

Е.А. Аверин, Ю.Н. Наумов, А.Д. Смычник, Е.А. Смычник

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФРЕЗЫ СТВОЛОПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ КРЕПКИХ ПОРОД

Аннотация. В настоящее время основным способом проходки вертикальных шахтных стволов является буровзрывной способ, в некоторых случаях дополняемый использованием облегченных механизированных агрегатов, пригодных для разрушения лишь слабых горных пород. Неспособность достаточно эффективного разрушения крепких пород препятствует повышению уровня механизации горнопроходческих работ, что обуславливает необходимость поиска технических решений, расширяющих область применения стволопроходческих комбайнов на более крепкие породы. В связи с этим возникает необходимость в изучении вариантов проектирования фрезы для обеспечения возможности разрушения крепких пород стволопроходческими комбайнами нового типа СПКВ. Обоснование конструктивных параметров проектируемой фрезы производится с применением методики расчета нагруженности трансмиссии исполнительных органов проходческих комбайнов, заложенной в отраслевой стандарт ОСТ 12.44.197-81, с учетом современных знаний, полученных в ИГД им. А.А. Скочинского и ТулГУ в 1980–2000-е годы. Расчет показал, что расширить область применения стволопроходческих комбайнов с пород крепостью до 3 единиц по шкале М.М. Протодяконова до 10 единиц можно за счет следующих конструктивных изменений фрезы: снижения числа резцов в линии резания до одного, а также уменьшению расстояния между соседними линиями резания, то есть шага резания до 18,5 мм. С учетом небольших глубин резания при разрушении крепких горных пород относительно небольшое значение шага резания должно способствовать оптимальности режима разрушения горного массива.

Ключевые слова: исполнительный орган, фреза, проверочный расчет, рекомендации по проектированию исполнительного органа, рациональная область применения.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-105-113

Введение

В настоящее время механизированный способ строительства стволов еще не получил широкого распространения, уступая буровзрывной разработке (иногда с проходкой отдельных участков ствола, сложенных из слабых пород, облегченными механизированными агрегатами), из-за высокой сложности и ограниченной области применения по прочности разрушаемых пород механизированного стволопроходческого оборудования [1]. Как следствие из вышесказанного, на данный момент отсутствует однозначное понимание о проектировании стволо-

проходческих комплексов для полностью механизированной проходки шахтных стволов. Одной из наиболее важных проблем, препятствующих широкому распространению механизированной проходки шахтных стволов, является неспособность достаточно эффективного разрушения крепких горных пород.

К числу известных на данный момент стволопроходческих комплексов для реализации механизированной проходки ствола на всю его глубину относятся отечественный комбайн ПД-2, разработанный в ЦНИИПодземмаш, семейство комплексов VSM и стволопроходческая

машина SBM от немецкой фирмы Herrenknecht AG. Следует отметить, что у каждого из перечисленных типов машин имеется собственный исполнительный орган: планетарный с парой вращающихся дисков у ПД-2, телескопическая стрела с вращающимся барабаном у VSM и ротор с осью вращения поперечной к оси выработки у SBM [1]. Это свидетельствует о том, что методы проектирования исполнительных органов стволопроходческих комплексов для механизированной проходки шахтных стволов находятся в начальной стадии развития, и устоявшихся концепций пока еще нет. Таким образом, исследование новых конструктивных решений в области проектирования и обоснования параметров исполнительных органов стволопроходческих комбайнов является целесообразным и актуальным.

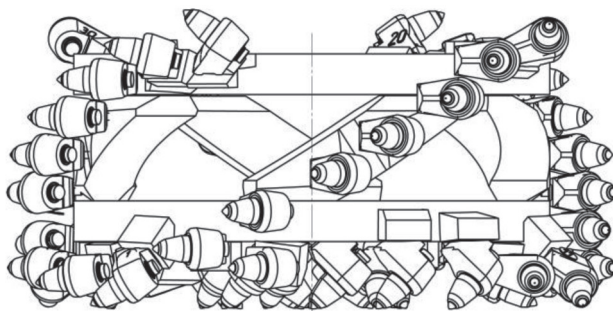
Постановка задачи

Независимо от конструкции исполнительных органов стволопроходческих комплексов, к ним предъявляются следующие требования [2]:

- обеспечение максимально-возможной производительности в данных горно-геологических и горнотехнических условиях;
- разрушение массива с минимальными удельными затратами энергии, измельчением руды и пылеобразованием;

- высокий энергетический коэффициент полезного действия;
- простота конструкции, высокая прочность, удобство в обслуживании и эксплуатации.

