

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.23.054.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ИНЕРЦИОННО-УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Е. Г. Куликова^{1,2}, С. Я. Левенсон¹, А. В. Морозов¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: shevchyk@ngs.ru, Красный проспект, 54, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет

E-mail: e.kulikova@corp.nstu.ru, ул. Немировича-Данченко, 136, г. Новосибирск, Россия

Приведено краткое описание особенностей инерционно-ударного метода разрушения геоматериалов молотковым ротором. Представлены возможности его применения для бурения скважин большого диаметра при подземной разработке горных пород. Описана методика проведения и результаты лабораторных исследований влияния различных сочетаний скоростей вращения молоткового ротора и линейного перемещения относительно разрушаемой поверхности на силу электрического тока, потребляемого отдельными механизмами рабочего оборудования, а также на возникающую в ударном режиме скорость вибрации поддерживающих элементов ротора. Определены рациональные диапазоны этих скоростей, в которых процесс разрушения происходит с наименьшими затратами энергии и динамическим воздействием на конструкцию рабочего оборудования.

Инерционный удар, частота вращения молоткового ротора, подача на молоток, потребляемый электрический ток, скорость вибрации поддерживающих элементов

DOI: 10.15372/FTPRPI20240406

EDN: DAJXKS

Разработка скальных пород выполняется с наименьшими затратами энергии при отделении от массива стружек малой толщины в процессе послойного фрезерования [1 – 18]. Однако из-за высоких сопротивлений, действующих со стороны разрушаемого материала, применение такого способа ограничено.

В ИГД СО РАН предложен инерционно-ударный метод разрушения, основанный на преобразовании кинетической энергии ударных элементов (молотков) в энергию удара, и оборудование для его реализации, основой которого является молотковый ротор [19 – 22]. Особенностью этого оборудования является то, что молотки закрепляются на осях ротора с возможностью проворота. При вращении ротора под действием центробежной силы они накапливают кинетическую энергию и располагаются по радиусу. В момент удара энергия молотка распределяется между ним и разрушаемой поверхностью, приводя к образованию трещины в геоматериале. Реактивная энергия из области контакта в большей степени тратится на отклонение молотка относительно оси его закрепления и в меньшей степени передается на поддерживаю-

щие элементы рабочего оборудования. Отклоненные молотки испытывают меньшее лобовое сопротивление при движении вдоль разрушаемой поверхности. Таким образом, использование инерционно-ударного воздействия вместо фрезерования позволяет заменить статическое резание на удар и снизить передачу реактивных сил из области контакта на его соединительные узлы, обеспечивая их прочность и долговечность.

Предлагаемый метод разрушения успешно апробирован при разработке относительно мягких пород и удалении различных твердых покрытий малой толщины [23]. На основе полученных результатов исследований создан ряд машин, предназначенных для использования при открытой добыче полезных ископаемых [19, 21]. Также предложено оборудование для образования скважин большого диаметра (до 6 м) при подземной разработке горных пород [20].

Основой конструкции рабочего оборудования всех реализаций является молотковый ротор 1 (рис. 1), состоящий из отдельных секций, собранных вместе с помощью центрирующих втулок. Каждая секция представляет собой ступицу 2 со смонтированными на ее осях 3 свободно качающимися молотками 4. Она установлена с разворотом относительно соседних секций на угол, равный половине угла между ее молотками. Ступица 2 выполнена с ограничителями 5, обеспечивающими во время вращения расположение молотков по радиусу ступицы под действием центробежной силы.

