

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.236.023

НОВЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА В РАЗРУШАЕМОЙ СРЕДЕ

Б. Л. Герике, В. И. Клишин, П. Б. Герике

*Институт угля СО РАН, E-mail: klishinvi@icc.kemsc.ru,
просп. Ленинградский, 10, 650065, г. Кемерово, Россия*

Рассмотрены оценки качества взаимодействия механического инструмента горных машин с разрушаемой средой, на основе анализа которых предложен новый показатель — коэффициент эффективности действия инструмента. Его введение позволяет не только оценить качество воздействия инструмента на разрушаемый массив, но и прогнозировать энергозатраты на выемку полезного ископаемого, а следовательно, и производительность горных машин в конкретных горнотехнических условиях.

Дисковый инструмент, массив полезного ископаемого, показатели прочности, разрушение, энергозатраты, коэффициент эффективности действия

Существующие методы оценки качества рабочего инструмента и его взаимодействия с разрушаемой средой не дают однозначного заключения при сравнительном анализе различных типов инструмента и способов передачи энергии разрушаемому массиву. Объясняется это не только субъективными взглядами исследователей на процесс разрушения при том или ином способе воздействия рабочего инструмента на горный массив, но и тем фактом, что обычные представления об исследованиях, проведенных при прочих равных условиях, неверны, если под ними подразумеваются такие внешние факторы, как величина и способы приложения сил, время приложения нагрузки и относительные перемещения, так как для одних групп горных пород они могут быть рациональными, а для других совершенно невыгодными.

В настоящее время наибольшее распространение в качестве критерия качества механического воздействия, приводящего к разрушению, получил интегральный показатель — энергетические затраты на разрушение [1–3], как наиболее полно отражающий способ передачи энергии, напряженно-деформированное состояние среды и механизм возникновения и развития разрушения. Теоретическое исследование процесса передачи механической энергии в массиве горных пород приведено в работе [4]. Однако затраты энергии на разрушение, как отмечается в [5],

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.” по теме: Разработка экспериментальных конструкций комбинированного инструмента с применением сверхтвердых композиционных материалов для эффективного разрушения горных пород. Соглашение № 14.607.21.0028 от 05.06.2014 г.

могут служить критерием качества только в том случае, если их значения соответствуют оптимальным условиям разрушения для каждого способа воздействия и для каждого испытуемого образца горных пород. Поэтому "... под прочими равными условиями следует понимать такие условия, при которых процесс разрушения идет с минимальными затратами энергии, а силовые воздействия могут и даже должны быть различными" [5]. Однако для многих типов воздействия при разрушении различных литотипов горных пород оптимальные значения энергозатрат не могут быть определены, а приведение их с использованием дополнительной информации к одинаковым внешним условиям сопряжено со значительными трудностями и зачастую не позволяет получить состоятельной оценки качества.

На основе результатов анализа механизма взаимодействия рабочего инструмента с разрушаемым массивом можно предложить достаточно простую характеристику [6], позволяющую оценить не только величину предела сопротивляемости горного массива разрушению, но и эффективность конкретного инструмента горной машины или механического воздействия.

Как известно, предел сопротивляемости разрушению при любом виде воздействия зависит от величины разрушающей нагрузки и площади сечения, воспринимающего эту нагрузку: $[\sigma]_p = P/S$, где P — разрушающая нагрузка, Н; S — площадь сечения, воспринимающего нагрузку, м². При этом энергия, затрачиваемая на разрушение, определяется площадью нагрузочной диаграммы $P(\Delta l)$ (рис. 1).

Горные породы по-разному сопротивляются различным видам нагружения [3] и ведут себя как хрупкие, упругие или вязкоупругие тела. В простейшем случае (упругое тело) энергия разрушения может быть записана как $A_p = 0.5P_p\Delta l_p$ или в более общем виде $A_p = \frac{1}{K}P_p\Delta l_p$, где K — коэффициент формы диаграммы нагружения (для хрупких тел $K > 2$, для вязких $K < 2$). Отсюда несложно получить выражение для удельной энергоемкости процесса разрушения:

$$H_w = \frac{A}{KS\Delta l_p} = \frac{P_p\Delta l_p}{KS\Delta l_p} = \frac{[\sigma]_p}{K}.$$