В качестве варианта, отвечающего предъявляемым требованиям, целесообразно предложить использование фрезерных исполнительных органов, оснащенных резцами, обеспечивающих более эффективные режимы разрушения и транспортировку отбитой горной породы в сравнении, например, с барабанными исполнительными органами [1]. Кроме того, можно выделить еще ряд их преимуществ, которые заключаются в удобстве регулирования по мощности пласта, возможности осуществления самозарубки, простоте конструкции и надежности [3]. Это было подтверждено успешной эксплуатацией стволопроходческого агрегата АСП-8,0, оснащенной аналогичной фрезой, при проходке ствола на Верхнекамском месторождении калийно-магниевого руд [4, 5]. Однако, следуя утвержденной на проекте технологии, агрегат АСП-8,0 применялся для механического разрушения только слабых пород с пределом прочности на сжатие не более 32 МПа [6], а по достижении участка, с которого начинались более крепкие породы, агрегат переуплотнялся под буровзрывную проходку [7]. В соответствии с особенностями



Исходно спроектированная фреза
Initially designed cutterhead

этой технологии был рассчитан и спроектирован исполнительный орган, а также сконструирована фреза [8, 9], изображенная на рисунке.

Опыт успешной эксплуатации агрегата АСП-8,0 обусловил интерес к дальнейшим исследованиям в области разработки средств механизации для проходки шахтных стволов. При этом основной целью является обеспечение возможности проходки ствола без использования небезопасной и непроизводительной буровзрывной технологии. Для этого с учетом опыта, полученного при проектировании и эксплуатации агрегатов типа АСП, был разработан новый тип стволопроходческих машин — комбайны семейства СПКВ (СтволоПроходческий Комбайн Вертикальный).

Основным элементом новых машин семейства СПКВ, унаследованным от агрегатов типа АСП, является исполнительный орган в виде качалки очистного комбайна К500Ю, ориентированный для работы в горизонтальной плоскости, который оснащается фрезой с резцами [8].

Относительно использования данного исполнительного органа в конструкции стволопроходческих машин для полностью механизированной проходки шахтных стволов необходимо отметить следующее. Разрушающие органы исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов, как правило, работают в горных выработках в рамках одного геологического слоя, то есть разрушают горные породы с относительно схожими физико-механическими свойствами. В то же время шахтные стволы пересекают множество геологических слоев, которые обычно сложены из горных пород с существенно различающимися физико-механическими свойствами. В соответствии с вышесказанным, цель настоящей работы заключается в том, чтобы на основе известных подходов к опреде-

лению основных параметров исполнительных органов и методов определения нагрузок на рабочем инструменте:

- определить рациональную область применения имеющейся фрезы (рисунок);
- при необходимости проанализировать возможность модификации фрезы с целью ее рационального использования в различных горно-геологических условиях;
- определить рациональную скорость подачи исполнительного органа в зависимости от горно-геологических условий;
- определить теоретическую производительность по разрушению пород с учетом установленной мощности электродвигателя.

Методика проведения исследования

Поскольку рассматриваемая фреза оснащается резцами, то при определении ее области применения стоит ограничиться областью применения тангенциальных резцов, которые используются на породах прочностью до 120–130 МПа, что соответствует 10 единицам по шкале М.М. Протодяконова.

Исходные данные для анализа фрезы в соответствии с поставленной целью представлены в табл. 1.

В основе методики проведения настоящего исследования лежит методика расчета трансмиссии исполнительных органов горных машин по ОСТ 12.44.197-81 [15], а также более современные исследования, уточняющие его положения [10].

