования погружных пневмоударников над шарошечным долотом позволит снизить себестоимость бурения. В рамках исследования была разработана усовершенствованная буровая установка с забойным молотком, управляемым радиоприемником. Для обоснования направлений модернизации буровой техники был сделан структурный, или морфологический, анализ. Был сделан расчет, который выполнялся в программе Ansys Discovery R2. Моделировалась статическая осевая нагрузка на шарошку.

Ключевые слова: карьерный буровой станок, погружной пневмоударник, шарошечное долото, удар, разрушение горной породы, скорость бурения, скважина, воздушная заслонка.

Для цитирования: Юнгмейстер Д. А., Гасымов Э. Э., Исаев А. И. Обоснование конструкции и параметров устройства для регулирования потока воздуха в погружных пневмоударниках станков шарошечного бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 251–267. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_251.

Substantiation of the design and parameters of the device for regulating the air flow in down-the-hole hammers of roller-cone drilling rigs

D. A. Jungmeister¹, E. E. Gasimov¹, A. I. Isaev¹

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract: Many Russian quarries are located in inaccessible areas with harsh climatic and mining and geological conditions. Also massifs of mined rocks are often quite variable in hardness and

fracturing, so to increase the rate of drilling, drilling rigs with submersible pneumatic hammer for drilling can be used. The article deals with the improvement of blast hole drilling by a roller cone drilling rig with a submersible pneumatic hammer. An upgraded submersible pneumatic hammer with an air damper through which a regulated air flow passes is proposed. The results of laboratory research on determining pressure losses at the air slide are given and it is shown theoretically that regulation of air flow entering the pneumatic hammer can be reduced in a given range by opening or closing the air slide. Increasing the drilling speed of self-propelled equipment, by using submersible air hammer over a roller cone bit, will reduce the drilling cost. As part of the study, an improved drilling rig with a downhole hammer controlled by a radio receiver was developed. A structural or morphological analysis was made to justify the directions of the drilling equipment modernization. A calculation was made, which was performed in the program Ansys Discovery R2. Static axial load on the cone was modeled.

Key words: open-pit drilling machine, submersible pneumatic hammer, roller cone bit, impact, rock destruction, drilling speed, air flap, borehole.

For citation: Jungmeister D. A., Gasimov E. E., Isaev A. I. Substantiation of the design and parameters of the device for regulating the air flow in down-the-hole hammers of roller-cone drilling rigs. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):251-267. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_251.

Важнейшей операцией при выполнении разведки и разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом является бурение взрывных скважин в массиве.

Модернизация буровой техники направлена на повышение производительности предприятия, улучшение показателей извлечения горных пород, повышение безопасности добывающих работ, которые адаптированы к конкретным отечественным объектам первоочередного освоения [1, 2, 3, 4].

Ударно-вращательный способ бурения в настоящее время получил широкое распространение благодаря его минимальной энергоемкости.

Поэтому как за рубежом, так и в России развивается техника на основе погружных пневмоударников, которые представляют собой машину ударного типа с максимальным коэффициентом полезного действия при передаче ударного импульса на забой [4–9].

На отечественных предприятиях, особенно железнорудных, основным буровым оборудованием является станок СБШ-250 [5, 6], который может

снабжаться погружными пневмоударниками для увеличения средней скорости бурения при бурении массивов с перемежающимися прослойками пород различных крепостей.

Часто бурение осуществляется при повышенной сейсмоактивности и высоком горном давлении массива, что связано с увеличением глубины, на которой ведутся добычные работы. При этом происходит деформация массива в блоке и обрушение до 50% пробуренных скважин. Во избежание указанных выше явлений актуально увеличение диаметра скважин с помощью пневмоударников, работающих с коронками не 110 мм, а 130 мм, при обеспечении достаточной производительности и пониженном динамическом воздействии на станок СБШ-250. Это требует повышения в 1.5 раза энергии удара пневмоударника, что наиболее просто реализуется переходом на высокое давление сжатого воздуха (2.5 МПа и более) [6, 7, 8].

В России для повышения производительности буровзрывных работ

требуется переход на повышенные диаметры скважин, поэтому вместо ударно-вращательного способа бурения и ППУ используют вращательный способ и шарошечные долота, которые могут работать с ППУ, но при регламентировании энергии удара.

Отказ от использования станков с ППУ, штыревых шарошек при переходе на диаметры 250 мм в том числе связан с отсутствием передвижных компрессоров высокого давления и «устаревшей идеологии компоновки буровых станков» [6, 7].

В настоящее время погружные пневмоударники, работающие на высоком давлении сжатого воздуха, в РФ не производят. Поэтому весьма актуальным является дальнейшее исследование совместного использования шарошек и ППУ с повышенным давлением воздуха в сети. Без решения этой проблемы и при отсутствии отечественных компрессоров высокого давления для СБШ возможны негативные последствия для горной промышленности России, так как сохраняется зависимость от импорта оборудования при невозможности снижения себестоимости работ.

«Анализ мирового опыта создания машин ударного действия показывает, что высокий уровень и частота приложения действующих нагрузок, контакт деталей с разрушаемым материалом и агрессивными средами приводят к быстрому выходу их из строя. В среднем ресурс работы отечественных погружных пневмоударников составляет 30–50 ч непрерывной работы, а зарубежных — 100–150 ч» [1, 2].

Поэтому актуальны обоснование критериев шарошечного бурения с помощью погружного пневмоударника и разработка эффективного способа управления бурением горных пород в этом случае.

Совершенствование конструкций карьерных буровых станков на основе морфологического анализа

Для обоснования направлений модернизации буровой техники может эффективно применяться структурный, или морфологический анализ [9, 10].

Можно составлять несколько матриц размером 3×3 . Каждый из 27 (или более) выбранных вариантов необходимо описать для полного представления «работы» по этому варианту конкретного устройства, и каждый из этих 27 вариантов сравнивается с прототипом, например станком СБШ-250МНА, по определенному набору параметров. При этом опять представляется целесообразным применение принципа «достаточности и необходимости трюстственности» (аксиома 1).