Таким образом, по реальным затратам энергии можно восстановить значение сопротивляемости материала разрушению и сопоставить полученную величину с одной из "инвариантных" характеристик материала $\sigma_{сж}$, σ_p , τ и т. п. Поскольку предельными значениями для горных пород являются временные сопротивления сжатию и отрыву [7], а все остальные сопротивляемости элементарным деформациям лежат в интервале, ограниченном этими характеристиками, можно остановиться на величинах $\sigma_{сж}$ и σ_p как мерах максимально и минимально возможных энергозатрат. Для количественной оценки реального сопротивления материала механическому воздействию введем коэффициент эффективности действия инструмента (рис. 2), связанный с инвариантными характеристиками разрушаемого массива и базирующийся на энергетических затратах, который в интервале изменения любого независимого параметра (скорость подачи комбайна V_n , глубина внедрения в разрушаемый массив $h_{уд}$, шаг набора инструмента t_p и т. п.) определяется как

$$\eta = 1 - \frac{2H_w - \sigma_p}{\sigma_{сж} - \sigma_p}.$$

Как показано в [6], эта характеристика инвариантна относительно физико-механических свойств разрушаемой среды и зависит только от способа передачи энергии разрушаемому массиву. Гипотетическое допущение существования процесса, при котором энергозатраты на разрушение стремятся к нулю, приводит к оценке эффективности такого процесса:

$$\eta = \frac{1}{1 - \chi},$$

которая является теоретическим пределом эффективности процессов механического воздействия инструментов горных машин на разрушаемый массив. Здесь χ — показатель хрупкости материала $\chi = \sigma_p / \sigma_{сж} = 1 / K_{хр}$.

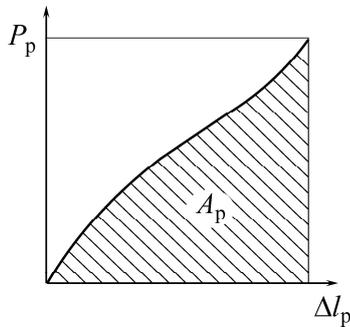


Рис. 1. Нагрузочная диаграмма при разрушении горных пород

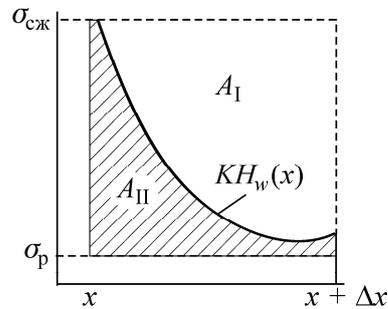


Рис. 2. К определению коэффициента эффективности инструмента: A_I , A_{II} — возможные и реальные приведенные затраты энергии

Определенная по результатам опытов энергоёмкость при разрушении кварца, габбро и карбонатных пород дисковым инструментом в режиме малоциклового нагружения [8] в совокупности с результатами по ударному скалыванию межщелевых целиков, полученными при разрушении туфа, песчаников и гранита [9], позволила получить результаты, которые хорошо укладываются в функциональную зависимость (рис. 3а). Последняя близка к теоретическому пределу и свидетельствует о том, что с увеличением вязкости материала возрастает эффективность использования подводимой к инструменту энергии — происходит как бы “охрупчивание” материала. Объяснение этому следует искать в том факте, что горные породы, обладающие высокой степенью хрупкости, имеют многочисленные дефекты структуры, которые играют роль элементарных трещин Гриффитса и способствуют движению магистральной трещины [10]. Поэтому процесс, происходящий в образцах при лабораторном определении механических характеристик, близок к реально существующему, а горные породы, имеющие большую вязкость, структурно более однородны и разрушение сколом зерен материала в вершине трещины, приводящее к ее росту, существенно отличается от процесса, протекающего в образцах при определении предела прочности в лабораторных условиях.