Усилие резания P_z определяется по формуле

$$P_z = P_k \cdot [1,5 \cdot K_r \cdot K_{хп} \cdot K_{тр} \cdot K_{об} \cdot (0,25 + 0,018 \cdot t_1 \cdot h_{ij})], \quad (1)$$

где P_k — показатель контактной прочности, МПа; K_r — коэффициент, учитывающий влияние геометрии резца на усилие резания; $K_{хп}$ — коэффициент, учи-

Таблица 1

Исходные данные для расчета
Initial data for calculation

Параметры	Обозначение	Числовые значения
1. Характеристика горной породы		
Коэффициент трещиноватости горных пород	$K_{тр}$	1
Коэффициент хрупко-пластических свойств горных пород	$K_{хп}$	1,68
Диапазон изменения крепости горных пород по шкале М.М. Протодьяконова	$f_{креп}$	1–10
2. Общие технические данные агрегата		
Диаметр шнековой фрезы, м	$D_{ию}$	1,2
Высота исполнительного органа, м	$H_{ию}$	0,5
Частота вращения исполнительного органа, об/мин	$n_{ию}$	39,13
Мощность электродвигателя привода вращения, кВт	N	250
3. Параметры породоразрушающего инструмента		
Резцы		ТПЗ8
Диаметр керна резца, мм	d_k	22
Коэффициент геометрии резца	K_r	1,75
Шаг резания, мм	t	37
Число резцов в линии резания	$m_{рез}$	2

тывающий влияние хрупко-пластических свойств породы; $K_{тр}$ — коэффициент, учитывающий влияние трещиноватости пород; $K_{об}$ — коэффициент, учитывающий влияние степени обнажения забоя; t_i — шаг резания на i -м резце, мм; h_{ij} — глубина резания на i -м резце в j -м положении, мм.

Значение усилия резания по формуле (1) вычисляется в Ньютонах.

Показатель контактной прочности горных пород P_k определяется по формуле

$$P_k = 44 f_{креп}^{1.5} \quad (2)$$

где $f_{креп}$ — коэффициент крепости горных пород по шкале проф. М.М. Протодьяконова.

Величина коэффициента $K_{об}$ определяется по одной из формул:

- при $t/t_{опт} < 1$

$$K_{об} = 1,19 - 0,19(t/t_{опт}); \quad (3)$$

- при $t/t_{опт} > 1$

$$K_{об} = 1,62 - 1,35(t/t_{опт}) + 0,73(t/t_{опт})^2. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) $t_{опт}$ — оптимальный шаг резания, мм. Его значение определяется из выражения

$$t_{опт} = 7,3 \cdot K_b \cdot K_{хп} \cdot h^{0,5}, \quad (5)$$

где K_b — коэффициент, учитывающий влияние диаметра твердосплавной вставки (керна), который определяется по формуле

$$K_b = 1 + \frac{d_k - 9}{42}. \quad (6)$$

Показатель, учитывающий хрупко-пластические свойства породы $tg\varphi$, определяется, исходя из величины полуугла развала борозды резания φ по формуле

$$K_{хп} = 2/tg\varphi. \quad (7)$$

При этом значение полуугла развала в настоящем расчете составляет 50° , что соответствует не очень хрупким породам.

Мгновенное значение глубины резания h_{ij} определяется по выражению

$$h_{ij} = h_{max} \cdot \sin\varphi_{ij}, \quad (8)$$

где φ_{ij} — текущее значение угла положения резца, °; h_{\max} — максимальное значение глубины резания, мм.

Величина h_{\max} в рамках настоящего исследования является итерационно задаваемой переменной.

Мощность, затрачиваемая на резание, определяется из выражения

$$P = \sum_{i=1}^{n_{\text{рез}}} P_{zi} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{ио}} \cdot n_{\text{ио}}}{60}, \quad (9)$$

$n_{\text{рез}}$ — число резцов, одновременно, находящихся в контакте с забоем.

Число резцов в контакте с забоем определяется из выражения

$$n_{\text{рез}} = \left[\frac{500 \cdot H_{\text{ио}} \cdot m_{\text{рез}} \cdot \xi}{t} \right], \quad (10)$$

где m — число резцов в линии резания; ξ — часть захвата фрезы, находящаяся в контакте с забоем.

От значения, полученного по формуле (9), берется только целая часть.

