DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621

УДК 622.(23.02:02):622.232

Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин

А.Б.ЖАБИН[1], А.В.ПОЛЯКОВ[1]✉, Е.А.АВЕРИН[2], Ю.Н.ЛИННИК[3], В.Ю.ЛИННИК[3]
[1] *Тульский государственный университет, Тула, Россия*
[2] *ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод», Тула, Россия*
[3] *Государственный университет управления, Москва, Россия*

Развитие технических средств, обеспечивающих доступ к подземным месторождениям полезных ископаемых и их извлечение, требует использования всего накопленного опыта и передовых научных разработок в области механического разрушения горных пород. Важнейшими вопросами применения механических породоразрушающих инструментов являются их изнашиваемость и расход, оказывающие влияние на технико-экономические показатели эффективности всего проекта. Приведены отечественные и зарубежные методы определения износостойкости инструментов, выражения для определения критических скоростей резания, методы определения расхода инструмента. Показано, что изнашиваемость механических инструментов и связанные с этим эффекты в значительной мере определяются абразивностью горных пород. Отмечается, что в отечественной практике этот показатель определяется по методу Барона – Кузнецова и приводится краткое описание этого метода. Во многих странах с развитой горной промышленностью абразивность горных пород оценивается индексом абразивности *CAI*, который рекомендуется Международным бюро механики горных пород. Приведено его описание.

***Ключевые слова*:** резец; износ; абразивность; метод расчета; метод проведения испытаний

Благодарность. Результаты исследования опубликованы при финансовой поддержке ТулГУ в рамках научного проекта № 2018-18.

***Как цитировать эту статью*:** Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин / А.Б.Жабин, А.В.Поляков, Е.А.Аверин, Ю.Н.Линник, В.Ю.Линник // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 621-627. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621

Введение. Угольная индустрия является одной из наиболее механизированных из всех отраслей горного дела России, однако для наращивания объема добычи угля и снижения его себестоимости необходимо техническое и технологическое перевооружение угольных шахт [2]. Для его успешной реализации важно рациональное использование технических средств. При этом эффективность применения проходческих комбайнов в значительной степени зависит от учета износа и определения расхода рабочего инструмента. Эти процессы как прямо (через стоимость инструмента), так и опосредованно (через затраты времени на их замену, снижение ресурсов исполнительного органа, элементов трансмиссии, приводов и других узлов комбайна) влияют на стоимость горного проекта.

В настоящее время в качестве рабочего инструмента проходческие комбайны оснащаются тангенциальными (поворотными, коническими, круглыми) резцами [7]. В процессе эксплуатации поворотные резцы выходят из строя из-за поломок твердосплавных вставок, поломок и деформации державок, нередки случаи и потери резцов (рис.1). Такие виды выхода инструмента из строя обусловлены несовершенством конструкции, технологии изготовления и средств крепления, а также в значительной степени нарушением правил и условий эксплуатации. Примерами последних являются: применение резцов в условиях, не предусмотренных их технической характеристикой по прочности пород, повышенные нагрузки на резцы, обусловленные выходом из строя соседних резцов и своевременно не обнаруженные обслуживающим персоналом. Но в подавляющем большинстве случаев при нормальных условиях эксплуатации резцы выходят из строя в результате износа. Это единственная неизбежная естественная причина отработки ресурса инструмента.

Отечественные исследования в области определения изнашиваемости тангенциальных резцов. Изнашивание тангенциальных резцов представляет собой сложный процесс, характер протекания и интенсивность которого зависят от многих факторов. Объяснение механизма из-

DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621



Рис.1. Некоторые виды выхода тангенциальных резцов из строя: *а* – поломка твердосплавной вставки; *б* – потеря резца; *в* – износ головки державки

нашивания только каким-либо одним фактором неправомерно, он может быть основным, определяющим, но ему обязательно будут сопутствовать и другие.

Все факторы, влияющие на интенсивность изнашивания резцов, можно разделить на три группы:

• характеристики материала, т.е. показатели физико-технических свойств горных пород, обусловливающие изнашивающую способность;

• параметры режима разрушения и условия внешней среды, в которой протекает рассматриваемый процесс;

• характеристики физико-технических свойств твердосплавной вставки, головки державки и их параметры.