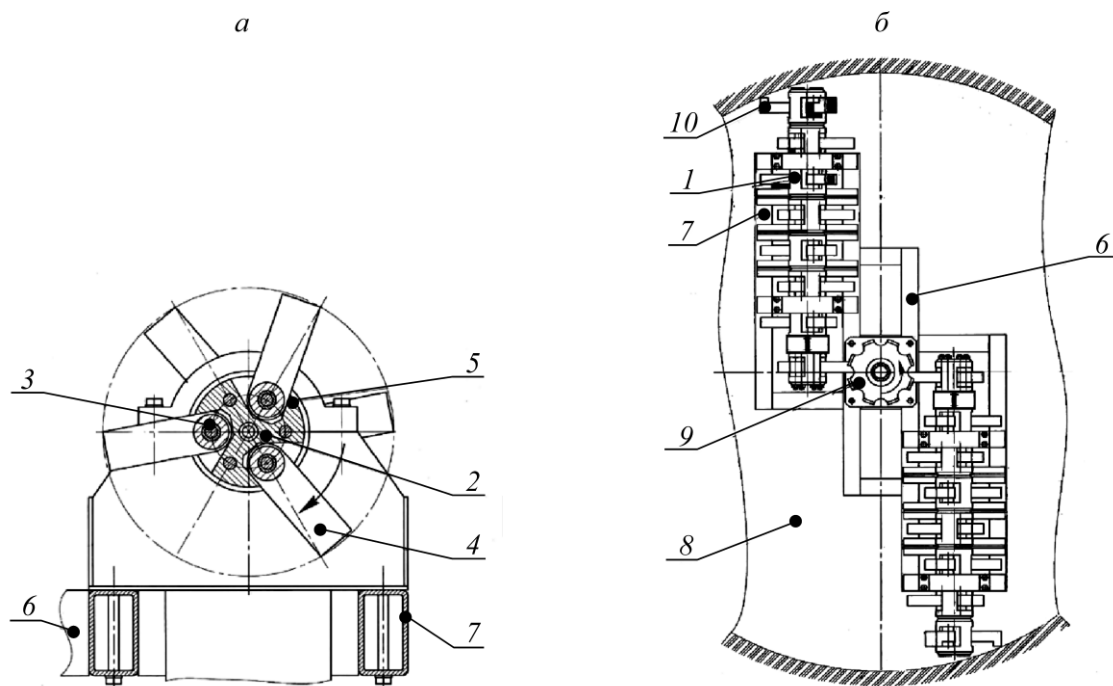


Рис. 1. Основная конструкция инерционно-ударного оборудования (а) и устройство для создания скважин большого диаметра (б): 1 — молотковый ротор; 2 — ступица; 3 — ось; 4, 10 — молоток; 5 — ограничитель; 6 — рама; 7 — консоль; 8 — скважина, 9 — приводной вал

В более сложных механизмах, например в оборудовании для создания скважин большого диаметра, предлагается использовать не один молотковый ротор, а несколько с возможностью консольного закрепления на общей раме 6 (рис. 1б). Консоли 7 должны быть смещены параллельно радиусу сооружаемой скважины 8 в плоскости, нормальной к оси полого приводного вала 9 механизма подачи, а концевые молотки 10 выполняются г-образными. Это обеспечит беспрепятственное формирование боковой поверхности скважины при движении оборудования вдоль пилотной скважины и разрушении ее боковых поверхностей. При этом выступающие элементы отдельных секций не соприкасаются с забоем и не препятствуют отбойке горной

массы. Привод рассматриваемого оборудования предусматривает одновременное выполнение вертикального движения роторов вдоль пилотной скважины и подачи их на забой, вращения молотков относительно продольных осей роторов и разрушения горной породы, а также вращения общей рамы b вокруг оси ее приводного вала для обкатки и формирования стенок скважины.

ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Учитывая, что каждая выполняемая операция (оборка откоса карьера, создание скважины и т. д.) имеет свои специфические условия проведения, в первую очередь определяемые крепостью разрабатываемой породы, необходимо установить рациональные режимы работы оборудования, обеспечивающие наибольшую эффективность его использования. С этой целью проведена серия экспериментальных исследований динамики системы “инерционно-ударный рабочий орган — разрушаемый массив”, с помощью которых решались следующие задачи:

— исследование влияния частоты вращения молоткового ротора и скорости его линейного перемещения относительно разрушаемой поверхности на потребление электрической энергии отдельными приводами и передачу реакционных сил на поддерживающие элементы;

— определение рациональных диапазонов параметров, обеспечивающих наибольшую производительность разрушения при минимальных затратах энергии и динамическом воздействии на рабочее оборудование.

Экспериментальные исследования выполнялись методом физического моделирования с использованием стенда [23], элементы которого позволяли имитировать различные условия работы вращающегося молоткового ротора при его линейном перемещении относительно обрабатываемой поверхности. Для снижения энергоемкости проводимых работ и предотвращения преждевременного износа молотков в качестве разрушаемых материалов использовались образцы, изготовленные на основе смеси цемента и песка в массовом отношении 1:6 ($\sigma_{сж} = 9.5$ МПа) и 1:4 ($\sigma_{сж} = 14.6$ МПа) и при затвердевании имеющие коэффициенты крепости по Протоdjяконову, равные 1.0 и 1.5 соответственно.