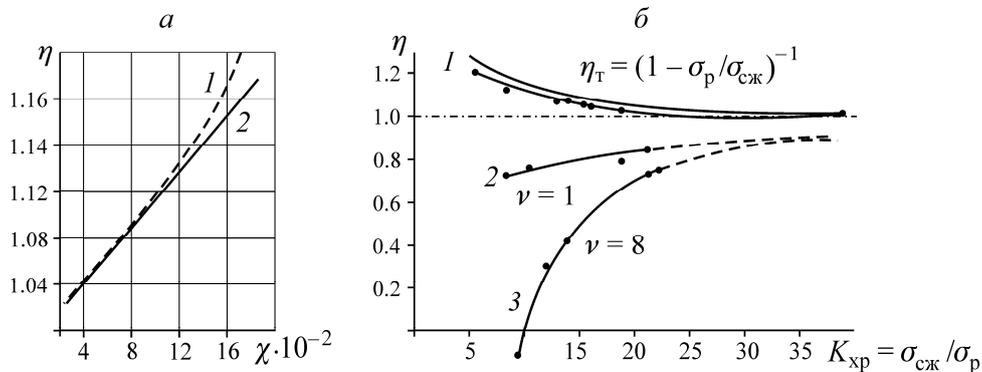


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности действия инструмента от хрупкости материала: а — с использованием явления подвижных магистральных трещин; б — при малоцикловом нагружении (1) и объемном деформировании (2, 3) горных пород

Разрушение крепких горных пород при объемном деформировании (свободное скалывание дисковым инструментом [11], приповерхностное разрушение дисковыми шарошками [12] и т. п.) характеризуется противоположной тенденцией (рис. 3б). Отмечается снижение коэффициента эффективности действия инструмента при возрастании вязкости разрушаемой среды, что особенно существенно проявляется при больших значениях относительного шага разрушения $\nu = t_p / h$. Если при $\nu = 1$, когда сильно влияние дополнительной поверхности обнажения, разрушение идет в основном за счет напряжений растяжения ($\eta = 0.7 - 0.9$), то при разрушении даже достаточно хрупких материалов в режиме приповерхностного дробления ($\nu = 8$) коэффициент эффективности действия не превышает 0.7 и может иметь даже отрицательные значения. Последнее обстоятельство объясняется неэффективным использованием подводимой энергии на создание дополнительных деформаций массива, не приводящих к его разрушению.

Приведенные на рис. 3б зависимости для случая объемного разрушения указывают только на тенденцию изменения коэффициента эффективности действия инструмента, так как базируются на непредставительном объеме статистического материала по литологическим группам пород, для уточнения которых требуется проведение дополнительных исследований. Однако вес отдельных точек значителен, поскольку каждая из них получена на основе обработки не менее 50 осциллограмм, что делает возможным использование их для прогноза энергетических затрат при разрушении исполнительными органами комбайнов пород, обладающих аналогичными показателями хрупкости.

Введенное понятие коэффициента эффективности действия инструмента и установленные зависимости его изменения позволяют оценить удельные энергозатраты на разрушение при выемке рудных массивов очистным комбайном. Режим работы инструмента при этом определяется соотношением глубины внедрения в горный массив $h_{уд}$ за один оборот исполнительного органа и шага набора инструмента на последнем t_p . Сложное стратиграфическое строение разрушаемой пачки полезного ископаемого предопределяет разбивку траектории движения инструмента на литологически однородные участки (рис. 4а) с обязательным выделением участков (заштрихованная зона), где величина относительного шага значительна $\nu \gg 2$. Кроме того, циклоидальная форма снимаемой стружки, для которой в первом приближении справедлива закономерность

$$h_{уд} = h_{уд, \max} \sin \Omega t,$$

где Ω — частота вращения исполнительного органа, заставляет прибегнуть к осреднению мгновенного значения глубины внедрения инструмента в разрушаемый массив в пределах структурно однородного участка пути движения инструмента. В качестве меры осреднения следует использовать эффективное (действующее) значение текущей величины (рис. 4б):

$$h_{уд, \text{эф}}^2 = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \sin^2(\Omega t) dt,$$

которое в конечном итоге определяет интегральную оценку относительного шага разрушения $\nu = t_p / h_{уд, \text{эф}}$. Используя ранее установленные корреляционные соотношения относительного шага разрушения и величины коэффициента эффективности действия инструмента, нетрудно оценить удельные энергозатраты при разрушении полезного ископаемого, а следовательно, и производительность горных выемочных машин в конкретных горнотехнических условиях:

$$H_{W, i} = \frac{\sigma_{сж, i}(1 - \eta_i) - \sigma_{р, i}\eta_i}{2}.$$

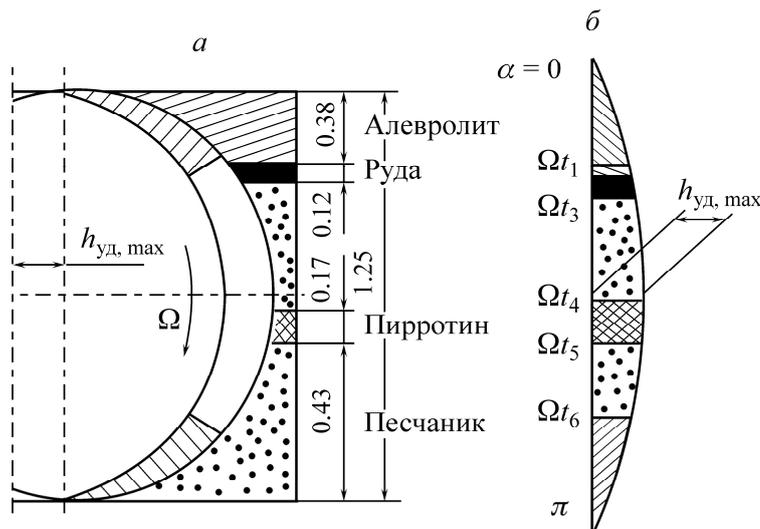


Рис. 4. Формирование стружки разрушаемого массива (а) и эквивалентная расчетная схема (б)

Общая энергоемкость в этом случае рассчитывается по формуле

$$H_W = \frac{\sum_1^n H_{W,i} m_i}{\sum_1^n m_i},$$

где m_i — мощность отдельных пачек полезного ископаемого.

Дисковые инструменты, расположенные в соседних линиях резания, находятся одновременно в контакте с различными пачками горных пород. Формирующиеся на них нагрузки, от которых зависят суммарные затраты на разрушение, являются функциями не только физико-механических свойств горных пород, но и параметров разрушения, определяемых кинематикой работы и конструктивными параметрами исполнительного органа. Это позволяет получить в аналитическом виде зависимость необходимых энергозатрат от скорости подачи исполнительного органа на забой.

В качестве иллюстрации предложенного метода определения минимальных энергозатрат на разрушение массива полезного ископаемого рассмотрена выемка рабочим органом ШДИ-1250 комбайна 1ГШ-68 горного массива, включающего жилу C_{1-27} , прослойку пирротина и вмещающие породы (песчаник и алевролит). Характеристика механических свойств разреза приведена в таблице.

Механические свойства разрушаемых пород, МПа

Литотип	Предел прочности					
	при одноосном сжатии			при одноосном растяжении		
	max	min	med	max	min	med
Сульфидная руда	83.7	26.1	46.4	9.4	3.3	6.6
Пирротин	—	—	136.0	—	—	7.5
Песчаник	128.3	37.8	72.0	31.8	6.5	16.2
Алевролит	83.9	14.7	48.3	40.0	7.6	19.1

Для численного эксперимента создана имитационная модель [6] работы исполнительного органа на основе следующих допущений:

— контакт инструмента с забоем в момент реализации отдельного акта разрушения не прерывается, при этом на исполнительном органе возникает максимально возможная нагрузка;

— вероятность реализации того или иного режима разрушения в производственных условиях соответствует вероятности их возникновения в лабораторном эксперименте;

— процесс формирования нагрузки на отдельных инструментах, установленных в соседних линиях разрушения, не коррелирован.

Расчеты показывают, что удельные энергозатраты при разрушении этого массива дисковым инструментом при скорости подачи комбайна $V_n = 0.3$ м/мин составляют $H_w = 1.79 \pm 0.44$ кВт·ч/м³. Замеры потребляемой мощности на этой же скорости подачи при опытной эксплуатации дают $H_{w_3} = 2.9 \pm 0.79$ кВт·ч/м³. Такое расхождение объясняется тем, что крупные куски полезного ископаемого, отделенные дисковым инструментом от массива, остаются в зоне работы исполнительного органа и подвергаются дополнительному дроблению, о чем свидетельствует гранулометрический состав отбитой горной массы. На этот процесс требуются дополнительные затраты энергии.

Для проверки подлинности выдвинутой гипотезы и правильности сделанных допущений проведены исследования *in situ* при производственных испытаниях механизированного комплекса для отработки пологопадающей жилы “Становая” в пределах специально подготовленного блока С₁₋₂₇ на руднике “Приморский” ПО “Дальполиметалл” [13].