Условием работоспособности комбайна является возможность реализации мощности, требуемой для резания горных пород из расчета по формуле (8), установленным на комбайне двигателем, что выражается следующим неравенством:

$$P \leq N. \quad (11)$$

Теоретическая производительность по разрушению

$$Q_p = D_{\text{ио}} \cdot H_{\text{ио}} \cdot V_n, \quad (12)$$

Таблица 2

Определение рациональной области применения исходной фрезы
Rational field of application for the initial cutterhead

Параметр	Значения			
	1	2	3	4–10
$f_{\text{креп}}$	1	2	3	4–10
P_k , МПа	44	124,5	228,6	352–1391,4
h_{\max} , мм	18	18	18	—
$P_{z \max}$, кН	1,59	4,49	8,25	—
P , кВт	44,1	124,6	229	—
V_n , м/мин	1,41	1,41	1,41	—
$Q_{\text{рез}}$, м ³ /мин	0,85	0,85	0,85	—

где V_n — скорость подачи исполнительного органа, м/мин.

Скорость подачи исполнительного органа вычисляется, исходя из требуемой величины заглубления h_{\max} за один оборот фрезы

$$V_n = \frac{h_{\max} \cdot n_{\text{ио}} \cdot m_{\text{рез}}}{1000}. \quad (13)$$

Расчет по описанной методике, выраженной зависимостями (1)–(13), производится только для торцевой, то есть режущей или рабочей, части фрезы.

Результаты и их обсуждение

Для начала определим параметры фрезы, которые в рамках настоящего исследования можно принять константами. К их числу относятся, например, часть захвата фрезы в контакте с забоем ξ , значение которой примем равной единице. А также число резцов в контакте с забоем, которое согласно формуле (10) равно 13. Тогда условно можно принять угловой шаг между резцами в соседних линиях резания $\Delta\varphi$ ($\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i-1}$) равным $\sim 14^\circ$.

В табл. 2 приводятся результаты расчетов для нее при различных значениях крепости горных пород.

Как видно из табл. 2, рассматриваемая фреза при заданной установленной мощности 250 кВт и полном захвате способна разрушать горные породы

крепостью всего лишь до 3 единиц по шкале М.М. Протодяконова. При этом величина заглубления ограничивается лишь вылетом резцов либо производительностью вспомогательных технологических операций. Загрузка двигателя варьируется от 18 до 92%, то есть до почти полной загрузки. Следует отметить, что разрушение горных пород крепостью 4 и 5 единиц возможно, но, согласно расчетам, установленный двигатель при этом будет испытывать постоянные перегрузки. На более крепких породах рассматриваемая фреза не применима. Это объясняется следующими причинами [11–14]:

- большое число инструментов, находящихся одновременно в контакте с забоем вследствие наличия двух резцов в каждой линии резания;

- большой шаг резания (расстояние между соседними линиями резания), что в совокупности с маленькой глубиной резания для каждого резца из-за двух резцов в каждой линии резания, приводит к неоптимальности режима разрушения, и следовательно слишком большой энергоемкости.

Таким образом, исходная фреза, несмотря на высокую эффективность разрушения слабых пород, оказывается неспособной резать породы средней крепости и крепкие породы. С учетом вышесказанного целесообразно рассмотреть возможность проектирования новой фрезы

с областью применения, распространяющейся на более крепкие породы. Это возможно осуществить путем снижения числа резцов в линии резания до одного, а также уменьшению расстояния между соседними линиями резания, то есть шага резания. С учетом небольших глубин резания при разрушении крепких горных пород относительно небольшое значение шага резания должно способствовать оптимальности режима разрушения горного массива [11, 12].

В табл. 3 приводятся результаты расчетов для вновь спроектированной фрезы при различных значениях крепости горных пород.

Как видно из табл. 3, вновь спроектированная фреза при заданной установленной мощности 250 кВт и полном захвате способна разрушать горные породы крепостью до 10 единиц по шкале М.М. Протодяконова. При этом величина заглубления на породах крепостью до 2 единиц ограничивается лишь вылетом резцов либо производительностью вспомогательных технологических операций. Загрузка двигателя на слабых породах достигает весьма существенных значений (около 90%), что свидетельствует о более высокой энергоемкости процесса разрушения в сравнении с исходной фрезой.