Исходной зависимостью для расчета удельного расхода резцов Z является выражение [5]

$$Z = \frac{1000}{Lth}, \qquad (1)$$

где L – длина пути резания до выхода резца из строя, км; t – шаг резания в соответствии с размещением резцов на исполнительном органе, мм; h – толщина стружки, мм.

Выход резцов из строя возможен при износе головки державки или твердосплавной вставки.

Длина пути резания до выхода резца из строя по фактору износа головки державки определяется по формуле [5]

$$L_{\text{пд}} = \frac{11{,}37\Delta_{\text{пд}}}{K_v K_0 K_{t/h} K_{\text{т}} K_{\text{д}} a^{0{,}69} \sigma_{\text{сж}}^{0{,}12}}, \qquad (2)$$

где $\Delta_{\text{пд}}$ – предельно допустимая величина оголения твердосплавной вставки, мм; K_v, K_0, $K_{t/h}$, $K_{\text{т}}$ и $K_{\text{д}}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно влияние скорости резания, подачи воды или водных растворов в зону взаимодействия резца с породой, соотношения шага резания t и толщины стружки h, твердости головки державки и диаметра твердосплавной вставки на интенсивность изнашивания резцов; a – показатель абразивности по Барону – Кузнецову, мг; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на одноосное сжатие, МПа.

Длина пути резания до выхода резца из строя по фактору износа твердосплавной вставки может быть определена по уравнению

$$L_{\text{пв}} = L_{\text{пд}} \frac{\psi_{\Delta\text{в}}}{\psi_{\Delta\text{д}}}, \qquad (3)$$

где $\psi_{\Delta\text{в}}$ – интенсивность изнашивания твердосплавной вставки, мм/км; $\psi_{\Delta\text{д}}$ – интенсивность изнашивания головки державки, мм/км;

Меньшее из двух значений $L_{\text{пд}}$ и $L_{\text{пв}}$ используется в качестве величины L для определения удельного расхода резцов Z [см. формулу (1)].

Соотношение $\psi_{\Delta\text{в}}/\psi_{\Delta\text{д}}$ определяется по формуле

$$\frac{\psi_{\Delta\text{в}}}{\psi_{\Delta\text{д}}} = \frac{1}{0{,}346\text{arctg}\left(0{,}32a - 6{,}176\right) + 0{,}488}. \qquad (4)$$

Предельно допустимая величина оголения твердосплавной вставки может быть определена по зависимости

DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621

$$\Delta_{\text{пд}} = \frac{(1{,}58d + 14{,}5)}{\sigma_{\text{сж}}^{0{,}346}}, \quad (5)$$

где d – диаметр твердосплавной вставки, мм.

Коэффициент K_v определяется по формуле:

• для продольно-осевых режущих коронок

$$K_v = 0{,}24V + 0{,}754, \quad (6)$$

• для поперечно-осевых коронок

$$K_v = (0{,}24V + 0{,}754)\frac{t_p}{t_0}, \quad (7)$$

где V – скорость резания, м/с; t_p/t_0 – соотношение времени, когда резец находится в контакте с породой и вне контакта за один оборот коронки.

Выражения (6) и (7) действуют в диапазоне значений скорости резания от нуля до критической величины этого параметра, определяемой как меньшее из значений, полученных по одной из приведенных ниже зависимостей, являющихся обобщением исследований [1]:

• по фактору износа головки державки

$$V_{\text{кр.д}} = \frac{38{,}3\sigma_{\text{сж}}^{-0{,}3}a^{-0{,}73}}{2{,}46\frac{t_p}{t_0} + 0{,}4}, \quad (8)$$

• по фактору износа твердосплавной вставки

$$V_{\text{кр.к}} = \frac{59{,}2\sigma_{\text{сж}}^{-0{,}26}a^{-0{,}92}}{2{,}46\frac{t_p}{t_0} + 0{,}4}. \quad (9)$$

Величину коэффициента K_0, учитывающего влияние подачи воды в зону резания на интенсивность изнашивания резцов, рекомендуется принимать в зависимости от давления воды. При давлении 3,5-4,0 МПа, характерном для отечественных комбайнов, K_0 = 0,75-0,85, а при давлении 4,0-20 МПа – K_0 = 0,55-0,65.

Коэффициент $K_{t/h}$ можно рассчитать по следующей зависимости:

$$K_{t/h} = \frac{0{,}27t}{K_{\text{в}}\text{tg}\varphi h^{0{,}5}}, \quad (10)$$

где t – шаг резания, мм; $K_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий влияние геометрии резца; $\text{tg}\varphi$ – показатель хрупкопластических свойств; h – толщина стружки, мм.

