

УДК 622.232.072:622.023.2

Б. Л. Герике, А. Б. Логов, П. Б. Герике

СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИСКОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Предварительные замечания

При проведении стендовых исследований режимов работы дискового инструмента возможно возникновение случайных и систематических ошибок [4].

Для определения величины погрешности, вызываемой случайными компонентами, и исключения её из результата эксперимента, Р. Дж. Моффет [6] предлагает использовать оценку

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right]^2 \right\}^{0.5} \quad (1)$$

где

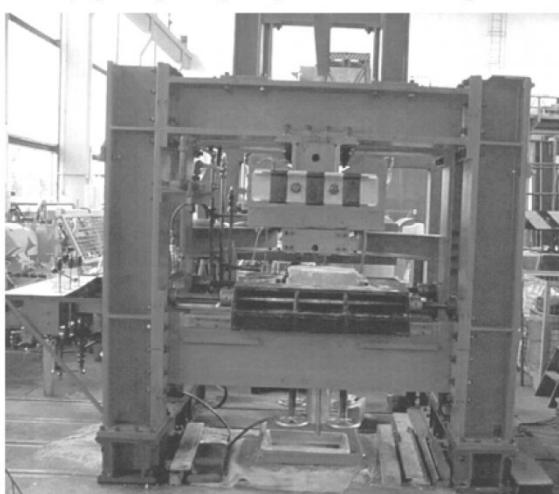
$$\frac{\partial R}{\partial x_i} = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{R_{x_i + \Delta x_i} - R_{x_i}}{\Delta x_i} \quad - \text{коэффициент}$$

чувствительности по параметру x_i ;

δx_i - абсолютная погрешность по x_i ;

δR . - абсолютная погрешность результата эксперимента.

Природа систематической ошибки более проста и объясняется наличием внешних (неучитываемых) факторов при проведении эксперимента,



Rис.1. Испытательный стенд «Heinz»

например, износом режущей кромки. Для исключения систематических ошибок используем рандомизированный план, который позволит систематическое завышение нагрузки вследствие износа лезвия диска равномерно распределить по всему полю, занятому экспериментальными данными. Рандомизация эксперимента и выбор числа промежуточных опытов между репликами осуществлялись с использованием «генератора псевдо-

случайных величин» с равномерным законом распределения.

С увеличением числа опытов при одном уровне режимных параметров растет точность и достоверность получаемого результата [4]. Однако с ростом числа наблюдений возрастает и время, а, следовательно, и стоимость экспериментальной части работы. Поэтому, с учетом класса точности измерительно-регистрирующей аппаратуры, а также погрешности, вносимой квантованием случайной функции, количество реплик было принято равным четырем.

Устройство стендов и методика лабораторных исследований

Проектирование исполнительного органа добывающей поверхностью фрезы (ДПФ), оснащенного дисковым инструментом, способного разрушать массив крепких горных пород, требует проведения исследований для определения:

- рациональных параметров разрушения различных горных пород;

- нагрузок, возникающих при этом на инструменте.

Кроме этих основных задач отдельный интерес представляют исследования по определению:

- влияния геометрических параметров инструмента (диаметра, углов скальвания и притупления режущей кромки) на процесс разрушения;

- параметров модели взаимодействия дисков с разрушающей средой, пригодной как для моделирования процесса образования осколков, так и для анализа нагруженности приводов резания и подачи ДПФ при различных условиях эксплуатации.

Для решения этих задач был спроектирован и изготовлен стенд (рис. 1).

Блок разрушающейся породы устанавливается и закрепляется на рабочем столе, параметры разрушения при этом задаются перемещением стола в двух плоскостях относительно станины стендов.

Исследуемый инструмент крепится в тензометрической головке, перемещаемой вдоль стола с помощью гидроцилиндра. Скорость перемещения тензоголовки, а, следовательно, и скорость взаимодействия инструмента с разрушающим массивом, задается с помощью дросселя системы регулирования.