Рациональная область применения рассматриваемой фрезы — породы крепостью 7–8 единиц. В случае необходи-

Таблица 3

Определение рациональной области применения модифицированной фрезы
Rational field of application for the modified cutterhead

Параметр	Значения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{\text{креп}}$										
$P_{\text{к}}$, МПа	44	124,5	228,6	352	491,9	646,7	814,9	995,6	1188	1391,4
h_{max} , мм	36	36	25	18	15	12	10	8	6	4
P , кВт	75,8	214,4	227,8	217,7	236,5	233,7	240,7	240,7	239,4	250
$V_{\text{п}}$, м/мин	1,41	1,41	0,98	0,7	0,59	0,47	0,39	0,31	0,23	0,16
$Q_{\text{рез}}$, м ³ /мин	0,85	0,85	0,60	0,42	0,35	0,28	0,23	0,19	0,14	0,10

мости она также может быть умеренно эффективной на породах крепостью 9 единиц. Максимальный предел ее применимости составляет 10 единиц, но резание по породам такой крепости будет происходить в неэффективном режиме, с недостаточной производительностью и довольно большой вероятностью частого выхода резцов из строя в результате поломок.

В связи со способностью вновь спроектированной фрезы, как и исходной, разрушать слабые горные породы возникает вопрос о целесообразности использования исходной фрезы в принципе. Сравнение результатов, представленных в табл. 2 и 3, позволяет отметить, что при разрушении пород крепостью не более 2 единиц вновь разработанной фрезе необходима мощность в 1,72 раза больше, чем исходной фрезе. Это означает более высокую энергоемкость разрушения. На породах крепостью 3 единицы теоретическая производительность исходной фрезы в 1,4 раза выше, чем у вновь спроектированной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фомичев А. Д.* Технологии механизированного строительства главных вертикальных стволов на примере современных стволопроходческих агрегатов // *Известия ТулГУ. Технические науки.* — 2014. — № 1. — С. 172–179.
2. *Сафохин М. С.* Горные машины и оборудование: учебник для вузов. — М.: Недра, 1995. — 463 с.
3. *Солод В. И., Гетопанов В. Н., Рачек В. М.* Проектирование и конструирование горных машин и комплексов: учебник для вузов. — М.: Недра, 1982. — 350 с.
4. *Zhabin A. B., Fomichev A. D., Naumov J. N., Solovyh D. J.* Results of studies of shaft boring machine operation in vertical shaft construction at Upper Kama potash deposit // *Eurasian Mining.* 2016. No 1. Pp. 29–32. DOI:10.17580/em.2016.01.04.
5. *Жабин А. Б., Фомичев А. Д.* Некоторые результаты исследований при эксплуатации стволопроходческого агрегата АСП-8,0 // *Горное оборудование и электромеханика.* — 2014. — № 7. — С. 8–11.
6. *Фомичев А. Д.* Разработка и обзор стволопроходческого агрегата АСП-8,0 // *Известия ТулГУ. Технические науки.* — 2014. — № 6. — С. 211–218.
7. *Жабин А. Б., Фомичев А. Д.* Стволопроходческий агрегат АСП-8,0 // *Горное оборудование и электромеханика.* — 2014. — № 1. — С. 3–5.
8. *Жабин А. Б., Поляков А. В., Фомичев А. Д.* Расчет шнеко-фрезерного исполнительного органа стволопроходческого агрегата АСП-8,0 // *Горное оборудование и электромеханика.* — 2014. — № 3. — С. 3–8.
9. *Жабин А. Б., Фомичев А. Д.* Определение показателей работы шнеково-фрезерного исполнительного органа стволопроходческого агрегата АСП-8,0 при погружном режиме работы // *Горное оборудование и электромеханика.* — 2014. — № 8. — С. 7–12.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы и дать следующие рекомендации:

- областью применения исходной фрезы являются породы крепостью от 1 до 3 по шкале М.М. Протодряконова;
- областью применения вновь спроектированной фрезы, у которой в сравнении с исходной фрезой уменьшен шаг резания и минимизировано число резцов в линии резания, являются породы крепостью до 10 единиц по шкале М.М. Протодряконова.

