

УДК 622.023

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник

*Государственный университет управления,
E-mail: un_linnik@guu.ru, Рязанский проспект, 99, 109542, г. Москва, Россия*

Для горных пород высокой крепости наиболее эффективен ударный способ их разрушения. Однако применение динамического способа разрушения горных пород возможно при оптимальных параметрах, выбор которых должен основываться на современных методах оценки сопротивляемости горных пород разрушению, зависящей от их свойств. Рассмотрены особенности динамического характера нагружения рабочего инструмента и предложена классификация методов динамических испытаний горных пород. Рекомендована методика проведения испытаний на дробимость пород. Дана оценка сопротивляемости горной породы разрушению динамическими нагрузками, главным критерием которой является объемный выход раздробленного материала фракции – 7 мм. Прочностные характеристики пород, полученные с помощью различных методов испытаний, сравнивались с оценкой сопротивляемости горных пород разрушению ударом по выбранному критерию. Результаты сравнения показали хорошую сходимость, достаточную для выполнения инженерных расчетов.

Ударная нагрузка, горная порода, свойства горных пород, бурение, метод испытаний, долото, скорость бурения, сопротивляемость разрушению

DOI: 10.15372/FTPRPI20250308
EDN: LCITUY

Отделение угля и горных пород от массива — начальный этап ведения добычных и проходческих работ. Нагрузки, возникающие на исполнительных органах, влияют на энергоемкость разрушения, сортность добываемого угля, что определяет эффективность процесса выемки. Выбор оптимальных способов и средств разрушения, особенно применительно к породам средней и высокой крепости, — одна из важнейших задач угольной и горнодобывающей промышленности.

Статический способ разрушения пород с использованием принципа резания зачастую малопроизводителен и недостаточно эффективен из-за ограниченной мощности применяемого оборудования и быстрого выхода из строя режущего инструмента. Ударный способ, характеризующийся большими усилиями, развиваемыми на исполнительных органах горных машин за малые промежутки времени, обеспечивает получение лучших результатов. Все это обусловило широкое распространение динамического способа разрушения горных пород при современной технологии разработки полезных ископаемых. В настоящее время данный способ преобладает при бурении шпуров в крепких породах на предприятиях всех отраслей горнодобы-

вающей промышленности и в подземном строительстве. Анализ показал, что затраты труда на буровые работы при подземной добыче твердых полезных ископаемых составляют 35–45 % от всех принятых затрат труда на очистную выемку.

Разрушение с динамическим приложением нагрузок характерно применяется при использовании динамических стругов, отбойных молотков, станков шарошечного бурения, дробильных машин и барабанных мельниц, машин для разрушения мерзлых грунтов, при вторичном дроблении негабаритов и т. п. Зарубежными и отечественными учеными и конструкторами ведутся работы по созданию проходческих комбайнов ударного действия.

Эффективное применение динамического способа разрушения горных пород возможно при определенных оптимальных параметрах, зависящих от конкретных условий эксплуатации, прогнозирование которых неосуществимо без проведения исследований. Такие работы проводились в России [1–5] и за рубежом [6–8] применительно к статическому разрушению угля и горных пород. Разработаны методы расчета усилий, действующих на резцы исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов в зависимости от свойств разрушаемых угольных и породных массивов [9–12]. Они позволяют рассчитывать оптимальные геометрические и конструктивные параметры резцов и исполнительных органов статического действия, а также выбирать оптимальные режимы работы. В России и за рубежом проводятся исследования динамического разрушения горных пород [13–16, 18], но они не в полной мере учитывают свойства разрушаемых горных пород. Цель настоящей работы — установить влияние свойств горных пород на эффективность процесса динамического разрушения при бурении шпуров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим особенности динамического способа приложения нагрузок, отличающие его от статического способа. Определение статического или динамического характера нагружения обычно ставится в зависимость от скорости приложения нагрузки и времени ее воздействия. С учетом этих параметров нагрузки классифицируются следующим образом:

- статические, независящие от времени их приложения;
- постепенно прилагаемые (изменяются в течение промежутка времени, измеряемого секундами);
- пульсирующие или знакопеременные (периодически изменяются во времени с частотой порядка сотен тысяч раз в секунду);
- быстро прилагаемые (изменяются в течение промежутков времени, измеряемых миллисекундами);
- ударные (характеризуются почти мгновенным, меньше малых долей микросекунды, возрастанием нагрузки до очень большого, но конечного значения, непосредственно за которым следует быстрое уменьшение нагрузки).