Ротор представлял собой многодисковый барабан, на осях которого шарнирно подвешивались молотки из стали Hardox (твердость 500 НВ), имеющие габаритные размеры $170 \times 52 \times 20$ мм и форму ударной поверхности (рис. 2б) [24], в соответствии с которой на боковых поверхностях молотка выполнены вырезы, заостряющие угол между его гранями. В процессе исследований ударные элементы закреплялись в один диаметральный ряд в количестве 6, 3 или 2 штук.

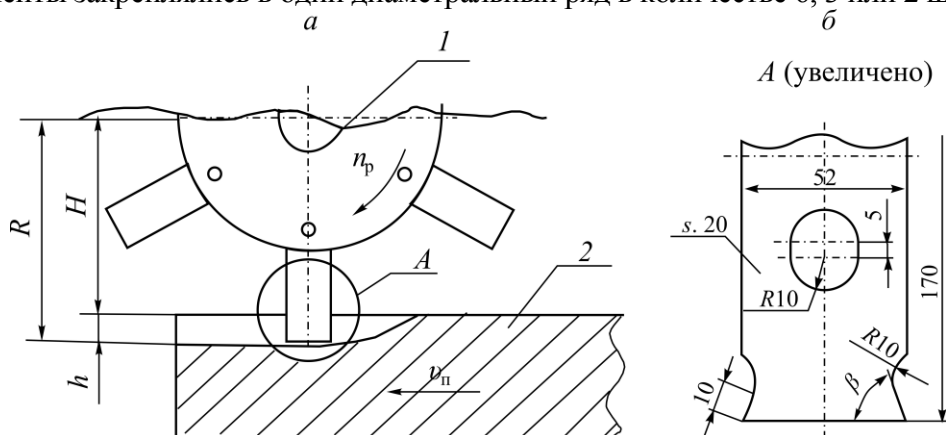


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: a — схема контакта; b — исследуемый тип ударных элементов; 1 — молотковый ротор; 2 — образец разрушаемого материала; n_p — частота вращения ротора; v_n — скорость подачи образца; H — расстояние от оси ротора до разрушаемой поверхности; h — глубина отбивки; R , β — радиус ударной поверхности и угол заострения молотка соответственно

Для удобства проведения экспериментов линейное перемещение вращающегося ротора относительно разрушаемой поверхности заменялось поступательным движением образца материала относительно вращающегося ротора с неподвижной продольной осью с сохранением условий взаимодействия молотков с материалом.

Предполагаемая максимальная глубина отбойки h за один проход образца изменялась за счет фиксации оси ротора на определенном расстоянии H (рис. 2а) относительно разрушаемой поверхности и составляла 11 % (h_1) или 23 % (h_2) от радиуса вращения ударных поверхностей молотков R .

Рассмотрены два варианта движения: попутное, при котором направление окружной скорости молотков совпадало с направлением подачи образца материала (рис. 2а), и встречное (противоположное).

С помощью преобразователей частоты ESQ800-4T0007 частота вращения ротора n_r устанавливалась равной 16, 10 или 3 об/с, а скорость подачи материала v_n — 4.8; 6.3 или 7.7 мм/с. В исследованиях рассматривались различные сочетания n_r и v_n .

Для оценки влияния этих параметров на производительность и энергоемкость отбойки принята комплексная характеристика — подача на каждый молоток s , мм/мол.:

$$s = \frac{v_n}{n_p z},$$

где z — число молотков, закрепленных в одной диаметральной плоскости ротора.

Затраты энергии на разрушение единичного образца материала E_Σ определяются затратами энергии, потребляемой из электрической сети на привод рабочего оборудования (механизмов вращения ротора и подачи).

Предполагая, что напряжение в электрической сети постоянно во времени, потребление электрической энергии оценивалось опосредованно по изменению силы тока $I_{вр}$ и $I_{под}$ в обмотках электродвигателей привода вращения молоткового ротора и подачи образца материала соответственно. Для получения удельных затрат эти величины отнесены к производительности разрушения Π ($I_{вр} / \Pi$ и $I_{под} / \Pi$).