Можно предложить выбор из ряда следующих параметров (П):

- П1 — воздействие на среду (человека) — образование пыли, вибрация, повышенное образование трещин в массиве и др;
- П2 — стоимость выполнения операций (по функциям);
- П3 — энергозатраты на выполнение операций.

Как следует из описания, все параметры должны исследоваться на минимум. Это важно для дальнейшего трансформирования безразмерных матриц.

По каждому варианту составляются безразмерные матрицы 3×3 , каждый элемент которой выражен в двоичной системе и определяется как отношение величины i -ого параметра j -ой функции исследуемого варианта к величине i -го параметра j -ой функции прототипа.

Проведенный экспертами СПГУ и специалистами ОАО «Апатит» морфологический анализ процесса интенсификации бурения показал:

1) для модернизации СБШ целесообразно применение погружного пневмоударника с регулируемой ударной нагрузкой, что может привести к росту скорости бурения за счет повышения концентрации ударной нагрузки на лезвиях;

2) варианты с высоким приоритетом по параметру экологического воздействия на среду требуют обязательного снижения уровня вибрации бурового става, что может быть выполнено известными средствами, например пневмо- гидроамортизаторами [11].

Методы определения конструкции и исследования элементов бурового става

Конструирование вариантов бурового става с задвижкой является методом модернизации погружного пневмоударника за счет определения рациональной конструктивной схемы управления воздушным потоком для изменения параметров, реализуемых на ППУ [11 – 14].

Для анализа величины динамической силы на шарошку, в том числе учитывающей ударную нагрузку, выполнялись расчеты в программе Ansys Discovery R2 для исследования напряжений в шарошке.

Для физических исследований величины снижения давления за регулируемой задвижкой использована модель бурового става с задвижкой, при этом задействована модернизированная лабораторная установка, включающая вентилятор, регулируемые задвижки, манометры; ниже представлены результаты лабораторных исследований.

Модернизация погружного пневмоударника

Шарошечные долота широко используют при бурении взрывных скважин в карьерах и при подземной

разработке месторождений. При перекатывании шарошки по забою ее зубья внедряются в горную породу, которая разрушается в режиме смятия и дробления. В мягких и средних по твердости породах осуществляется так называемый режим проскальзывания зубьев, при котором происходит скалывание (срезание) стружки породы. На рис. 1 представлен привод заслонки в начальном положении инструмента — блок управления заслонкой 1, кабель 2, червячный механизм 3, направляющие упоры 4, вал привода заслонки 5, обода 6, подвижной заслонки 7 и привод червячного механизма 8.

В представленном варианте шарошечное долото соединено с пневмоударником через муфту, в нижней части которой горизонтально установлена подвижная заслонка 7, выполненная в виде двух пластин с отверстиями, которые установлены друг над другом и соединены единым ободом 6 (рис 2). В центре подвижной заслонки вертикально закреплен вал привода заслонки 5. На валу привода заслонки установлены не менее двух пар направляющих упоров 4, а между ними закреплен червячный механизм 3 с приводом червячного механизма. К внутренней стенке муфты над приводом червячного механизма жестко прикреплен блок управления заслонкой 7, который включает последовательно соединенные приемно-передающее устройство с аккумулятором и переключателем. В муфту вставлен пневмоударник с поршнем-ударником и хвостовиком. Пневмоударник установлен внутри нижнего участка бурового става 9 между муфтой и муфтой шарошки с хвостовиком шарошки. Между пневмоударником и внутренними стенками нижнего участка бурового става образуются воздушные каналы [2].

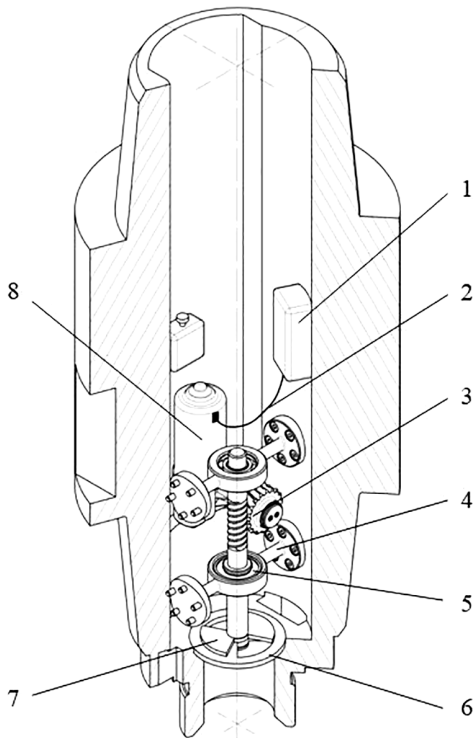


Рис. 1. Привод заслонки
Fig. 1. Damper actuator

На ходовой части установлена кабина, которая оснащена блоком управления с монитором связанный с антенной, установленной снаружи на кабине. Ретранслятор 10 установ-

лен снаружи на опорном узле мачты и является оборудованием связи, которое соединяет два или более радиопередатчика, удалённых друг от друга на большие расстояния, и также соединено через отверстие для подачи воздуха с буровым ставом 9.

Верхнее приемно-передающее устройство установлено внутри опорного узла вращателя станка (рис 3), напротив отверстия для подачи воздуха в буровой став 9. Другие приемно-передающие устройства устанавливаются внутри каждой штанги в зависимости от их количества, которое связано с глубиной бурения.

Устройство работает при бурении однородного мягкого массива следующим образом: заслонка 9 закрыта, пневмоударник не работает, а воздух, обходя по воздушным каналам пневмоударника, идет только на продувку скважины [7].

Расчет параметров пневмоударника

При работе пневмоударника (рис. 4) воздух от компрессора подается в трубу (сопло С1) и параллельно через отверстия О1 в полость В.