Тензометрическая головка предназначена для независимого измерения трех ортогональных составляющих реакции, возникающей на оси дискового инструмента при взаимодействии с разрушающим массивом. Такая схема измерения позво-

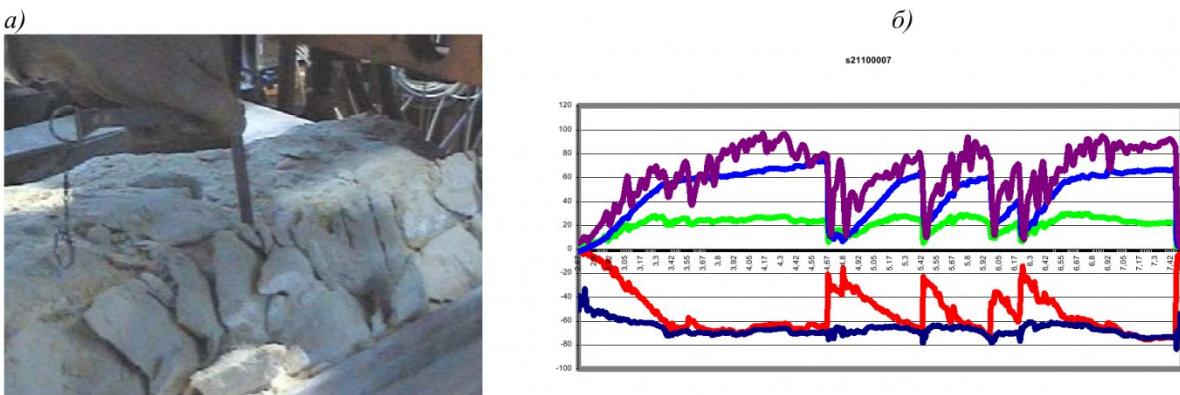


Рис. 2. Продукты разрушения и характер формирования нагрузки при свободном режиме разрушении песчаника

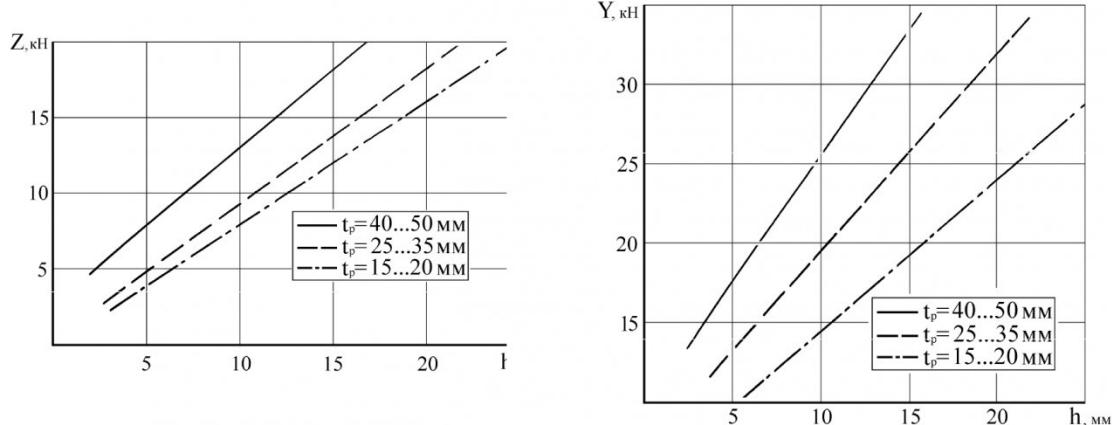


Рис. 3. Зависимость усилий перекатывания Z и внедрения Y от глубины резания

ляет оценить влияние геометрических параметров процесса разрушения на распределение нагрузки на лезвии дискового инструмента, что весьма важно для определения режима работы.

Калибровка тензометрического устройства производилась с использованием универсальной машины с пульсирующей нагрузкой ТМГ-500. Суммарная погрешность регистрации и интерпретации данных, определенная по выражению (1), не превышает по амплитуде 8%, а по частоте – 10% в низкочастотной (< 25 Гц) области.

Для сопоставления величины и характера нагрузки, формирующейся на инструменте, с характеристиками процесса разрушения (траектория скола, характерный размер отделившегося куска и т.п.) необходимо знание изменения параметров импульса разрушающего усилия не только во временной форме, но и в функции перемещения. Измерение координаты положения дискового инструмента относительно разрушаемого массива осуществляется датчиком смещений.

Для регистрации сигналов, формирующихся на оси дискового инструмента, а также величины давления в гидросистеме и величины перемещения оси использовался аналого-цифровой преобразователь и компьютер на базе процессора Р-IV с тактовой частотой 20 ГГц.