В пределах опытного блока С₁₋₂₇ мощность рудного тела изменялась от 0.3 до 1.5 м с возможным раздутием до 3.5 м, угол падения составлял 20–40°, гипсометрия сложная, невыдержанная. Средние значения радиуса кривизны, длины хорды и показателя кривизны составляют соответственно 30–40, 14–20, 0.45–0.5 м. Длина лавы 76 м, блока — 80 м, вынимаемая мощность 1.25–1.95 м.

Рудное тело представлено сульфидной жилой, сопровождающейся местами зонами прожилкового оруденения. Имеет место замещение жилы породами (преимущественно прочными вязкими песчаниками). Вмещающие породы выполнены рассланцованными алевролитами черного цвета с прослоями среднезернистого песчаника и включениями пирротина. Прочность руды и вмещающих пород в опытном блоке изменяется от 60–80 до 120–140 МПа, в среднем составляет 80–100 МПа. Руда в основном плотная ($\gamma = 0.0343$ МН/м³), вязкая ($\chi = 0.2–0.25$).

Разрушение рудного тела исполнительным органом ШДИ-1250М [14] происходит следующим образом: при вращении исполнительного органа и подаче его на забой дисковые инструменты последовательно от забоя к завалу разрушают горную породу, которая с помощью погрузочных лопастей перемещается и грузится на забойный конвейер. При этом от горного массива происходит отделение крупных кусков в режиме силового малоциклового разрушения [8].

Исполнительный орган оснащен двумя типами дискового инструмента: с непрерывной и прерывистой режущей кромками, которые создавались твердосплавными вставками различной конструкции. Надежность, ремонтпригодность, технологичность изготовления и эксплуатации исполнительного органа улучшаются при защите подшипника дискового инструмента от пыли и влаги крышкой с лабиринтным уплотнением, а также при использовании сборной, состоящей из двух частей, ступицы [14], что позволяет осуществлять необходимый натяг подшипника как при его сборке, так и эксплуатации.

Испытания исполнительного органа ШДИ-1250М показали значительное снижение динамических нагрузок и вибраций, повышение эксплуатационной надежности и технологичности при отбойке вязких крепких абразивных пород за счет рациональной схемы набора забойных дисковых инструментов. Подшипниковый узел дискового инструмента обладает большей долговечностью и высокой ремонтпригодностью, а применение сплошных износостойких быстроремонтируемых шарошечных колец обеспечивает высокую ремонтпригодность дискового инструмента и технологичность конструкции исполнительного органа при его изготовлении.

В результате испытаний различных типов дисковых инструментов с непрерывной режущей кромкой (цементированных и упрочненных рэлитом) и с прерывистой режущей кромкой, армированных твердосплавными зубками различных форм, установлено, что для отбойки крепких абразивных руд наиболее эффективны дисковые инструменты, армированные различными твердосплавными вставками. При этом удельные энергозатраты на разрушение крепких породных массивов оказались статистически неразличимыми, а расход дисков, армированных грибковыми и эллипсоидными твердосплавными вставками, составил в среднем 0.06 шт/м^3 , дисков с коническими твердосплавными вставками — около 0.07 шт/м^3 , с непрерывной режущей кромкой — 0.34 шт/м^3 . Стойкость дискового инструмента с непрерывной режущей кромкой оказалась статистически неразличимой для дисков, подвергнутых цементации и наплавке рэлитом. При этом стоимость изготовления армированного инструмента возросла не более чем в 3.7 раза.

Для сравнительной оценки эффективности разрушения крепких руд дисковыми инструментами проведены дополнительные испытания серийного шнека с резцами ЗР-4.80 и экспериментального с резцами РКС-2. Оценка удельных энергозатрат при разрушении этого же массива серийными рабочими органами с резцами ЗР-4.80 по предложенной методике дает $H_W = 8.78 \pm 1.31 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$, что хорошо коррелирует с экспериментальными результатами: $H_{W\gamma} = 10.28 \pm 2.41 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$.