Из полости В через отверстия О2 воздух подается под шарошку, парал-



Рис. 2. Положения заслонки
Fig. 2. Flap positions

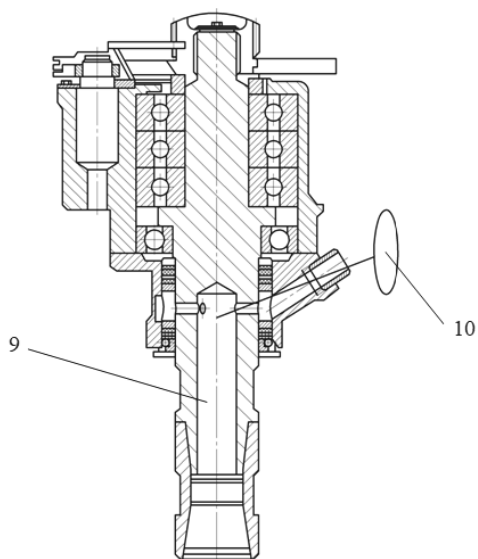


Рис. 3. Опорный узел вращателя станка
Fig. 3. Machine tool rotator support assembly

лельно он из полости В поступает на возврат ударника.

Математическая модель устройства [15–18] может быть представлена уравнениями движения пневмоударника и уравнениями энергетического баланса [11], включающими уравне-

ние энергетического баланса воздуха в камере А.

Если температуру газа в емкости А принять постоянной, то по уравнению Менделеева–Клапейрона

$$P_A W_A = m_A R \theta, \quad (1)$$

где P_A , – давление в полости А и ее объеме Мпа; m_A – масса воздуха в полости А, кг; $R\theta$ – газовая постоянная и абсолютная температура, Дж/моль*К.

После дифференцирования по времени получим:

$$W_A \frac{dP_A(t)}{dt} = R\theta_A \frac{dm_A}{dt}, \quad (2)$$

где $\frac{dm_A}{dt} = Q_m$ – суммарный расход,

$$Q_m = Q_K^{(t)} - Q_{O1}^{(t)} - Q_{C1}^{(t)}. \quad (3)$$

Расход воздуха от компрессора можно получить из его характеристики, аппроксимировав ее полиномом 2-го порядка [18–20].

$$P_A = a_1 Q_K^2(t) + a_2 Q_n(t) + a_3. \quad (4)$$

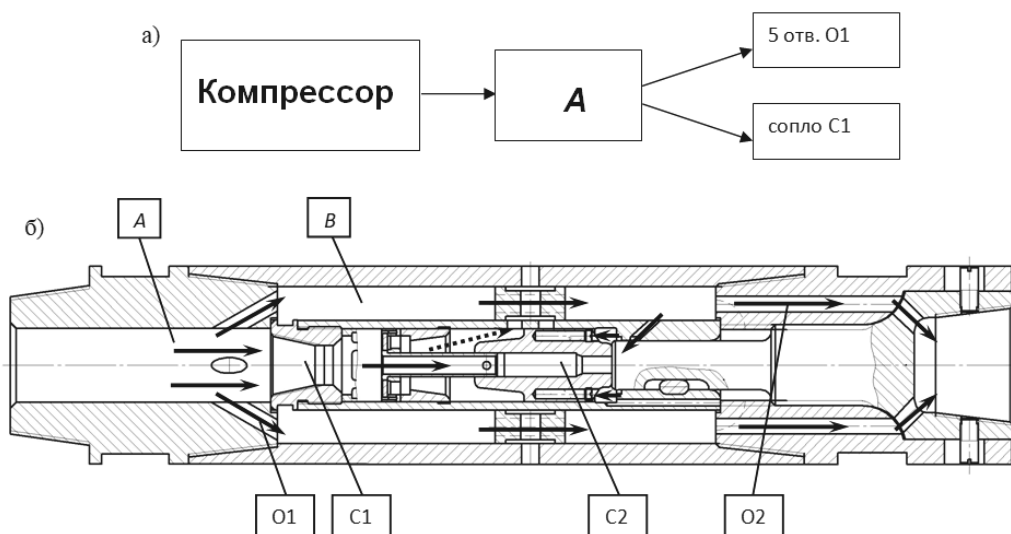


Рис. 4. Схема движения воздуха в НПУ: а – упрощенная, б – конструктивная
Fig. 4. Scheme of air movement in the DTH: a – simplified, b – constructive

$$Q_A = \frac{1}{2a_1}(-a_2 - \sqrt{4a_1P_A + a_2^2 - 4a_1a_3}). \quad (5)$$

Расход (м³/ч) уходящего из емкости воздуха:

$$Q_{OЭ} = \beta S_{O1} \rho_\beta V_O, \quad (6)$$

где β – коэффициент расхода отверстия O1; S_{O1} – площадь отверстия, м²; V_O – скорость; м/с ρ_β – плотность в камере B, кг/моль.

Уравнение для емкости (B):

$$\frac{W_B}{R\theta_B} \cdot \frac{dP_B(t)}{dt} = Q_{O1} - Q_{O2}; \quad (7)$$

$$\frac{W_B}{R\theta_{Br}} \cdot \frac{dP_B(t)}{dt} = \beta_{O1} \cdot 5 \cdot S_{O1} \cdot \frac{\rho_{ar}}{P} \cdot P_B(t) \cdot V_{O1}(t) - \beta_{O2} \cdot 5 \cdot S_{O2} \cdot \frac{\rho_{ar}}{P_m} \cdot P_m(t) \cdot V_{O2}(t); \quad (8)$$

$$V_{O2}(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} R\theta_B \left[1 - \left(\frac{P_m(t)}{P_B(t)} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, & \text{при } \frac{P_m}{P_B} > 0,527 \\ \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} R\theta_B}, & \text{при } \frac{P_m}{P_B} \leq 0,527 \end{cases} \quad (9)$$

Уравнение энергетического баланса:

$$k \cdot R \cdot \theta_D \cdot dm = k \cdot P_{C1} \cdot (t) \cdot S_n \cdot dx + S_n \cdot x \cdot dP; \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{S_n \cdot x(t)}{k \cdot R \cdot \theta_D} \cdot \frac{dP_{C1}}{dt} = Q_D(t) - \frac{S_n}{R \cdot \theta} \cdot P_{C1}(t) \frac{dx}{dt} \\ Q_D(t) = \beta_{C1} \cdot S_{C1} \cdot \frac{\rho_{ar}}{P_{ar}} \cdot P_{C1}(t) \cdot V_C(t) \end{cases} \quad (11)$$

Уравнение движения ударника:

$$m \frac{d^2x}{dt} = P_{вбл}(t) \cdot S_n - P \cdot S_1. \quad (12)$$

С использованием представленных выше выражений может быть составлена подробная методика расчета параметров воздушной системы для работы ППУ [19–23].