Для изучения процесса разрушения крепких

горных пород были изготовлены блоки, представляющие собой куски горной породы, специально обтесанные для удобства расположения и крепления их на столе стенда, которое производилось специальными стальными гидравлическими подушками, исполняющими роль гидравлических клиньев при распоре породного блока.

Лабораторные исследования проводились при разрушении песчаника и диорита, которые характеризуются следующими прочностными показателями (таблица):

Литотип	предел прочности при одноосном	
	сжатии σ_{ck}	растяжении σ_p
Песчаник	$61,0 \pm 6,7$ МПа	$5,5 \pm 3,3$ МПа
Диорит	$78,2 \pm 9,1$ МПа	$9,0 \pm 1,7$ МПа

Дисковый инструмент был изготовлен диаметром 180 и 220 мм. Угол скальвания был принят равным 30° , а угол притупления из условия создания необходимой прочности лезвия – 45° . Твердость HRc = 52...55.

В качестве оценки усилий внедрения Y , перекатывания Z и осевого X (при случайному нестационарному процессе формирования нагрузки в одиночном акте разрушения) принято их эффективное (действующее) значение [5]

$$F_e = \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} f^2(t) dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i^2, \quad (2)$$

отражающее энергетические затраты на разрушение (рис. 2б).

Для упорядочения экспериментального материала использовался аппарат регрессионного анализа [2]. Анализ качества аппроксимации показал, что погрешность не превышает 8% исходной величины.

Таким образом, применяемая аппаратура и алгоритмы статистической обработки вносят погрешность, искажающую реальные величины не более чем в 1,15...1,20 раза, что вполне удовлетворяет требованиям проведения экспериментальных исследований.

Когда сильно влияние дополнительной обнаженной поверхности, приводит к возникновению такого напряженного состояния массива, когда максимальная энтропия направлена в сторону дополнительной обнаженной поверхности. Разрушение в этом случае происходит за счёт отрыва и сдвига нагружаемого элемента.

Эффективное скальвание песчаника в сторону обнаженной поверхности удалось осуществить дисковым инструментом при изменении глубины внедрения от 5 до 20 мм и шага разрушения – от 10 до 50 мм. Зависимости усилия внедрения Y и перекатывания Z от геометрических параметров разрушения приведены на рис. 3-6.

Регрессионный анализ полигонов распределения показал, что изменение усилий внедрения и перекатывания с увеличением глубины внедрения

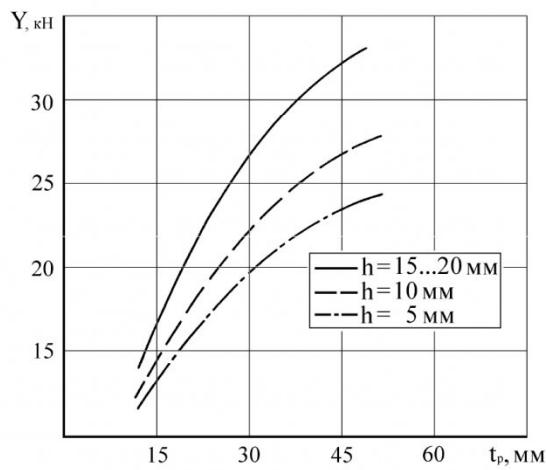
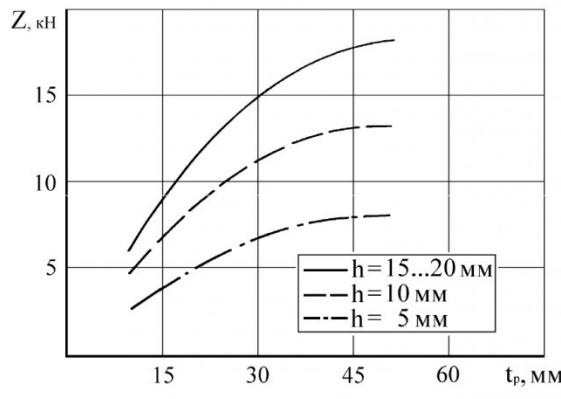