Следует отметить, что при разрушении слабых горных пород вновь спроектированной фрезой с расширенной областью применения в сравнении с исходной фрезой, пригодной для разрушения только слабых пород, либо энергоемкость разрушения выше, либо меньше производительность по слабым породам. Таким образом, при проходке шахтных стволов необходима поставка нескольких, как минимум двух, режущих органов для различных горно-геологических условий.

10. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Сарычев В. И. Состояние научных исследований в области разрушения горных пород резцовым инструментом на рубеже веков // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2018. — № 1. — С. 230–247.

11. Wang S., Li X., Du K., Wang S. Experimental investigation of hard rock fragmentation using a conical pick on true triaxial test apparatus // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 79. Pp. 210–223. DOI: 10.1016/j.tust.2018.05.006.

12. Wang X., Su O., Wang Q.-F., Liang Y.-P. Effect of cutting depth and line spacing on the cuttability behavior of sandstones by conical picks // Arabian Journal of Geosciences. 2017. Vol. 10. No 23. Pp. 510–525. DOI:10.1007/s12517-017-3307-3.

13. Dursun A., Gokay M. K. Cuttability Assessment of Selected Rocks Through Different Brittleness Values // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. No 4. Pp. 1173–1190. DOI: 10.1007/s00603-015-0810-2.

14. Jang J. S., Yoo W. S., Kang H. Cutting head attachment design for improving the performance by using multibody dynamic analysis // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2016. Vol. 17. No 3. Pp. 371–377. DOI: 10.1007/s12541-016-0046-4.

15. ОСТ 12.44.197-81 Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Расчет эксплуатационной нагруженности трансмиссии исполнительного органа. — М.: Минуглепром СССР, 1981. — 48 с. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Аверин Евгений Анатольевич¹ — кандидат технических наук, инженер-конструктор, e-mail: evgeniy.averin.90@mail.ru,

Наумов Юрий Николаевич¹ — кандидат технических наук, главный конструктор,

Смычник Анатолий Данилович — доктор технических наук, профессор, технический директор, ООО «Стриктум»,

Смычник Евгений Анатольевич — аспирант, Санкт-Петербургский горный университет,

¹ ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2019. No. 2, pp. 105–113.

Cutterhead of shaft boring machine for hard rock destruction

Averin E.A.¹, Candidate of Technical Sciences,

Engineer-Designer, e-mail: evgeniy.averin.90@mail.ru,

Naumov Yu.N.¹, Candidate of Technical Sciences, Chief Designer,

Smychnik A.D., Doctor of Technical Sciences, Professor,

Technical Director, «Strictum» LLC, Russia,

Smychnik E.A., Graduate Student,

Saint Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia,

¹ «Skuratovsky skilled and experimental plant» LLC,

300911, Tula, Russia.

Abstract. Currently, the main method for excavating of vertical shafts is drilling and blasting method, which in some cases supplemented by the use of lightweight mechanized units suitable for the destruction of only weak rocks. The inability of sufficiently effective destruction of hard rocks prevents the increase in the level of mechanization of mining operations. This demands the search for technical solutions that expand the scope of the shaft boring machines to stronger rocks. In this regard, there is a need to study the options of changes in design of the cutterhead to ensure the possibility of destruction of hard rocks by shaft boring machines of a new type of SPKV. This study uses the method of calculating for the load capacity of radheader's transmission from the industry standard OST 12.44.197-81 for the justification of the design parameters of shaft boring machine's cutterhead. It also takes into account novel knowledge gained by research studies of Mining Institute named after A.A. Skochinsky and Tula State University. The

study has shown that reducing of picks in the cutting line down to one along with shortening of the cutter spacing down to 18.5 mm expands the field of application of the shaft boring machine. Namely, the newly designed cutterhead allows destruction of rocks with the strength up to 10 units on the scale of M.M. Protdiakonov instead of conventional 3 units. This is due to the fact that a relatively small value of the cutter spacing should contribute to the optimal mode of destruction of the rocks.