Исследование напряжений в шарошке

Ранее было установлено, что величина динамической силы на шарошку, в том числе учитывающая ударную нагрузку, не должна превышать 20% от осевого усилия.

Расчет выполнялся в программе Ansys Discovery R2. Моделировалась статическая осевая нагрузка на шарошку. Нагрузка прикладывалась на верхнюю грань шарошки (рис. 5).

Материал всех элементов шарошки принят условно: конструкционная сталь (Structural steel S275N). Физико-механические свойства приведены в табл. 1.

Результаты расчета нагрузок показаны на рис. 6, 7.

Максимальные напряжения в нижней цилиндрической части лапы (место контакта с корпусом шарошки) составляют 27 МПа для нагрузки 20 кН (рис. 6).

Максимальные напряжения в зоне цилиндрической части лапы составляют 245 МПа для нагрузки 300 кН (рис. 7). Максимальные напряжения

в нижней цилиндрической части лапы (место контакта с корпусом шарошки) составляет 410 МПа для нагрузки 300 кН [24]. Максимальные напряжения в зоне стыковки ниппеля и лапы составляют 109 МПа.

Результаты лабораторных исследований

Для исследования величины снижения давления за регулируемой задвижкой перед ППУ модернизирован лабораторный стенд, показанный на рис. 8, который включает в себя вентилятор, регулируемые задвижки, манометры.

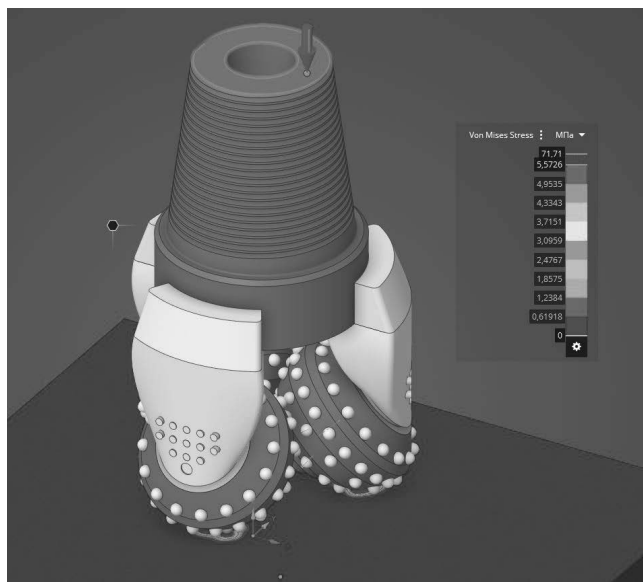


Рис. 5. Приложенная нагрузка на шарошку
Fig.5. Applied ball load

Таблица 1
Физико-механические свойства стали
Physical and mechanical properties of steel

Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга E, МПа	Коэффициент Пуассона μ	Модуль сдвига, МПа	Модуль объемного сжатия, Мпа	Предел текучести при растяжении, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа
7850	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,3046	$8,05 \cdot 10^{10}$	$1,79 \cdot 10^{11}$	237 МПа	422

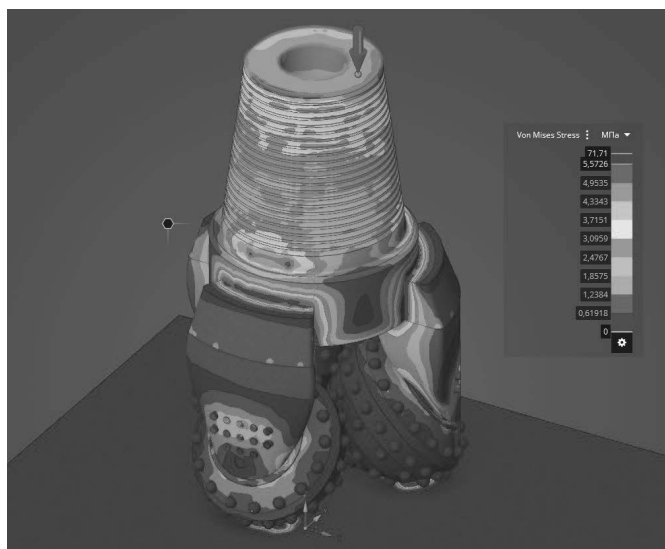


Рис. 6. Максимальные напряжения на шарошке для нагрузки $F = 20$ кН
 Fig.6. Maximum stresses on the cone for load $F = 20$ kN

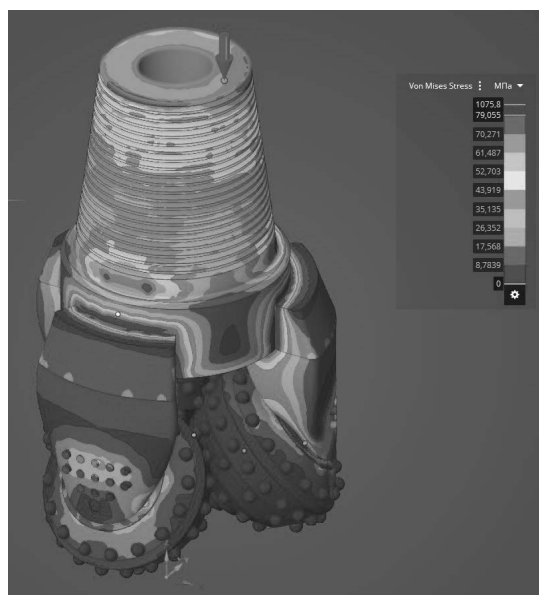


Рис. 7. Максимальные напряжения на шарошке для нагрузки $F = 300$ кН
 Fig. 7. Maximum stresses on the cone for load $F = 300$ kN

Ход эксперимента

Порядок выполнения исследований на стенде.