Сила тока фиксировалась датчиками тока, преобразовывалась цифровым запоминающим осциллографом АКИП–72203 и передавалась на персональный компьютер.

Производительность разрушения определялась шириной b , глубиной h отбойки и скоростью ее формирования:

$$\Pi = 3600bhv_n.$$

Оценка передачи реакционного воздействия из области разрушения на центральном поддерживающем элементе ротора осуществлялась за счет измерения параметров его вибрации. Для этого использовались пьезоэлектрический акселерометр, усилитель заряда типа 2635 (Brueel & Kjaer, Дания), аналого-цифровой преобразователь Е-440 (ЗАО Л-Кард, Россия) и ЭВМ. Результаты предварительных исследований показали, что исследуемые колебания носят полигармонический характер (рис. 3), а их частотный спектр определяется скоростями работы механизмов стенда и крепостью разрушаемого материала. В этой связи в качестве фиксируемого параметра принят размах вибрационной скорости v_k поддерживающего элемента ($v_{\max} - v_{\min}$), позволяющий комплексно оценить влияние частоты и амплитуды виброперемещения, присутствующих в спектре колебаний.

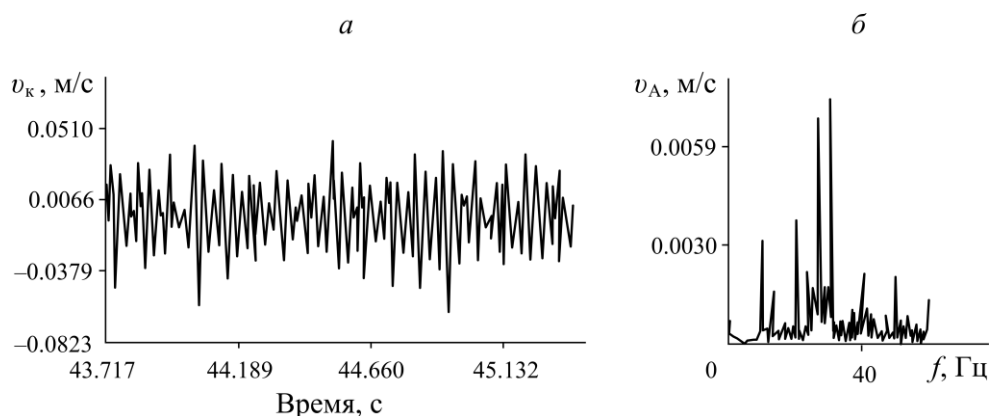


Рис. 3. Результаты измерения виброскорости поддерживающего элемента молоткового ротора: *а* — участок осциллограммы; *б* — его амплитудный спектр

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показали, что при работе на низкой подаче ($s < 0.20$ мм/мол.) и попутном направлении движения образца материала и ротора основное влияние на удельное потребление электрического тока молотковым ротором оказывает высота его расположения относительно разрушаемой поверхности и соответствующая ей максимальная глубина отбойки (рис. 4, участок *АВ*). При разрушении материалов в исследуемом диапазоне крепости увеличение h в 2 раза приводит к снижению показателя $I_{вр} / \Pi$ в 1.8 – 2.0 раза.