Установлено, что по производительности ($0.07 - 0.14 \text{ м}^3/\text{мин}$), энергоемкости ($12 - 19 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$) и расходу инструмента ($9 - 16 \text{ шт/м}^3$) резцовые шнеки абсолютно непригодны для отбойки крепких ($f \geq 8$) абразивных руд. В какой-то степени они могут быть использованы, например, в комбинации с буровзрывным ослаблением при разрушении руды прочностью на сжатие до 60 МПа. Испытания в этих условиях показали [15], что скорость подачи комбайна в 2–3 раза меньше (0.4 м/мин), а энергоемкость разрушения в 2.5–3 раза выше ($5.8 - 6.2 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$), чем при отбойке исполнительным органом с дисковым инструментом.

ВЫВОДЫ

Введенный коэффициент эффективности механического воздействия позволяет привести различные типы инструмента и способы передачи энергии к одинаковым внешним условиям. Эта характеристика связана с показателем хрупкости горной породы и инвариантна относительно типа воздействия рабочего инструмента на разрушаемый массив.

Оценка качества дискового инструмента, основанная на введенном коэффициенте, показала преимущество такого способа передачи энергии разрушаемому массиву крепких горных пород по сравнению с режущим инструментом. Коэффициент эффективности действия дискового инструмента превосходит этот показатель для режущего инструмента в 2.3–3.7 раза и свидетельствует о том, что разрушение массива крепких горных пород осуществляется преимущественно за счет напряжений растяжения, формирующихся под лезвием инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон Л. И., Глатман Л. Б. К выбору критерия оценки сопротивляемости горных пород разрушению шарошечным инструментом // Разрушение горных пород шарошечным инструментом. — М.: Наука, 1966. — С. 18–27.
2. Позин Е. З. Сопротивляемость углей разрушению режущими инструментами. — М.: Наука, 1972. — 238 с.

3. **Тангаев И. А.** Энергоемкость процесса добычи и переработки полезных ископаемых. — М.: Недра, 1986. — 274 с.
4. **Ревуженко А. Ф., Клишин С. В.** Линии тока энергии в деформируемом горном массиве, ослабленном эллиптическими отверстиями // ФТПРПИ. — 2009. — № 3. — С. 3–8.
5. **Шрейнер Л. А.** Твердость хрупких тел. — М.: Гостоптехиздат, 1949. — 187 с.
6. **Герике Б. Л., Лизункин В. М.** Энергетическая оценка качества механического разрушения горных пород // Горн. журн. — 1998. — № 6. — С. 51–55.
7. **Разрушение углей и горных пород** / под ред. А. М. Терпигорева и М. М. Протодьяконова. — М.: Углетехиздат, 1958. — 58 с.
8. **Герике Б. Л.** Качественные особенности процесса разрушения крепких горных пород дисковым скалывающим инструментом и их количественные оценки // ФТПРПИ. — 1991. — № 2. — С. 16–22.
9. **Коняшин Ю. Г.** О влиянии свойств горных пород на энергоемкость ударного скалывания межщелевых целиков // Разрушение горных пород: науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. — 1973. — Вып. 106. — С. 24–30.
10. **Эрдоган Ф.** Теория распространения трещин. Разрушение / под ред. Г. Либовиц. — М.: Мир, 1975. — Т. 2. — С. 521–616.
11. **Логов А. Б., Герике Б. Л., Раскин А. Б.** Механическое разрушение крепких горных пород. — Новосибирск: Наука, 1989. — 168 с.
12. **Барон Л. И., Глатман Л. Б., Козлов Ю. Н., Мельников И. И.** Разрушение горных пород проходческими комбайнами: разрушение агрегированными инструментами. — М.: Наука, 1977. — 160 с.
13. **Лизункин В. М., Герике Б. Л., Уцын Ю. Б.** Механизированная подземная разработка крепких руд маломощных месторождений. — Чита: ЧитГТУ, 1999. — 238 с.
14. **Пат. РФ 2187640, E21C25/16.** Исполнительный орган горного комбайна / В. М. Лизункин, Е. И. Крылов, Б. Л. Герике, М. В. Лизункин // Оpubл. в БИ. — 2002. — № 12.
15. **Кудлай Е. Д., Приволоцкий А. А.** Исследование характеристик работы исполнительных механизмов очистного комбайна // Совершенствование техники и технологии разработки многолетнемерзлых россыпей: сб. науч. тр. — Магадан, 1985. — С. 15–19.

Поступила в редакцию 16/XI 2015