Заглушки устанавливаются в положение 1, соответствующее откры-

тию задвижки на 100%, производятся замеры снижения давления на задвижке номер 1 с помощью манометров 1 и 2. Далее задвижка устанавливается в положения соответственно 2, 3 и 4,

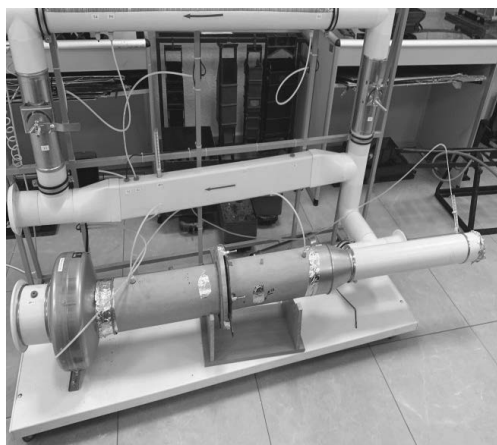


Рис. 8. Модернизированный стенд
Fig. 8. Modernized stand



Рис. 9. Дисплей вывода данных
Fig. 9. Data output displays

при которых открытия задвижек соответствовали 75%, 50% и 25%. Результаты замеров представлены в табл. 2.

1. Включается установка, устанавливается задвижка в положение, соответствующее максимальной степени открытия (**полностью открыто**).

2. Снимаются показания измерительных приборов: **dP-1, dP-2, P-1** (рис. 9) и заносятся в табл. 2;

3. Изменяется положение задвижки (шаг закрытия должен быть таким, чтобы обеспечить 20 промежуточных положений до полного закрытия).

4. Повторяются замеры и вносятся в табл. 2;

5. Рассчитывается значение средней скорости по формуле

$$v = \sqrt{2 \frac{dP - 2}{\rho}} \quad (14)$$

и вносится в табл. 2;

6. Рассчитывается коэффициент по формуле (16), причем: $\Delta p = dP1 - P1$

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho v^2}{2}; \quad (15)$$

$$\zeta = 493,62e^{-10,05n}. \quad (16)$$

Как видно из табл. 2, степень открывания задвижки, регулируемая из кабины машиниста с помощью радиосигнала, позволяет плавно снижать давление за задвижкой на величину от 5 бар до 3 бар. Это позволит в свою очередь регулировать энергию удара пневмоударника в зависимости от конкретной ситуации в забое [10, 11, 13, 15].

По данным, полученным в ходе эксперимента, можно построить зависимость вида $\zeta = f(n)$, т.е. зависимость коэффициента местного сопротивления задвижки от степени открытия задвижки (рис. 10).

Результаты и их обсуждение

При бурении вертикальных скважин массивов крепких пород сложных структур, например гранита, требуется включение пневмоударника для сохранения высокой скорости бурения. Машинист передает сигнал «Открытие» с блока управления с монитором через антенну на ретранслятор, от него на приемно-передающее устройство и далее на блок управления заслонкой, при этом срабатывает переключатель и подсоединяет аккумулятор, который через кабель включает при-

Таблица 2
Результаты замеров
Measurement results

№ п/п	Положение задвижки (степень открытия – n)	Показания манометра dP-1 (перед задвижкой), Па	Показания манометра P-1 (после задвижки), Па	Показания трубки Пито dP-2, Па	Средняя скорость потока, м/с	Коэффициент местного сопротивления задвижки,
1	0,9	150	165	102	12,9	0,058237
2	0,8	136	127	76	11,1	0,159098
3	0,7	150	115	71	10,8	0,434641
4	0,6	194	102	64	11,2	1,1874
5	0,5	189	73	52	9,3	3,243867
6	0,4	246	67	51	8,9	8,861943
7	0,3	315	5	10	6,4	24,21001
8	0,2	320	3	8	3,6	66,13949
9	0,1	324	2	6	2,1	180,687
10	0,05	330	1	1	1,3	298,6481
11	0,04	339	2	1	1,3	330,2223
12	0,03	345	2	1	1,3	365,1346
13	0,02	351	2	1	1,3	403,7379
14	0,01	361	1	1	1,3	446,4226

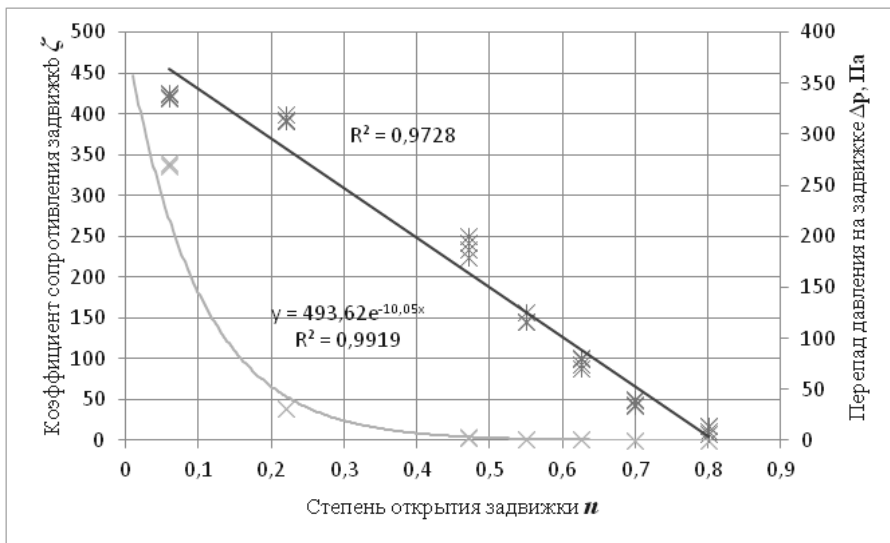


Рис. 10. Зависимость коэффициента местного сопротивления задвижки и падения давления от степени открытия задвижки

Fig. 10. Dependence of the coefficient of local resistance of the gate and the pressure drop on the degree of opening of the gate