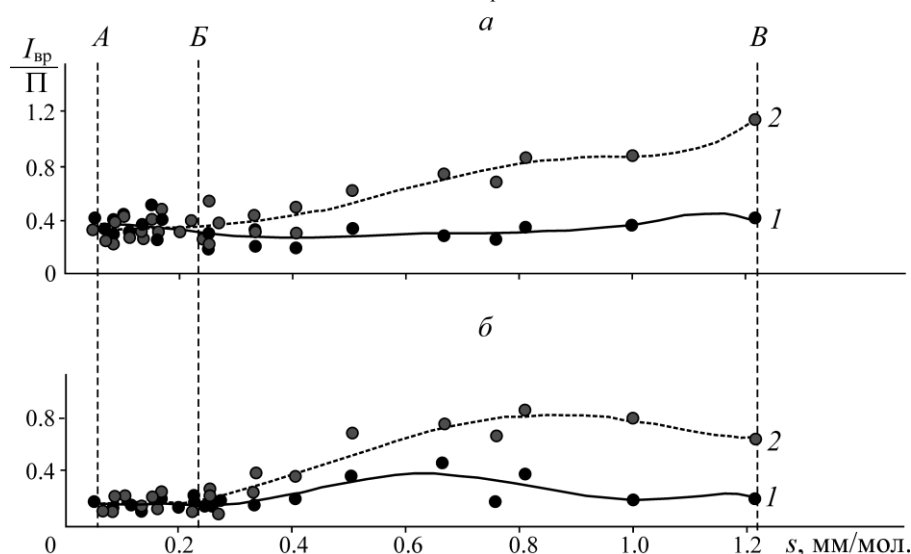


Рис. 4. Зависимость удельного потребления электрического тока в обмотке электродвигателя привода вращения молоткового ротора от подачи на молоток при максимально возможной глубине отбойки: *а* — h_1 ; *б* — h_2 ; крепость разрушаемого материала: 1 — 1.0; 2 — 1.5

С дальнейшим увеличением подачи на каждый молоток (рис. 4, участки *БВ*) влияние крепости разрушаемого материала на $I_{вр} / \Pi$ усиливается. Разрушение более мягкого материала при глубине h_1 происходило практически с постоянным потреблением электрического тока ($I_{вр} / \Pi = 0.20 - 0.35$). При глубине h_2 значение исследуемого параметра $I_{вр} / \Pi$ не превышало 0.45. Разрушение материала крепостью 1.5 потребовало увеличения энергетических затрат, характеризуемых ростом $I_{вр} / \Pi$ при h_1 в 2–3 раза, при h_2 в 3–4 раза.

Практически такой же характер изменения удельного потребления электрического тока наблюдается в приводе механизма подачи образца. В диапазоне $s=0.05-0.30$ $I_{\text{под}}/П$ составляет не более 0.08 при максимальной возможной глубине отбойки h_1 (рис. 5а участок АВ) и не более 0.05 — при h_2 (рис. 5б участок АВ).

Дальнейшее увеличение подачи на молоток до 1.22 мм/мол. (рис. 5, участок ВВ) приводит к росту удельного потребления электрического тока в 2.0–3.0 раза, а повышение крепости материала до 1.5 — к дополнительному увеличению $I_{\text{под}}/П$ в 2.2–3.0.

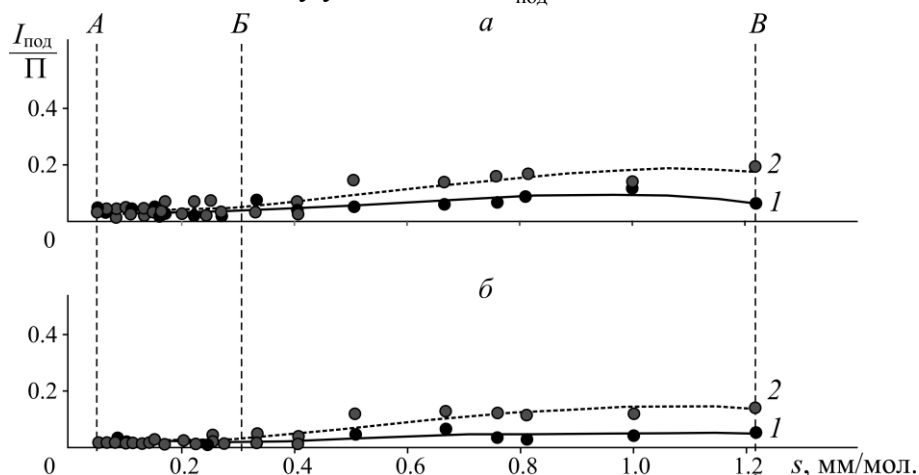


Рис. 5. Зависимость удельного потребления электрического тока в обмотке электродвигателя механизма подачи образца материала от подачи на молоток: максимальная возможная глубина отбойки: а — h_1 ; б — h_2 ; крепость разрушаемого материала: 1 — 1.0; 2 — 1.5

Основные затраты энергии приходятся на процесс разрушения и перемещение молотков по разрушенной поверхности, поэтому привод механизма вращения молоткового ротора требует больших затрат электрического тока. В соответствии с приведенными данными максимальное превышение $I_{\text{вр}}/П$ над $I_{\text{под}}/П$ достигает 15...17 раз при разрушении материала крепостью 1.0 и 13...20 раз при разрушении материала крепостью 1.5 в условиях одинаковой максимальной глубины отбойки.