Данная классификация имеет условный характер, так как невозможно провести резкой грани между отдельными ее группами. Тем не менее первые четыре группы следует отнести к категории обычного нагружения, последнюю — к категории ударного или импульсного нагружения, чему и посвящено настоящее исследование.

Известные методы динамических испытаний горных пород целесообразно разделить на основные виды в зависимости от того, происходит или не происходит при испытании разрушение образца с потерей его формы. Условно такое разрушение образцов названо объемным (методы с объемным разрушением) [13], которое необходимо отличать от разрушения в приповерхностном слое, происходящее при вдавливании образца штампа для определения так называемой агрегатной твердости или контактной прочности породы (методы без объемного разрушения).

Для дальнейшего разделения видов динамических испытаний целесообразно воспользоваться признаком избирательного критерия оценки. Методы с объемным разрушением образцов горных пород разделялись на два класса в зависимости от того, производится оценка сопротивляемости породы по характеристикам минимальной нагрузки (силовым, энергетическим и пр.), вызывающей объемное разрушение, или же по характеристикам гранулометрического состава продуктов разрушения (выход различных фракций по крупности). Методы второго вида (без объемного разрушения) также подразделяются на два класса: с оценками по характеристикам упругих свойств и характеристикам разрушения в приповерхностном слое испытуемых образцов горных пород.

Для дальнейшего разделения на подгруппы применялся признак использования или неиспользования дробящих тел при разрушении образцов. Например, разрушение может осуществляться в одном случае путем сбрасывания самих кусков породы на твердую поверхность, в другом — посредством сбрасывания на неподвижно лежащий кусок специального дробящего груза определенного веса. Схема классификации существующих методов динамических испытаний образцов горных пород представлена ниже:

Методы испытаний с объемным разрушением образца	Методы испытаний без объемного разрушения образца
С оценкой по характеристикам нагрузки: при однократном ударе; при многократном ударе	С оценкой по характеристикам упругих свойств по показателю: динамической твердости; акустической жесткости
С оценкой по характеристикам продуктов разрушения: при однократном ударе без дробящего тела; с дробящим телом; при многократных ударах без использования дробящих тел; при свободном падении образца; при вращении образца; с использованием дробящих тел при свободном падении дробящего тела; при вращении	С оценкой по характеристикам разрушения в приповерхностном слое: по глубине внедрения ударника; по удельной работе разрушения

Оценивая совокупность приведенных методов динамических испытаний горных пород, можно сделать вывод о том, что ни один из них не отвечает полному сочетанию признаков, рациональных с точки зрения дробимости пород применительно к созданию горных машин с исполнительными органами ударного действия. Метод испытаний образцов горных пород на дробимость должен предусматривать:

— объемное разрушение, которое реализуется при ведении горнопроходческих и буровых работ;

— оценку результатов испытания по характеристикам продуктов разрушения, определяющих энергоемкость процесса разрушения горной породы;

— разрушение однократным ударом, поскольку при повторных ударах существенно изменяется сопротивляемость динамическому разрушению, что искажает результаты экспериментов;

— проведение испытаний с использованием дробящих тел, а не со свободно падающим образцом породы;

— приложение нагрузки при свободном падении дробящего тела, а не при вращении.

При анализе способов оценки сопротивляемости горных пород разрушению рекомендованы следующие рабочие параметры и порядок проведения испытаний:

1) испытания должны проводиться на вертикальном копре (вес падающего груза 16 кг, высота поднятия груза над образцом 50 см, энергия удара 8000 Н/см, ударяющая поверхность ударник плоская);

2) образцы исследуемых горных пород могут иметь неправильную форму (наибольший и наименьший размеры для каждого образца должны отличаться не более чем в 2 раза, средний вес образца — на ~ 70 г);

3) после удара по образцу падающим грузом необходимо тщательно собрать продукты разрушения;

4) собранный материал подвергается ситовому анализу, по результатам которого вычисляются итоговые показатели испытания.