вод червячного механизма подвижной заслонки. После включения червячного механизма приводится в движение вал привода заслонки, происходит открытие подвижной заслонки. Сжатый воздух через компрессор станка по буровому ставу поступает в пневмоударник, при этом поршень-ударник начинает наносить удары по хвостовику шарошки и процесс бурения стабилизируется: увеличивается скорость бурения, нормализуется уровень вибрации, устраняется «подклинивание» шарошки в скважине, интенсифицируется продувка скважины, устраняется «подушка» буровой мелочи на забое, происходит выравнивание поверхности забоя и т.д. Энергия удара и частота ударов пневмоударника зависит от степени открытия подвижной заслонки. Для уменьшения скорости бурения дается сигнал «Закрытие» или «Прикрытие» с блока управления с монитором через антенну на ретранслятор, а от него на приемно-передающее устройства и далее на блок управления заслонкой, при этом срабатывает переключатель и подсоединяет аккумулятор и через кабель включает привод червячного механизма подвижной заслонки. После включения червячного механизма приводится в движение вал привода заслонки, происходит частичное или полное закрытие подвижной заслонки. Струя сжатого воздуха, которая поступает через компрессор, буровой став и воздушные каналы в пневмоударник, становится меньше, или при полном перекрытии её воздух отсекается от пневмоударника.

Теоретические расчеты параметров воздушного потока в ППУ, за поршнем, особенно при его подъеме вверх, являются сложной задачей. Это связано с необходимостью расчета потерь давления на задвижке, в подводящих

к ППУ каналах при проходе через клапанное устройство. Поэтому такие расчеты дают существенную погрешность для неявно выраженных функций изменения давления во времени для разных точек по трассе движения воздуха, что требует определения давления в полостях цилиндра ППУ на моделях с используемой лабораторной установкой (см. ниже).

Как показали расчеты, для нормальной работы ППУ с М-48 необходимо изготовление дополнительных каналов в верхней и нижней муфтах для разделения воздушного потока и обеспечения устойчивого срабатывания воздушного клапана в пневмоударнике М-48. Разработана конструкция ППУ, в которой предусмотрены по 5 отверстий диаметром 18 мм в каждой из муфт.

Для подтверждения работоспособности такой конструкции необходимо изготовление опытного образца и испытание его в промышленных условиях.

Предварительные исследования показали, что превышение осевой нагрузки в 2–5 раз в результате силы удара поршнем ППУ или при воздействии на шарошку буровым ставом после «провала» его в неровностях забоя может в десятки раз увеличить напряжения в элементах шарошки, особенно в нижней цилиндрической части лапы (место контакта с корпусом шарошки). Это может опасно снизить коэффициент запаса прочности, что, в свою очередь, приведет к поломке. Однако нормирование силы удара в указанных выше интервалах позволит избежать таких поломок и повысит среднюю скорость бурения [25].

Наличие ППУ с определенной нормированной силой удара позволяет повысить скорость бурения на 20–25% от номинальной.

Степень открывания задвижки, регулируемая из кабины машиниста с помощью радиосигнала, позволяет снижать давление за задвижкой на величину от 3 до 5 бар, что позволит изменять энергию удара пневмоударника в зависимости от ситуации в забое [24].

По данным, полученным в ходе эксперимента, можно построить зависимость вида $\zeta = f(n)$, т.е. зависимость коэффициента местного сопротивления задвижки от степени открытия задвижки.

В результате аппроксимации функции $\zeta = f(n)$ была получена эмпирическая формула для определения коэффициента местного сопротивления задвижки:

$$\zeta = 493,62e^{-10,05n}. \quad (17)$$

Таким образом, полученная формула позволяет определить положение задвижки, соответствующее заданному перепаду давления с целью регулирования силы удара на исполнительном органе [19, 22, 25].

Заключение

Установление определенной величины степени открывания задвижки и, соответственно, определенной вели-

чины давления в ППУ позволяет снижать (или увеличивать) силу удара поршня ППУ по хвостовику шарошки. Ранее было установлено, что величина этой силы не должна превышать 20% от осевого усилия. Наличие ППУ с определенной силой удара позволяет повысить скорость бурения на 20–25% от номинальной. При этом включение/выключение ППУ позволяет также устранять заклинивание шарошки, способствует очищению лезвия шарошки от налипшего штыба, тем самым способствует улучшению работы СБШ в целом.

Вклад авторов

Юнгмейстер Д. А. — постановка цели и задач исследования, анализ результатов, написание текста статьи;

Гасымов Э. Э. — проведение исследовательской части работы, анализ результатов, подготовка и систематизация полученных данных, написание текста статьи;

Исаев А. И. — получение данных для анализа, помощь в проведении исследовательской части работы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Репин А. А., Смоляницкий Б. Н., Алексеев С. Е., Попелюх А. И., Тимонин В. В., Карпов В. Н. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 5. — С. 157–167.
2. Jungmeister D. A., Gasimov E. E. Drilling rig with a downhole hammer for regulating drilling speed by changing air flow // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 326, 00018. DOI:0.1051/e3sconf/202132600018.
3. Jungmeister D. A., Korolev R. I., Karlov V. A. Improvement of shock system of hydraulic drill to increase drilling intensification // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194 (3), 032006. DOI: 10.1088/1755-1315/194/3/032006.
4. Кузиев Д. А., Пятова И. Ю., Клементьева И. Н., Пихторинский Д. Алгоритм определения максимальной мощности привода подачи карьерного бурового станка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2019. — № 1. — С. 128–133. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-128-133.

5. Хруцкий А. А., Ощепков В. С. Компьютерное моделирование рабочего процесса погружного пневмоударника П-110 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 7. — С. 131–138. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-131-138.

6. Сухов Р. И., Болкисев В. С., Реготунов А. С. Выбор направлений совершенствования отечественной буровой техники для проходки взрывных скважин // Горное оборудование и электромеханика. — 2014. — № 5. — С. 46–48.

7. Ataei M., KaKaie R., Ghavidel M., Saeidi O. Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015, vol. 73, pp. 130–138. DOI:10.1016/j.ijrmmms.2014.08.006.

8. Heshamudin N. S., Katende A., Rashid H. A., Ismail I., Sagala F., Samsuri A. Experimental study of the effect of drill pipe rotation on improving well cleaning using water-based drilling mud enriched with polypropylene beads in vertical and horizontal boreholes // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019, vol. 179, pp. 1173–1185. DOI:10.1016/j.petrol.2019.04.086.