Изменение направления вращения ротора на встречное для отбойки материала крепостью 1.0 максимальной глубины h_1 с подачей на молоток менее 0.4 мм/мол. практически не сказалось на удельном потреблении электрического тока. Однако углубление до h_2 приводит к тому, что увеличивается площадь поверхности отдельного молотка, контактирующего с разрушающим материалом при ударе и перемещении по ранее отбитой поверхности образца (рис. 2а). Это увеличивает сопротивления и ухудшает условия движения, повышая затраты энергии на работу механизма вращения ротора. Результатом стала перегрузка электрической сети, приводящая к срабатыванию предохранительных элементов. При встречном движении ротора и образца материала подача на молоток имела значение не более $s=0.42$ мм/мол., а глубина отбойки — h_1 , что значительно ограничивает производительность процесса разрушения.

Результаты измерения параметров вибрации показали: чем больше молотков использовалось, тем равномернее передавались реакционные нагрузки из области нанесения удара на ротор и его поддерживающие элементы. При этом исследуемая скорость вибрации определялась не только подачей на молоток, но и непосредственно частотой вращения молоткового ротора (рис. 6). Спектр частот колебаний, зафиксированных в ударном режиме, включал в себя диапазон от 20 до 60 Гц в зависимости от условий конкретного эксперимента.

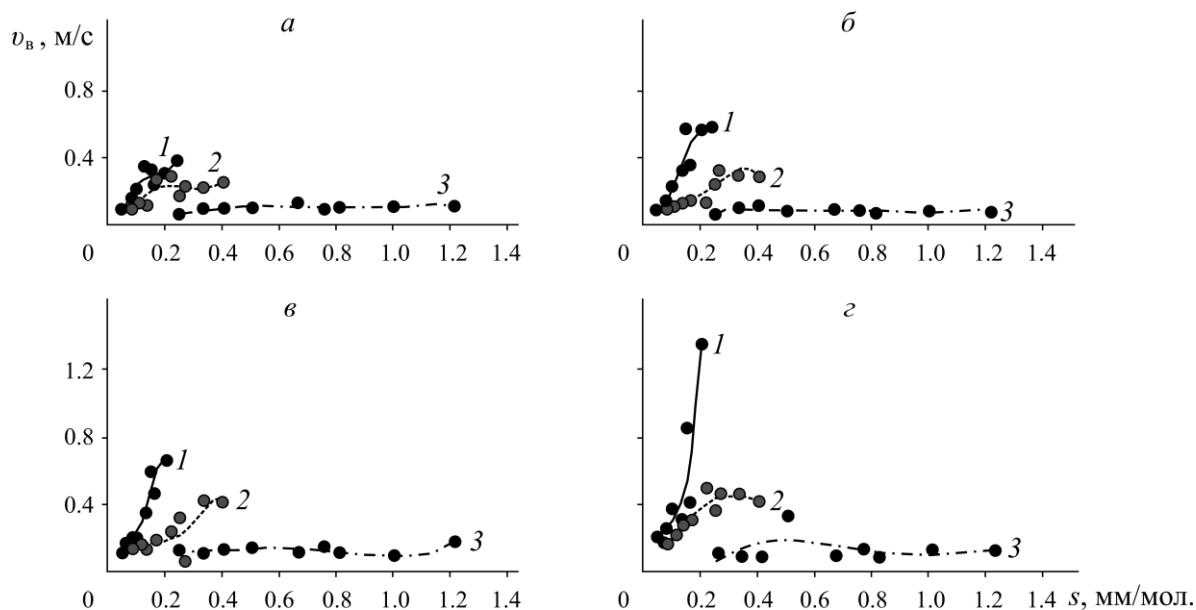


Рис. 6. Зависимость вибрационной скорости поддерживающего элемента молоткового ротора от подачи на молоток: максимальная возможная глубина отбойки: *a*, *б* — h_1 ; *в*, *г* — h_2 ; крепость разрушаемого материала: *a*, *в* — 1.0; *б*, *г* — 1.5; частота вращения ротора, об/с: 1 — 16; 2 — 10; 3 — 3