По базовому варианту испытаний на дробимость главным критерием сопротивляемости горной породы разрушению динамическими нагрузками является объемный (в см³) выход V_{\max} раздробленного материала фракции – 7 мм [4, 17]. Дополнительный критерий, учитывающий соотношение крупных и мелких фракций в раздробленном продукте, рассчитывается как

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln[-\ln(1 - W_2)] - \ln[-\ln(1 - W_1)]}{\ln d_2 - \ln d_1}, \quad (1)$$

где d_1 , d_2 — максимальный и минимальный размеры отверстий сит соответственно, мм; W_1 , W_2 — выход фракций по весу, прошедших через сито с диаметром отверстий $d_2 = 7$ мм и $d_1 = 0.25$ мм в долях от единицы.

Данные о прочностных характеристиках горных пород, полученные с помощью различных методов испытаний, сравнивались с показателем сопротивляемости горных пород разрушению ударом. Для определения последнего выполнена серия экспериментов на вертикальном гравитационном копре, по результатам которого сопротивляемость породы разрушению определялась по скорости бурения V , вычисленной как частное от деления заданной глубины шпура на общее число ударов, нанесенных по штанге с коронкой, общей длиной 0.89 м, поворачивающейся после каждого удара на постоянный угол 300°. Стандартные для всех пород условия предусматривали использование армированной твердым сплавом коронки диаметром 49 мм с углом заострения 110° при постоянной энергии удара 80 Дж и скорости приложения нагрузки 7.8 м/с.

Сводные данные о прочностных характеристиках различных горных пород, полученных с использованием различных методов, приведены в табл. 1. Предварительный анализ показал, что предложенный метод оценки сопротивляемости пород разрушению по показателю V имеет ряд преимуществ перед другими способами и может применяться для оценки сопротивляемости горных пород разрушению при ударном бурении. Для проверки результатов лабораторных опытов выполнены эксперименты в производственных условиях с определением скорости бурения при использовании перфораторов и станков ударно-канатного и шарошечного бурения. Из забоев, где проводилось бурение, отбирались образцы горных пород, которые затем подвергались испытаниям на дробимость в лабораторных условиях. Результаты сравнивались с данными, полученными в производственных условиях.

ТАБЛИЦА 1. Показатели прочности горных пород, полученные с использованием различных методов

Горная порода	V_{\max} , см ³	$\operatorname{tg}\alpha$	k_t	d_t	$c_{\text{вр}}$, Н/см ²	A , Дж/см ²	$k_{\text{хр}}$	$k_{\text{Прот}}$
Диарид-порфирит	1.43	0.74	23.6	68	2560	58.0	0.25	20.0
Песчаник темно-серый	1.82	0.68	16.7	72	2780	90.0	0.36	20.0
Железистый кварцит	2.70	0.65	12.9	84	28000	78.0	0.38	20.0
Скарн	2.70	0.83	24.8	93	29000	78.0	0.37	20.0
Гранит биститовый	2.81	0.61	5.6	74	18600	41.0	0.24	18.6
Габбро	2.98	0.54	7.0	75	1850	41.0	0.25	18.5
Гранит дрезденский	3.21	0.59	6.8	80	22400	54.5	0.30	20.0
Песчаник слоистый	3.80	0.55	6.8	51	19000	46.0	0.23	19.0
Гранит лезниковский	4.10	0.61	6.1	97	24600	66.0	0.46	20.0
Известняк мраморизованный	4.50	0.77	8.5	47	16300	38.0	0.23	16.3
Ургит	5.00	0.65	5.1	72	17000	44.0	0.27	17.0
Мрамор белый	5.90	0.41	1.5	35	9500	12.5	0.13	9.5
Лабрадорит	6.90	0.70	5.6	72	16500	32.0	0.25	16.5
Апатит	8.30	0.63	1.3	41	14200	28.0	0.29	14.2
Песчаник кварцевый	8.90	0.63	1.2	50	17000	39.0	0.34	17.0
Мрамор серый	9.20	0.43	1.7	58	10000	13.5	0.19	10.0
Мартитовая руда	13.40	0.35	1.1	21	5600	4.2	0.20	5.6
Известняк слабый	13.50	0.31	0.9	12	2100	1.0	0.07	2.1

Примечание. k_t — коэффициент крепости по методу толчения; d_t — динамическая твердость; $c_{\text{вр}}$ — временное сопротивление раздавливанию образца правильной формы; A — работа упругих деформаций сжатия; $k_{\text{хр}}$ — коэффициент хрупкости; $k_{\text{Прот}}$ — коэффициент крепости по Протоdjяконову.