9. Guo Z., Liang Z. Analysis of the pipeline discharge load during horizontal directional drilling // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018, vol. 22, pp. 5133–5142. DOI:10.1007/s12205-018-0481-0.

10. Vardhan A., Kumar A., Dasgupta K. The influence of various parameters on the drilling performance of blast wells // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2017, vol. 65, no. 2, pp. 49–54. DOI:10.1088/1757-899X/734/1/012045.

11. Курочкин Б. М. Анализ вопроса интенсификации процесса бурения скважин долотами типа РДС через интервалы с труднобуримыми породами с использованием турбобура со струйным насосом // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2011. — № 2. — С. 6–14.

12. Sun Yu., Shi Yu., Wang K., Yao Z. Investigation of the speed characteristics of the hydraulic top drive under varying load // Journal of Petroleum Science and Technology. 2018, vol. 167, pp. 277–286. DOI:10.1016/j.petrol.2018.04.003.

13. Ветюков М. М., Юнгмейстер Д. А. Расчет продольной устойчивости вращающегося бурового става // Горные машины и автоматика. — 2004. — № 8. — С. 46–48.

14. Сабитов А. Э., Исаев А. И., Юнгмейстер Д. А., Уразбахтин Р. Ю. Обоснование компоновки и параметров перфораторов-ударников для исполнительных органов проходческих комбайнов // Горное оборудование и электромеханика. — 2016. — № 4. — С. 17–22.

15. Юнгмейстер Д. А., Игнатьев С. А., Соколова Г. В., Пивнев В. А., Непран М. Ю. Исследование конструкции устройства для бурения скважин плоского сечения в подземных выработках // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 6. — С. 42–43.

16. Жуков И. А., Смоляницкий Б. Н., Тимонин В. В. Повышение производительности погружных пневмоударников на основе оптимизации формы соударяющихся деталей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — Т. 54. — № 2. — С. 212–217.

17. Zhukov I. A., Repin A. A., Tmofeev E. G. Automated calculation and analysis of impacts generated in mining machine by anvil blocks of complex geometry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering // IOP Publishing. 2018, vol. 12071, no. 134, 012071. DOI:10.1088/1755-1315/134/1/012071.

18. Zhukov I. A., Dvornikov L. T., Nikitenko S. M. On the creation of machines for the destruction of rocks with the formation of holes of various cross-sections // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering // IOP Publishing. 2016, no. 124, 012171. DOI:10.1088/1757-899X/124/1/012171.

19. Болобов В. И., Ле Т. Б., Плащинский В. А. О распространении трещины разрушения по горной породе при ударе // Обогащение руд. — 2019. — № 6. — С. 3–8. DOI:10.17580/or.2019.06.01.

20. Bolobov V. I., Chupin S. A., Vochkov V. S., Mishin I. I. Increasing the service life of rock-crushing cutters by increasing the wear resistance of their holders by thermomechanical treatment // Mining Journal. 2019, no. 5, pp. 67–71. DOI:10.17580/gzh.2019.05.13.

21. Жуков И. А., Смоляницкий Б. Н., Тимонин В. В. Повышение эффективности забойного пневмоударника за счет оптимизации форм сталкивающихся деталей // Горный научный журнал. — 2018. — Т. 54. — № 2. — С. 212–217. DOI:10.1134/S1062739118023569.

22. Bolobov V., Chupin S., Le T. B. On the wear intensity ratio of a striker under dynamic and static conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science // IOP Publishing. 2020, vol. 459, no. 6, 062085. DOI:10.1088/1755-1315/459/6/062085.

23. Dvoynikov M., Kunshin A., Blinov P., Morozov V. Development of mathematical model for controlling drilling parameters with screw downhole motor // International Engineering Journal. 2020, vol. 33, no. 7, pp. 1423–1430. DOI:10.5829/ije.2020.33.07a.30.

24. Dvoynikov M. V., Nutskova M. V., Blinov P. A. Developments made in the field of drilling fluids by Saint Petersburg Mining University // International Engineering Journal. 2020, vol. 33, no. 4, pp. 702–711. DOI: 10.5829/ije.2020.33.04a.22.

25. Yungmeister D. A., Korolev R. I., Yacheikin A. I., Isaev A. I. Choice of materials and justification of the parameters for the over-bit hammer // Journal of Physics Conference Series. 2020, vol. 1582 (1), 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012097. **MIAB**

REFERENCES

1. Repin A. A., Smolyanitsky B. N., Alekseev S. E., Popelyukh A. I., Timonin V. V., Karpov V. N. Submerged high-pressure pneumatic hammers for open-pit mining. *Physico-technical problems of mineral development*. 2014, no. 5, pp. 157–167. [In Russ].

2. Jungmeister D. A., Gasimov E. E. Drilling rig with a downhole hammer for regulating drilling speed by changing air flow. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 326, 00018. DOI:0.1051/e3sconf/202132600018.

3. Jungmeister D. A., Korolev R. I., Karlov V. A. Improvement of shock system of hydraulic drill to increase drilling intensification. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018, vol. 194 (3), 032006. DOI: 10.1088/1755-1315/194/3/032006 .

4. Kuziev D. A., Pyatova I. Yu., Klementyeva I. N., Pichtorinsky D. Algorithm for determining the maximum power of the feed drive of a quarry drilling rig. *MIAB. Mining information and analytical bulletin*. 2019, no. 1, pp. 128–133. DOI:10.25018/0236-1493-2019-01-0-128-133. [In Russ].

5. Khrutsky A. A., Oshchepkov V. S. Computer simulation of the working process of a submerged pneumatic hammer P-110. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 7, pp. 131–138. DOI:10.25018/0236-1493-2018-7-0-131-138. [In Russ].

6. Sukhov R. I., Bolkisev V. S., Regotunov A. S. The choice of directions for improving domestic drilling equipment for drilling blast wells. *Mining equipment and electromechanics*. 2014, no. 5, pp. 46–48. [In Russ].