Для характерных горно-геологических условий применения проходческих комбайнов в угольной промышленности РФ в первом приближении $K_{t/h}$ = 1.

Коэффициент $K_{\text{т}}$ определяется по формуле

$$K_{\text{т}} = 0{,}55 - 0{,}0012T^2 + 0{,}066T, \quad (11)$$

где t – твердость головки державки по Роквеллу (HRC).

Значения $K_{\text{д}}$ определяются по зависимости

$$K_{\text{д}} = 9/d. \quad (12)$$

Зарубежные исследования в области определения изнашиваемости тангенциальных резцов. Изучению различных аспектов износа тангенциальных поворотных резцов посвящено множество зарубежных исследований. Однако большая часть из них направлена на установление физической картины и механизма износа поворотных резцов. Среди количественных моделей

DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621

расчета износа инструмента достаточно известна классическая формула Арчарда [8], согласно которой скорость износа $\dot{w}$ пропорциональна величине контактного давления p_n и скорости относительного перемещения (скорости скольжения) v_t:

$$\dot{w} = k\frac{p_n v_t}{H}, \tag{13}$$

где k – безразмерный параметр износа; H – твердость инструмента.

Модель Арчарда первоначально опиралась на адгезионный износ инструмента. Однако та же форма уравнения получена и для абразивного изнашивания [13].

Уравнение (13) реализуется в различных численных алгоритмах с построением двух- и трехмерных моделей с целью установления характера распределения износа на поверхности инструмента. Износ – относительно медленный процесс, и его можно наблюдать только после многих циклов работы. В численных алгоритмах процесс износа ускоряется с помощью масштабных констант.

Модель Арчарда служит для определения количественных и качественных показателей износа резца и ее с известной степенью точности нельзя использовать для расчета нагруженности инструмента.

Широко применяется и другая модель износа [14]. Она основывается на предположении о положительной корреляции изнашиваемости инструмента с содержанием кварца в породе и усредненным размером его зерен, а также с пределом прочности породы на растяжение. Авторами был предложен коэффициент изнашиваемости F (килограмм на сантиметр), который можно определить по формуле

$$F = Qd_q\sigma_{\text{р}}, \tag{14}$$

где Q – эквивалентное содержание кварца по объему, %/100; d_q – усредненный размер зерен кварца, см; $\sigma_{\text{р}}$ – предел прочности на растяжение, кг/см^2.

Эквивалентное содержание кварца в горной породе Q может быть принятым согласно следующим рекомендациям [14]: 1 – для зерен кварца; 0,35 – для полевого шпата; 0,03 – для кальцита и 0,04 – для глинистых минералов. При этом утверждается, что при $F < 1$ разрушение горных пород должно быть достаточно эффективным. Приблизительно оценить расход инструмента с применением рассматриваемого коэффициента можно по данным таблицы.

Определение расхода резцов с использованием коэффициента изнашиваемости

Коэффициент F	Классификация по абразивности	Расход резцов, м^3/шт.
< 0,05	Неабразивная порода	90-110
0,05-0,07	Малоабразивная порода	50-90
0,07-1,0	Абразивная порода	30-50
1,0-1,05	Очень абразивная порода	10-30
> 1,05	Весьма абразивная порода	1-10

Данный коэффициент изнашиваемости инструмента может использоваться для определения критической скорости резания (метр в секунду) по критерию нагревания инструмента:

$$V_{\text{крит}} = \frac{k}{\exp(F)}, \tag{15}$$

где k – константа, зависящая от геометрии резца и критической температуры нагревания твердого сплава, из которого он выполнен, обычно $k = 8{,}4$ [14].

Наиболее распространенным способом определения расхода тангенциальных резцов является метод, основанный на использовании графиков, построенных по эмпирическим данным и связывающих расход инструмента с индексом абразивности горных пород *CAI* и пределом их прочности на сжатие [11]. Примеры таких графиков, разработанных компанией «Sandvik», приводятся в работах [12] и представлены на рис.2.

DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621

Обсуждение результатов проведенного анализа отечественных и зарубежных исследований. Как известно, наиболее существенную роль в изнашивании рабочих инструментов в процессе разрушения горных пород играет абразивность.