Разрушение материалов с подачей на молоток $s = 0.05 - 0.41$ мм/мол. и попутным вращением ротора на глубину h_1 сопровождалось колебаниями с размахом скорости не более 0.15 м/с и амплитудой перемещения — 0.22–0.26 мм. Изменение направления вращения при всех остальных неизменных параметрах эксперимента привело к росту амплитуды колебаний в 4.2–5.0 раз. Снижение высоты расположения молоткового ротора относительно обрабатываемой поверхности с соответствующим максимальным углублением отбойки до h_2 и при той же подаче на молоток приводит к росту скорости вибрации в 1.1–1.8 раза для образцов материала с меньшей крепостью и в 1.1–2.2 раза — для образцов с большей крепостью при попутном направлении вращения ротора. При встречном вращении наблюдалась не только перегрузка электрической сети, но и рост скорости вибрации до 2 м/с (амплитуда перемещения 3.6 мм при несущей частоте 44 Гц), что в 5 раз выше, чем при попутном вращении.

С дальнейшим повышением подачи на молоток интенсивность увеличения виброскорости на поддерживающем элементе ротора определяется частотой вращения молотков (рис. 6). Если при $n_p = 3$ об/с виброскорость практически не меняется в диапазоне s от 0.3 до 1.2 и не зависит от крепости материала и глубины отбойки, то при частоте 16 об/с рост подачи на молоток до 0.41 мм/мол. уже приводит к резкому увеличению виброскорости. Процесс разрушения материала крепостью 1 на глубину отбойки h_1 сопровождается ростом v_B в 3.8–4.0 раза (рис. 6*a*, кривая 1). Углубление до h_2 приводит к дополнительному усилению колебаний в 1.5 раза для менее крепких образцов (рис. 6*a* и *в*, кривая 1) и в 2.3 раза — для более крепких (рис. 6*б* и рис. 10*г*, кривая 1).

ВЫВОДЫ

По сравнению со статическими методами инерционно-ударное воздействие на горный массив, реализуемое молотковым оборудованием, позволяет снизить передачу реактивного воздействия из области контакта молотков с разрушаемым материалом на металлоконструкцию

рабочего органа. Эффективность его применения связана с установлением режимов работы, включающих в себя частоту и направление вращения молоткового ротора, а также скорость его линейного перемещения относительно обрабатываемой поверхности.

Для материалов крепостью 1.0–1.5 по Протодюкову установлено, что с целью снижения передачи реакционного воздействия на поддерживающие элементы молоткового ротора, необходимо ограничить скорость его вращения n_r значением 3.0–3.5 об/с, а скорость линейного перемещения v_n принять из условия обеспечения подачи на каждый молоток 0.05–0.40 мм/мол. с учетом количества ударных элементов. Работа с большей подачей на материалах крепостью более 1.0 приводит к росту затрат энергии в 2–4 раза и уровня вибрации поддерживающей конструкции в 4–7 раз в зависимости от крепости материала.

Для создания наилучших условий работы молотков вращение ротора предпочтительно осуществлять в направлении его поступательного движения относительно обрабатываемой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герике П. Б. Разрушение горных пород дисковым инструментом машин для послойного фрезерования: автореф. дис. канд. техн. наук. — Кемерово, 2005. — 20 с.
2. Пат. RU2278266C2. Режущий барабан для карьерной добычной машины непрерывного действия / А. Элер, Г. Кунце, Ф. Шрадер, Б. Петак, К. Поттенберг // Оpubл. в БИ. — 2006. — № 17.
3. Пат. RU2539479C1. Способ разработки сложноструктурного месторождения и рабочий орган для осуществления способа / А. Ю. Чебан, С. А. Шемякин, Н. П. Хрунина // Оpubл. в БИ. — 2015. — № 2.
4. Пихлер М., Журавлев А. А., Панкевич Ю. Б., Панкевич М. Ю. Результаты опытно-промышленных работ по тонкослойной разработке комбайном Wirtgen 2200SM строительных известняков Пятовского месторождения // Горн. пром-сть. — 2009. — № 1(83). — С. 16–20.
5. Федорко Н. П., Федорко П. В., Тальгаммер Б. Л. Рациональное использование комбайна Wirtgen 2200SM для разработки сложноструктурных угольных пластов // ГИАБ. — 2015. — № S1-2. — С. 52–57.
6. Иванов В. В. Технология ведения добычных работ на сложноструктурных пластовых месторождениях полускальных горных пород // Апробация. — 2013. — № 3(6). — С. 50–51.
7. Чебан А. Ю. Способ подготовки к выемке сезонно промерзших уступов и оборудование для его осуществления // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2019. — Т. 17. — № 2. — С. 11–16.
8. Швабенланд Е. Е., Соколовский А. В., Пихлер М. Выбор параметров послойно-порционной технологии при разработке сложноструктурных месторождений комбайнами фрезерного типа // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2016. — Т. 14. — № 1. — С. 5–12.
9. Чебан А. Ю. Техника для выемки крутопадающих рудных тел и технология данного процесса // Изв. Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. — 2018. — Т. 41. — № 4 (65). — С. 89–96.
10. Якубовский М. М., Михайлова Е. А., Бажуков А. А. Обоснование эффективности применения фрезерных комбайнов селективной выемки для разработки угольных месторождений в условиях низких температур // ГИАБ. — 2021. — № 10. — С. 42–57.
11. Фомин С. И., Лелен А. Обоснование параметров эксплуатационного блока при разработке месторождений цементного сырья комбайнами послойного фрезерования // Рациональное освоение недр. — 2022. — № 3(65). — С. 20–25.