7. Ataei M., KaKaie R., Ghavidel M., Saeidi O. Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015, vol. 73, pp. 130–138. DOI:10.1016/j.ijrmms.2014.08.006.

8. Heshamudin N. S., Katende A., Rashid H. A., Ismail I., Sagala F., Samsuri A. Experimental study of the effect of drill pipe rotation on improving well cleaning using

water-based drilling mud enriched with polypropylene beads in vertical and horizontal boreholes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, vol. 179, pp. 1173–1185. DOI:10.1016/j.petrol.2019.04.086.

9. Guo Z., Liang, Z. Analysis of the pipeline discharge load during horizontal directional drilling. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018, vol. 22, pp. 5133–5142. DOI:10.1007/s12205-018-0481-0.

10. Vardhan A., Kumar A., Dasgupta K. The influence of various parameters on the drilling performance of blast wells. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2017, vol. 65, no. 2, pp. 49–54. DOI:10.1088/1757-899X/734/1/012045.

11. Kurochkin B. M. Analysis of the issue of intensification of the process of drilling wells with bits of the RDS type at intervals with hard-to-drill rocks using a turbobur with a jet pump. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*. 2011, no. 2, pp. 6–14. [In Russ].

12. Sun Yu., Shi Yu., Wang K., Yao Z. Investigation of the speed characteristics of the hydraulic top drive under varying load. *Journal of Petroleum Science and Technology*. 2018, vol. 167, pp. 277–286. DOI:10.1016/j.petrol.2018.04.003.

13. Vetyukov M. M., Jungmeister D. A. Calculation of the longitudinal stability of a rotating drilling rig. *Mining machines and automation*. 2004, no. 8, pp. 46–48. [In Russ].

14. Sabitov A. E., Isaev A. I., Jungmeister D. A., Urazbakhtin R. Yu. Justification of the layout and parameters of hammer drills for executive organs of tunneling combines. *Mining equipment and electromechanics*. 2016, no. 4, pp. 17–22. [In Russ].

15. Jungmeister D. A., Ignatiev S. A., Sokolova G. V., Pivnev V. A., Nepran M. Yu. Investigation of the design of a device for drilling flat-section wells in underground workings. *Mining equipment and electromechanics*. 2011, no. 6, pp. 42–43. [In Russ].

16. Zhukov I. A., Smolyanitsky B. N., Timonin V. V. Improvement of down-the-hole air hammer efficiency by optimizing shapes of colliding parts. *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 212–217. [In Russ].

17. Zhukov I. A., Repin A. A., Tmofeev E. G. Automated calculation and analysis of impacts generated in mining machine by anvil blocks of complex geometry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — IOP Publishing. 2018, vol. 12071, no. 134, 012071. DOI:10.1088/1755-1315/134/1/012071.

18. Zhukov I. A., Dvornikov L. T., Nikitenko S. M. On the creation of machines for the destruction of rocks with the formation of holes of various cross-sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — IOP Publishing. 2016, no. 124, 012171. DOI:10.1088/1757-899X/124/1/012171.

19. Bolobov V. I., Le T. B., Plaschinsky V. A. On the propagation of fracture cracks in rock upon impact. *Ore Dressing*. 2019, no. 6, pp. 3–8. DOI:10.17580/or.2019.06.01. [In Russ].

20. Bolobov V. I., Chupin S. A., Bochkov V. S., Mishin I. I. Increasing the service life of rock-crushing cutters by increasing the wear resistance of their holders by thermomechanical treatment. *Mining Journal*. 2019, no. 5, pp. 67–71. DOI:10.17580/gzh.2019.05.13.

21. Zhukov I. A., Smolyanitsky B. N., Timonin V. V. Improving the efficiency of a downhole pneumatic hammer by optimizing the shapes of colliding parts. *Mining Scientific Journal*. 2018, vol. 54, no. 2, pp. 212–217. DOI:10.1134/S1062739118023569. [In Russ].

22. Bolobov V., Chupin S., Le T. B. On the wear intensity ratio of a striker under dynamic and static conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — IOP Publishing. 2020, vol. 459, no. 6, 062085. DOI:10.1088/1755-1315/459/6/062085.

23. Dvoynikov M., Kunshin A., Blinov P., Morozov V. Development of mathematical model for controlling drilling parameters with screw downhole motor. *International Engineering Journal*. 2020, vol. 33, no. 7, pp. 1423–1430. DOI:10.5829/ije.2020.33.07a.30.

24. Dvoynikov M. V., Nutskova M. V., Blinov P. A. Developments made in the field of drilling fluids by Saint Petersburg Mining University. *International Engineering Journal*. 2020, vol. 33, no. 4, pp. 702–711. DOI: 10.5829/ije.2020.33.04a.22.

25. Yungmeister D. A., Korolev R. I., Yacheikin A. I., Isaev A. I. Choice of materials and justification of the parameters for the over-bit hammer. *Journal of Physics Conference Series*. 2020, 1582(1), 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012097.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич — докт. техн. наук, профессор кафедры машиностроения, <https://orcid.org/0000-0001-7858-8340>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: iungmeister@yandex.ru;

Гасымов Эмиль Эльчин оглы — аспирант кафедры машиностроения, <https://orcid.org/0000-0003-3361-2452>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: azayli.emil@gmail.com;

Исаев Алексей Игоревич — канд. техн. наук, доцент кафедры начертательной геометрии и графики, <https://orcid.org/0000-0003-2246-8440>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: isaev_AI@pers.spmi.ru.

Для контактов: *Гасымов Эмиль Эльчин оглы*, e-mail: azayli.emil@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Jungmeister D. A., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering, <https://orcid.org/0000-0001-7858-8340>, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, e-mail: iungmeister@yandex.ru;

Gasimov Emil Elchin ogly, Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering, <https://orcid.org/0000-0003-3361-2452>, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, e-mail: azayli.emil@gmail.com;

Isaev A. I., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Descriptive Geometry and Graphics, <https://orcid.org/0000-0003-2246-8440>, Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, e-mail: isaev_AI@pers.spmi.ru.

For contacts: *Gasimov Emil Elchin*, e-mail: azayli.emil@gmail.com.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 20.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 20.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