Рис. 4. Зависимость усилия перекатывания Z и внедрения Y от шага разрушения

Свободное резание

При внедрении дискового инструмента за счёт возникающего напряженно-деформированного состояния в массиве образуются микротрешины, сливающиеся в макротрещину в направлении максимальной энтропии энергии. Свободное резание, характеризующееся большими значениями глубины внедрения, сопоставимыми с шагом разрушения

подчиняется линейному закону для исследованного диапазона. Максимальные значения, зарегистрированные в эксперименте, составили для усилия внедрения 35 кН, а для усилия перекатывания - 25 кН при глубине внедрения 20 мм и шаге разрушения 50 мм. Отмечается большая интенсивность роста усилия внедрения Y по сравнению с компонентой Z , что связывается с неодинаковой скоро-

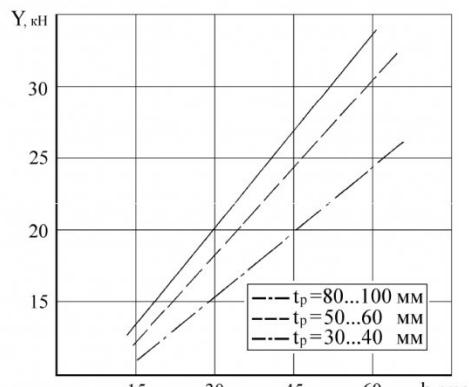
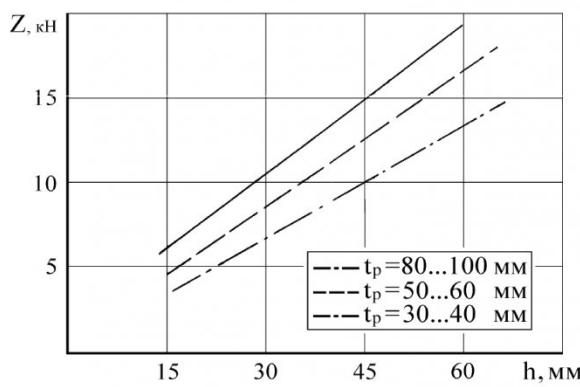


Рис. 5. Зависимость усилия перекатывания Z и внедрения Y от глубины разрушения при разрушении диорита

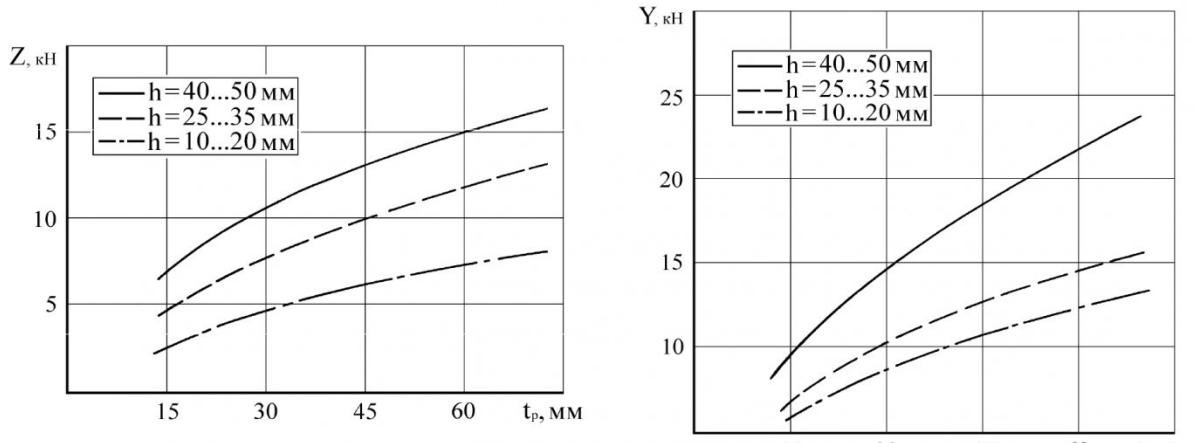


Рис. 6. Зависимость усилия перекатывания Z и внедрения Y от шага при разрушении диорита

стью приращения проекций площадок контакта с изменением величины внедрения инструмента в массив.

Зависимость компонент нагрузки на оси дискового инструмента от шага разрушения имеет нелинейный характер и хорошо аппроксимируется экспоненциальными кривыми вида

$$F(t_p) = a \cdot [1 - \exp(-bt_p)],$$

где a и b – произвольные постоянные.