Key words: cutterhead, verification calculation, layout pattern, rational application.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-105-113

REFERENCES

1. Fomichev A. D. Tekhnologii mekhanizirovannogo stroitel'stva glavnykh vertikal'nykh stvolov na primere sovremennykh stvoloprokhodcheskikh agregatov [Mechanical technology construction of the main vertical shaft of the example of contemporary shaft sinking machine], *Izvestiya Tul GU. Tekhnicheskie nauki*. 2014, no 1, pp. 172–179. [In Russ].
2. Safokhin M. S. *Gornye mashiny i oborudovanie: uchebnik dlya vuzov* [Mining machines and equipment: Textbook for high schools], Moscow, Nedra, 1995, 463 p.
3. Solod V. I., Getopanov V. N., Rachek V. M. *Proektirovanie i konstruirovaniye gornyykh mashin i kompleksov: uchebnik dlya vuzov* [Designing of mining machines: Textbook for high schools], Moscow, Nedra, 1982, 350 p.
4. Zhabin A. B., Fomichev A. D., Naumov J. N., Solovyh D. J. Results of studies of shaft boring machine operation in vertical shaft construction at Upper Kama potash deposit, *Eurasian Mining*. 2016. No 1. Pp. 29–32. DOI:10.17580/em.2016.01.04.
5. Zhabin A. B., Fomichev A. D. Nekotorye rezul'taty issledovaniy pri ekspluatatsii stvoloprokhodcheskogo agregata ASP-8,0 [Некоторые результаты исследований при эксплуатации стволопроходческого агрегата АСП-8,0], *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2014, no 7, pp. 8–11. [In Russ].
6. Fomichev A. D. Razrabotka i obzor stvoloprokhodcheskogo agregata ASP-8,0 [Some Research Results in the Operation Barrel Deepening ASP-8,0], *Izvestiya Tul GU. Tekhnicheskie nauki*. 2014, no 6, pp. 211–218. [In Russ].
7. Zhabin A. B., Fomichev A. D. Stvoloprokhodcheskiy agregat ASP-8,0 [Barrel Deepening ASP-8,0], *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2014, no 1, pp. 3–5. [In Russ].
8. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Fomichev A. D. Raschet shneko-frezernogo ispolnitel'nogo organa stvoloprokhodcheskogo agregata ASP-8,0 [Auger-Milling Actuator of Barrel Deepening ASP-8,0 Computing], *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2014, no 3, pp. 3–8. [In Russ].
9. Zhabin A. B., Fomichev A. D. Opredelenie pokazateley raboty shnekovo-frezernogo ispolnitel'nogo organa stvoloprokhodcheskogo agregata ASP-8,0 pri pogruzhnom rezhime raboty [Defining Performance of Auger-Milling Executive Shaft Sinking Assembly ASP-8,0 for Immersion Work Mode], *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2014, no 8, pp. 7–12. [In Russ].
10. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Sarychev V. I. Sostoyanie nauchnykh issledovaniy v oblasti razrusheniya gornyykh porod reztsovym instrumentom na rubezhe vekov [State of scientific researches in the field of rock destruction by picks at the turn of the century], *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*. 2018, no 1, pp. 230–247. [In Russ].
11. Wang S., Li X., Du K., Wang S. Experimental investigation of hard rock fragmentation using a conical pick on true triaxial test apparatus, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 79. Pp. 210–223. DOI: 10.1016/j.tust.2018.05.006.
12. Wang X., Su O., Wang Q.-F., Liang Y.-P. Effect of cutting depth and line spacing on the cuttability behavior of sandstones by conical picks, *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 10. No 23. Pp. 510–525. DOI: 10.1007/s12517-017-3307-3.
13. Dursun A., Gokay M. K. Cuttability Assessment of Selected Rocks Through Different Brittleness Values, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49. No 4. Pp. 1173–1190. DOI: 10.1007/s00603-015-0810-2.
14. Jang J. S., Yoo W. S., Kang H. Cutting head attachment design for improving the performance by using multibody dynamic analysis, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2016. Vol. 17. No 3. Pp. 371–377. DOI: 10.1007/s12541-016-0046-4.
15. *Kombayny prokhodcheskie so strelovidnym ispolnitel'nym organom. Raschet ekspluatatsionnoy nagruzhennosti transmissii ispolnitel'nogo organa OST 12.44.197-81* [Heading machines swept the executive body. Calculation of the operational load of the transmission of the executive body Industry standards 12.44.197-81], Moscow, Minugleprom SSSR, 1981, 48 p.