В угольной промышленности РФ для определения характеристики абразивных свойств горных пород наибольшее распространение получил метод Барона – Кузнецова [6]. Напомним, что сущность этого метода заключается в истирании цилиндрического стержня из стали-серебрянки об испытуемую горную породу при вращении с частотой 400 об/мин при осевой нагрузке 150 Н в течение 10 мин. Показатель абразивности определяется по потере веса стержня за время испытаний в миллиграммах. Привлекательность этого метода заключается, прежде всего, в том, что он прост, достаточно чувствителен к изменению абразивных свойств пород и диапазон получаемых показателей на разных породах очень широк (практически два порядка).

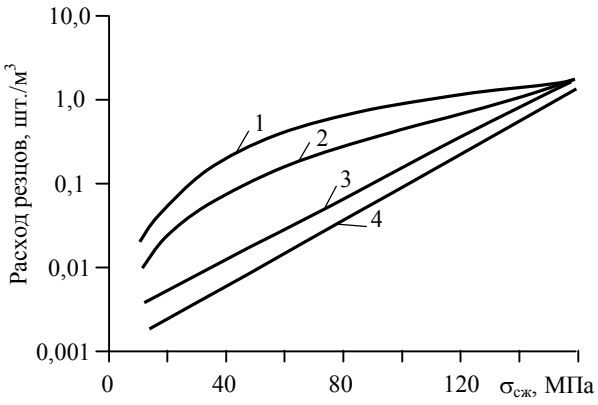


Рис.2. Удельный расход резцов в зависимости от прочности горных пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и их абразивности *CAI*

1 – *CAI* = 3; 2 – *CAI* = 2; 3 – *CAI* = 1; 4 – *CAI* = 0,6

Уже первые исследования, выполненные в ИГД им. А.А.Скочинского, а затем и в Новочеркасском политехническом институте, установили возможность использования характеристик абразивности по Барону – Кузнецову при расчетах износостойкости горно-режущих инструментов. Как показала практика, этот метод достаточно хорошо (с учетом точности расчетов) позволяет оценить изнашивающую способность прочных и высокопрочных пород. Иная картина наблюдается при испытаниях низкопрочных пород. Независимо от содержания кварца прогнозная оценка износостойкости резцов оказывается заниженной. Это объясняется тем, что в процессе испытаний стальной стержень вдавливается в горную породу. Глубина вдавливания в зависимости от прочности пород может достигать 8-10 мм и более. В результате происходит износ боковой поверхности стержня. Более того, из-за вдавливания под торцом стержня скапливаются частицы кварца и, в конечном счете, получаются завышенные значения показателя абразивности, не соответствующие интенсивности изнашивания резцов в реальном процессе резания пород. Однако эти недостатки, как показывают исследования, выполненные в ИГД им. А.А.Скочинского, в принципе могут быть устранены путем некоторого изменения техники эксперимента. Не меняя общую продолжительность опыта (10 мин) на одном испытуемом участке, предлагается проводить каждые испытания на нескольких участках, соответственно уменьшая продолжительность отдельного испытания. Например, на 5 участках по две минуты или на 10 участках по одной минуте. При таком подходе исключается существенное вдавливание стержня в породу и, следовательно, повышается точность определения показателя абразивности. Но эти работы до настоящего времени не завершены.

За рубежом наибольшее распространение получил метод определения абразивности углей и горных пород, разработанный Центром научных исследований угольной промышленности Франции (CERCHAR – Centre d'E´tudes et Recherches des Charbonnages), откуда пошло сокращенное название показателя абразивности *CAI* – CERCHAR Abrasibity Index. В настоящее время этот показатель является стандартом во Франции и США, а также рекомендуется к применению Международным бюро геомеханики ISRM [9].

Сущность методики для определения *CAI* заключается в следующем. Об предварительно обработанную поверхность образца горной породы истирается стальной резец (стилус) диаметром 6 мм и длиной рабочей части не менее 15 мм. Его рабочая головка коническая с углом заострения 90°. Стилус выполнен из легированной хромванадиевой инструментальной стали, например DIN 115CrV3 (Германия), UNI 107CrV3KU (Италия), UNE 120CrV (Испания), твердость 55±1 HRC. К резцу прикладывается статическая сила 70 Н, после чего он перемещается на 10 мм в течение 1±0,5 или 10±2 с в зависимости от конструкции аппарата для проведения испытаний. Процедура

DOI: 10.31897/PMI.2019.6.621

повторяется не менее 5 раз на расстоянии не менее 5 мм друг от друга и от краев образца. В течение всего испытания между стилусом и образцом породы должен быть постоянный контакт.