Объясняется это тем, что при достижении шагом разрушения величины, при которой рез переходит в блокированный, дальнейший рост параметра t_p не приводит к увеличению нагрузки на инструменте, так как при этом на характер взаимодействия дискового инструмента с разрушающимся массивом перестает оказывать влияние дополнительная обнаженная поверхность от предыдущего реза. В режиме блокированного разрушения величина нагрузки на инструменте определяется только глубиной внедрения его в массив [1].

Разрушение диорита производилось только

поперёк слоистости, так как возникающие в этом режиме нагрузки достигают максимальных величин. Из-за отчетливо выраженной слоистости даже при небольшой глубине внедрения (до 5 мм) и большом шаге разрушения ($t_p = 80\ldots100$ мм) не удалось получить блокированного реза, так как всегда наблюдалось разрушение сдвигом по плоскостям скольжения.

Характер зависимостей усилий внедрения Y и перекатывания Z от геометрических параметров разрушения аналогичен закономерностям, проявившимся при разрушении песчаника (рис. 5 и 6).

Максимальные значения нагрузок, зарегистрированные в отдельных опытах, достигали значений 25 и 19 кН для усилий внедрения и перекатывания, соответственно, при шаге разрушения $t_p = 100$ мм и глубине внедрения $h = 60$ мм. Особенно эффективно скальвание диорита происходило при шаге разрушения $t_p = 60\ldots100$ мм и величине заглубления $h = 40\ldots60$ мм.

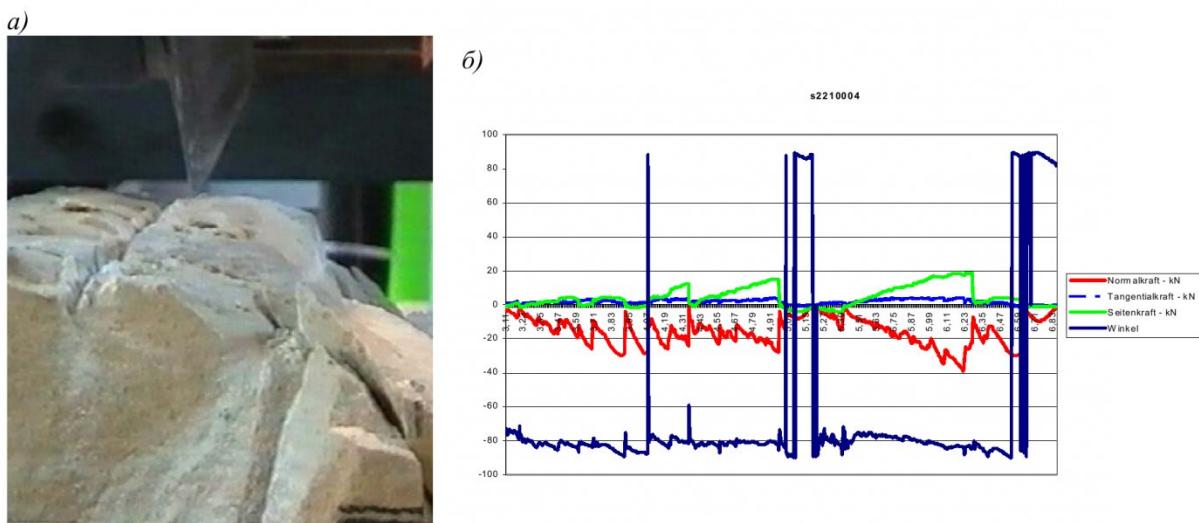


Рис. 7. Возникновение макротрешины в песчанике и характер нагрузки на оси диска после первого прохода