12. Кумар Ч., Мурти В. М. С. Р., Кумарасвамидхас Л. А., Пракаш А. Методология проектирования фрезерного барабана и выбор оптимальных эксплуатационных параметров карьерного комбайна в различных горно-геологических условиях // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 60–69.
13. Чебан А. Ю. Совершенствование технологии открытой разработки рудных месторождений с применением добычных комплексов // Флагман науки. — 2023. — № 10. — С. 189–191.
14. Hermann-Josef Volk. Wirtgen drives the development of surface mining, Proc. Eng., 2016, Vol. 138. — P. 30–39.
15. Amar Prakash, Vemavarapu Mallika Sita Ramachandra Murthy, and Kalendra Bahadur Singh. A new rock cuttability index for predicting key performance indicators of surface miners, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2015, Vol. 77. — P. 339–347.
16. Alessandro Medolago, Stefano Melzi. A flexible multi-body model of a surface miner for analyzing the interaction between rock-cutting forces and chassis vibrations, Int. J. Min. Sci. Technol., 2021, Vol. 31, Issue 3. — P. 365–375.
17. Kumar C., Kumaraswamidhas L. A., Murthy V. M. S. R., and Prakash A. Experimental investigations on thermal behavior during pick-rock interaction and optimization of operating parameters of surface miner, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2020, Vol. 133.
18. Stephan Oppelaar and Jim Hutchins. Recent advances in precision surface mining techniques, Proc. Eng., 2014, Vol. 83. — P. 76–85.
19. Патент RU2618806C1. Устройство для отработки откосов уступов / С. Я. Левенсон, В. А. Голдобин, М. А. Ланцевич, Л. И. Гендлина, В. М. Усольцев, А. В. Морозов, А. Н. Акишев; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН, № 2016100405; заявл. 11.01.2016 // Оpubл. в БИ. — 2016. — № 14.
20. Патент RU2762658C1. Устройство для сооружения скважин большого диаметра / М. А. Ланцевич, С. Я. Левенсон, А. Б. Фокин; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН, № 2021119673; заявл. 06.07.2021 // Оpubл. в БИ. — 2021. — № 36.
21. Патент RU2756889C1. Навесное оборудование гидравлического экскаватора для оборки откосов уступов / М. А. Ланцевич, С. Я. Левенсон, А. Б. Фокин; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН, № 2020141013; заявл. 14.12.2020 // Оpubл. в БИ. — 2021. — № 28.
22. Левенсон С. Я., Ланцевич М. А., Гендлина Л. И., Акишев А. Н. Новая технология и оборудование для безвзрывного формирования рабочей зоны глубоких карьеров // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 125–132.
23. Куликова Е. Г., Морозов А. В. Результаты апробации инерционно-ударного метода разрушения горных пород // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — Новокузнецк, 2022. — № 8 — С. 142–147.
24. Куликова Е. Г., Левенсон С. Я., Морозов А. В. Обоснование формы ударных элементов молоткового ротора инерционно-ударного действия // ФТПРПИ. — 2023. — № 3. — С. 96–107.

Поступила в редакцию 14/III 2024

После доработки 16/V 2024

Принята к публикации 27/VI 2024