После обработки данных о скорости бурения и показателях дробимости различных по свойствам горных пород получена формула для определения чистой скорости перфорационного бурения пород однодолотчатыми коронками:

$$V = \frac{An}{d^2} V_{\max}^{0.82}, \quad (2)$$

где A — энергия единичного удара перфоратора, Дж; n — частота ударов, 1/мин; d — диаметр буримого шпура, мм; V_{\max} — показатель дробимости, определяемый в результате ситового анализа продуктов разрушения.

В табл. 2 приведены скорости бурения, полученные в производственных условиях, временное сопротивление раздавливанию, а также показатели дробимости V_{\max} , установленные на отобранных из забоев образцах горных пород в лабораторных условиях. Расчеты по определению чистой скорости перфорационного бурения по формуле (2) обеспечили достаточно точные результаты определения скоростей бурения разных горных пород различными перфораторами. Отклонение расчетных от фактических скоростей бурения не превышает 20–30 %, что допустимо для инженерных расчетов. Относительно некоторых типов пород (руда и породы апатитового комплекса) отмечаются значительные отклонения, которые, хотя и характеризуются высокими V_{\max} , на практике бурятся немногим лучше других пород, имеющих меньшие V_{\max} . Видимо, здесь существенно влияют структурные особенности самих пород.

ТАБЛИЦА 2. Параметры скорости бурения

Горная порода	V_{\max} , см ³	Фактическая скорость бурения, мм/мин	Скорость бурения, вычисленная по формуле (2)	Отклонение расчетной от фактической скорости бурения, %
Мартитовая руда	2.70	172	162	5.8
Мартитовый роговик	2.50	133	131	1.5
Известняк	4.80	196	158	19.3
Известняк мраморизованный	3.06	244	157	35.6
Известняк скарнированный везувианом	5.56	227	260	14.5
Мрамор серый	8.50	229	256	11.7
Апатит	9.80	280	290	3.5
Мончикит	2.35	118	70.4	40.6
Мончикит выветренный	1.55	97	49.6	48.5
Сетчатая руда	3.14	316	90.6	71.2
Ийолит	3.80	150	130	13.3
Перидонит	3.80	185	130	29.5
Роговик	3.25	148	113	23.6
Уртит	4.60	180	153	15.0
Железистый кварцит	2.60	67	94	40.3
Скарн	2.85	106	101	4.7
Гранатовый скарн	5.15	156	244	56.4
Роговообманковый скарн	2.50	192	149	22.4
Джеспилит	1.94	82	73	10.9
Рисчоррит	5.60	131	148	11.3
Сфеновый ийолит	5.36	133	142	6.8
Ийолит-уртит	6.25	182	162	11.0
Мончикит	2.35	118	70.4	40.6
Гранодиорит серый	3.21	152	164	7.9
Гранодиорит розовый	3.25	174	165	5.2
Гранодиорит интенсивно измененный	2.97	153	153	0.0
Монцонит	2.84	127	148	14.2
Монцонит альбитизированный	2.90	106	150	41.5
Монцонит метаморфизированный	2.40	100	128	28.0
Гранит роговообманковый	4.30	182	207	13.7
Гранит биотитовый	5.00	178	236	18.0
Лабрадорит	5.10	200	240	9.1
Габбро	5.20	250	244	2.4
Базальт	2.80	143	144	0.7
Доломит	5.40	204	252	23.5
Кварцит среднезернистый	3.80	141	187	32.6

Отметим, что формула (2) получена для случаев наиболее целесообразного использования бурового оборудования, предусматривающего применение незатупленного инструмента при оптимальных условиях его подачи. В этой связи не случайно расчетные и фактические значения скоростей бурения оказались близкими. Таким образом, скорости бурения, рассчитанные по формуле (2), следует рассматривать как значения, полученные при эффективном

использовании бурового инструмента. В случае, если фактические эксплуатационные значения скорости бурения по данным шахт и рудников будут отличаться в меньшую сторону от рассчитанных по (2), то это может свидетельствовать о неудовлетворительном применении бурового оборудования на предприятии.