Испытания проводятся на образцах в форме диска или произвольной формы с поверхностью, не успевшей подвергнуться эффекту выветривания. С этой целью обычно используются остатки образцов породы сразу после проведения тестов по определению предела прочности породы на растяжение [10]. Ограничений по размеру минеральных зерен нет, но для материалов с размером зерен более 2 мм желательно провести больше пяти испытаний. Размер образца должен позволить провести не менее пяти испытаний с учетом следующих ограничений: расстояние от края образца до царапины, оставленной резцом, должно быть не менее 5 мм, расстояние между двумя соседними царапинам также должно быть не менее 5 мм. Для образцов с анизотропными свойствами рекомендуется выбирать направления относительного перемещения стилуса перпендикулярными к границе анизотропии. При этом важно, чтобы испытание отражало текстуру и преобладающий минеральный состав образца. Абразивность горной породы определяют как безразмерную величину, зависящую от изменения диаметра стилуса в зоне контакта с испытываемым образцом.

После проведения испытаний составляется отчет, содержащий следующую информацию: источник образца горной породы; дата получения и изготовления образца; способ сохранения образца при транспортировке; дата проведения испытаний; условия хранения образца; тип горной породы (если известен); максимальный размер минеральных зерен; плоскости нарушений или анизотропии (угол падения, слоистость и т.д.); направление относительного движения резца по отношению к плоскостям нарушений или анизотропии; состояние поверхности образца; твердость резца; тип испытательной установки; способ измерений (сбоку (сверху)), оптический (цифровой); среднее значение *CAI*; классификация по абразивности.

Как видно из приведенного краткого описания методик, для определения абразивности пород в горной промышленности, несмотря на общность подходов – измерение деформации эталонного металлического образца в ходе его взаимодействия с образцом горной породы под заданной нагрузкой, отечественный и зарубежный показатели абразивности существенно разнятся. В первом случае определяют потерю веса эталонного образца, а во втором – изменение геометрии его режущей головки.

В России и странах бывшего Советского Союза на показателе абразивности по Барону – Кузнецову завязано множество методик, касающихся определения изношенности и расхода резцов, нагруженности трансмиссии привода рабочего органа очистных и проходческих комбайнов с учетом изнашиваемости инструмента и пр. Однако за пределами обозначенного региона этот показатель совершенно не известен [3]. В мире наиболее широкое распространение получил показатель абразивности *CAI*. В настоящее время *CAI* используется в основном при расчете расхода инструмента (любого использующегося сейчас типа). При этом всемирно признанных методик определения, например критической скорости резания или нагрузок, действующих на изношенные инструменты, с использованием *CAI* пока нет, но количество исследований, касающихся расширения области его применения, стремительно растет.

Заключение. Анализ проведенного исследования позволяет утверждать, что абразивность горных пород является существенным параметром, оказывающим влияние на техническую и экономическую эффективность механического разрушения горных пород. Она влияет на производительность проходческих работ, задавая верхнюю планку скорости резания [см. формулы (8), (9) и (15)], а также на коэффициент использования машинного времени вследствие замены изношенных инструментов. От абразивности также зависят усилия, необходимые для разрушения горных пород, т.е. силовые и энергетические характеристики горных машин. Таким образом, наряду с прочностью и трещиноватостью [4] горных пород абразивность является одним из основных параметров, определяющих эффективность механизации проходки горных выработок и извлечения полезных ископаемых.

Однако несоответствие показателей абразивности горных пород и способов их определения в России и за рубежом в настоящее время является сдерживающим фактором развития горной науки и промышленности в нашей стране. Из-за этого противоречия российские ученые не могут пользоваться результатами передовых по мировым меркам исследований в области разрушения

горных пород механическим инструментом и его изнашиваемости. Горно-добывающие предприятия, приобретая зарубежное оборудование, в некоторой степени рискуют, не вполне осознавая область его применения, а отечественным производителям подобной техники трудно находить точки соприкосновения с зарубежными потребителями (особенно на объектах с крепкими и абразивными породами). Строительные организации в области подземного строительства вынуждены обращаться за дорогостоящими консультациями по вопросам изнашиваемости инструмента и связанными с этим явлениями (например, планирование работ с учетом простоя оборудования) к зарубежным специалистам и организациям. Вместе с тем мы уверены, что изыскав возможность описать накопленный отечественный опыт по рассмотренным в статье вопросам в терминах, понятных на глобальном уровне, можно обеспечить российской горной науке прорыв в области исследований по механизации горно-проходческих работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Глатман Л.Б.* Определение критической скорости резания горных пород поворотными резцами / Л.Б.Глатман, И.А.Леванковский, С.И.Мултанов // Научные сообщения / ИГД им. А.А.Скочинского. М., 1994. Вып. 300. С. 149-155.

2. *Жабин А.Б.* Краткий анализ проблем и путей решения при обеспечении горно-добывающего предприятия современными техническими средствами ведения горных работ / А.Б.Жабин, Е.А.Аверин, А.В.Поляков // Уголь. 2018. № 1 (1102). С. 13-16. DOI:10.18796/0041-5790-2018-1-13-16

3. *Жабин А.Б.* О необходимости введения государственного стандарта для определения абразивности горных пород / А.Б.Жабин, А.В.Поляков, Е.А.Аверин // Уголь. 2018. № 11. С. 86-91. DOI:10.18796/0041-5790-2018-11-86-91

4. *Жабин А.Б.* Интегральная оценка сложности проекта проходки горных выработок / А.Б.Жабин, Е.А.Аверин, А.В.Поляков // Уголь. 2017. № 11. С. 60-63. DOI:10.18796/0041-5790-2017-11-60-63

5. *Леванковский И.А.* Расчет износостойкости поворотных резцов при работе проходческих комбайнов // Разрушение горных пород и композиционных материалов поворотными резцами: Сб. науч. трудов / Академия горных наук. М., 1998. Вып. 1. С. 110-128.

6. *Малевич Н.А.* Горнопроходческие машины и комплексы. М.: Недра. 1971. 384 с.

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

8. *Archard J.F.* Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of Applied Physics. 1953. Vol. 24. № 8. P. 981-988. DOI:10.1063/1.1721448

9. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test / M.Alber, O.Yarali, F.Dahl, A.Bruland, H.Käsling, T.N.Michalakopoulos, M.Cardu, P.Hagan, H.Aydin, O.Özarslan // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. Vol. 1. № 47. P. 261-266. DOI:10.1007/s00603-013-0518-0

10. *Käsling H.* Determining rock abrasivity in the laboratory / H.Käsling, K.Thuro // Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering – Proc EUROCK 2010. London: Taylor & Francis, 2010. P. 425-428.

11. *Mishnaevsky L.L.* Mathematical modelling of wear of cemented carbide tools in cutting brittle materials // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1995. Vol. 35. № 5. P. 717-724. DOI:10.1016/0890-6955(95)93040-D

12. *Plinninger R.J.* Abrasiveness testing, quo vadis? – a commented overview of abrasiveness testing methods / R.J.Plinninger, U.Restner // Geomechanics and Tunnelling. 2008. Vol. 1. № 1. P. 61-70. DOI: 10.1002/geot.200800007

13. *Rabinowicz E.* Friction and wear of materials. New York: John Wiley & Sons. 1995. 336 p.

14. *Schimazek J.* The influence of rock structure on the cutting speed and pick wear of heading machines / J.Schimazek, H.Knatz // Gluckauf. 1970. Vol. 106. P. 274-278.

***Авторы*: А.Б.Жабин**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *zhabin.tula@mail.ru* (*Тульский государственный университет*, *Тула*, *Россия*), **А.В.Поляков**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *polyakoff-an@mail.ru* (*Тульский государственный университет*, *Тула*, *Россия*), **Е.А.Аверин**, *канд. техн. наук*, *инженер-конструктор*, *evgeniy.averin.90@mail.ru* (*ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод»*, *Тула*, *Россия*), **Ю.Н.Линник**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *yn_linnik@guu.ru* (*Государственный университет управления*, *Москва*, *Россия*), **В.Ю.Линник**, *д-р экон. наук*, *профессор*, *d0c3n7@gmail.com* (*Государственный университет управления*, *Москва*, *Россия*).

Статья поступила в редакцию 25.04.2019.
Статья принята к публикации 26.06.2019.