ВЫВОДЫ

В качестве характеристики для оценки сопротивляемости пород ударному разрушению может использоваться показатель дробимости V_{\max} , определяемый в результате ситового анализа продуктов разрушения. Выявлено удовлетворительное совпадение с опытными данными результатов расчетов скорости бурения по формуле для определения скорости перфорационного бурения пород однодолотчатыми коронками.

Формула для определения скорости бурения, основанная на использовании предложенного метода оценки сопротивляемости горных пород разрушению динамическими нагрузками, может быть рекомендована для практического определения возможных скоростей бурения разнообразных горных пород различными типами перфораторов. Для большинства случаев ошибка не должна превышать 20–30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Позин Е. З., Меламед В. З., Тон В. В. Разрушение углей выемочными машинами. — М.: Недра, 1984. — 288 с.
2. Протодьяконов М. М., Тедер Р. И. Исследование процесса разрушения угля методом крупного скола. — М.: Госгортехтздат, 1960. — 342 с.
3. Задков Д. А., Габов В. В., Линь К. Н. Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин // Зап. Горн. ин-та. — 2019. — № 236. — С. 153–160.
4. Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Основы выбора параметров угледобывающих машин применительно к конкретным условиям эксплуатации. — М.: РУСАЙНС, 2023. — 336 с.
5. Шаклеин С. В., Рогова Т. Б. Горно-геометрическое прогнозирование тектонических нарушений угольного пласта в выемочном столбе // ФТПРПИ. — 2022. — № 4. — С. 18–25.
6. Wang L., Rybacki E., Bonnelye A., Bohnhoff M., and Dresen G. Experimental investigation on static and dynamic bulk moduli of dry and fluid-saturated porous sandstones, *Rock Mech.*, 2021, Vol. 54, No. 1. — P. 129–148.
7. Yongming X., Bing D., Ying C., Lei Z., Guicheng H., and Zhijun Z. Experimental study on the mechanical properties and damage evolution of hollow cylindrical granite specimens subjected to cyclic coupled static-dynamic loads, *Geofluids*, 2020, Vol. 2020, No. 4. — P. 1–14.
8. Jiuqun Z., Jihuan H., and Weihao Y. Investigating the influences of indentation hardness and brittleness of rock-like material on its mechanical crushing behaviors, *Mathem. Problems Eng.*, 2020, No. s2. — P. 1–16.
9. ОСТ 12.44.258-84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. — М.: Изд-во Министерства угольной промышленности СССР, 1985. — 108 с.
10. Аверин Е. А., Жабин А. Б., Поляков А. В., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Влияние выхода из строя режущего инструмента на режимные параметры резания горных пород // ФТПРПИ. — 2021. — № 5. — С. 114–124.

11. **Жабин А. Б., Чеботарев П. Н., Лавит И. М., Поляков А. В.** Методика определения нагруженности резцов и расходуемой мощности при разрушении угля и их расчет для проходческого комбайна // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2017. — № 3. — С. 135–148.
12. **ГОСТ Р 50703-2002.** Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Общие технические требования и методы испытаний. — М.: Госстандарт России, 2002. — 33 с.
13. **Барон Л. И., Хмельковский И. Е.** Разрушаемость горных пород свободным ударом. — М.: Наука, 1971. — 203 с.
14. **Нескоромных В. В., Чихоткин А. В.** Аналитическое исследование механики разрушения горных пород резцами PDC с учетом динамических процессов резания-скалывания горной породы и сопротивления среды // ГИАБ. — 2020. — № 4. — С. 127–136.
15. **Saksala T.** 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiple-button bit, Int. J. Numerical Analytical Methods Geomech., 2013, Vol. 37. — P. 308–324.
16. **Винокуров В. Р.** Применение мельницы сухого многократного ударного действия при измельчении золотосодержащих руд месторождения “Малый Тарын” // ГИАБ. — 2021. — № 12-1. — С. 48–58.
17. **Позин Е. З., Меламед В. З., Азовцева С. М.** Измельчение углей при резании. — М.: Наука, 1977. — 138 с.
18. **Жунхуань Ц., Ишань П., Юнхуэй С., Фэйюй Л.** Влияние скорости нагружения и относительного коэффициента прочности угольно-породного образца на его механические свойства // ФТПРПИ. — 2024. — № 2S. — С. 26–39.

Поступила в редакцию 26/I 2025

После доработки 25/IV 2025

Принята к публикации 16/V 2025