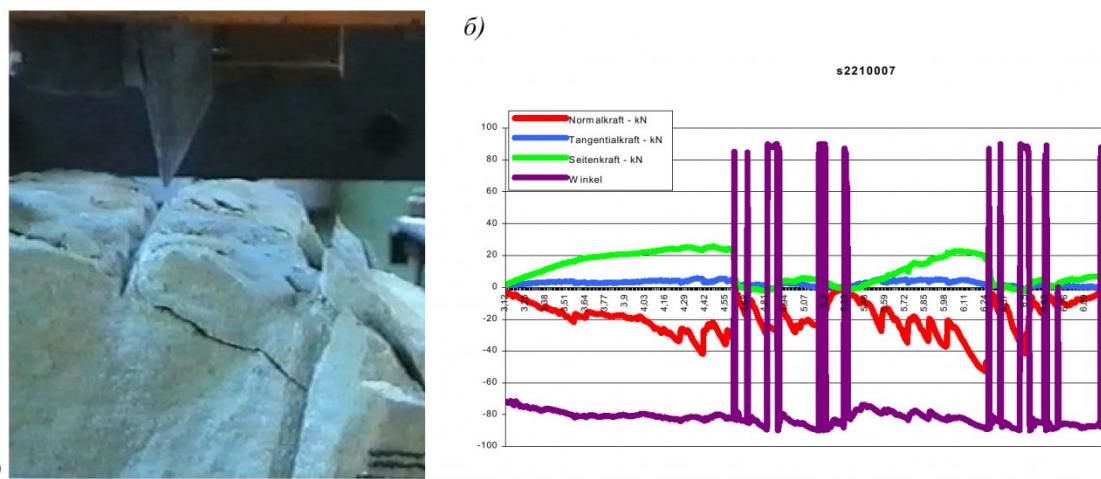


Рис. 8. Разрушение массива песчаника после третьего прохода диска и характер нагрузки на оси диска

Энергетическая оценка эффективности разрушения песчаника при реализации режима свободного скальвания в сторону обнаженной поверхности показывает, что:

-разрушение песчаника хотя и возможно, благодаря высокой хрупкости ($\chi = 0,09$), но только стружками малого сечения (до 10 см²) и при больших (до 11,5 кВт·час/м³) энергетических затратах;

-разрушение диорита с четко выраженной слоистой структурой является достаточно эффективным, о чём свидетельствуют относительно низкие энергетические затраты (1,5...4,0 кВт·час/м³) и большие величины снимаемой стружки.

Силовое малоцикловое разрушение

Эффективность режима силового малоциклового разрушения песчаника исследовалась с использованием дисков диаметром 180 и 220 мм. Геометрические параметры клина составляли: угол заострения равен 45° (из условия обеспечения необходимой прочности лезвия), угол скальвания принят равным 33°, а задний угол – 12°. Такое соотношение углов на клине обеспечивает

устойчивое движение инструмента в режиме силового малоциклового разрушения [3].

На рис. 7 показано возникновение макротрешины в массиве песчаника после первого прокатывания дискового инструмента (шаг разрушения 70 мм, глубина внедрения 5 мм). Направление возникающей макротрешины совпадает с направлением внедрения инструмента, глубина трещины незначительна, отделения элемента от массива ещё не произошло.

При повторном проходе дискового инструмента по старому следу с дополнительным за глублением (суммарная величина внедрения $h_{\Sigma} = 10$ мм) наблюдается быстрое прорастание трещины в направлении внедрения диска.

И, наконец, после третьего прохода с суммарной глубиной внедрения диска в разрушающий массив $h_{\Sigma} = 16$ мм произошло разрушение песчаника крупным сколом (рис. 8). Характер нагрузки, формирующейся при этом на оси диска, проиллюстрирован осциллограммой, приведенной на рис 8б.

Для оценки потребной нагрузки, необходимой для реализации режима силового малоциклового разрушения с шагом $t_p = 70$ мм и суммарной глу

Таблица 1

Статистические результаты обработки осциллограмм при силовом малоцикловом разрушении

Характеристика	1 проход			2 проход			3 проход			Суммарная нагрузка		
	Y, кН	Z, кН	X, кН	Y, кН	Z, кН	X, кН	Y, кН	Z, кН	X, кН	Y, кН	Z, кН	X, кН
Среднее значение	13,8	1,7	4,0	16,7	1,3	6,6	17,7	2,2	10			
Эффективное значение	16,6	2,2	7,3	20,3	1,8	8,6	21,1	2,8	13,7	33,7	4,0	17,7
Стандарт отклонения	9,2	1,4	6,1	11,4	1,3	5,6	11,5	1,8	9,3			
Коэффициент вариации	0,66	0,83	1,51	0,69	1,0	0,85	0,65	0,8	0,93			

биной внедрения $h_{\Sigma} = 16$ мм, воспользуемся выражением (2). Суммирование независимых компонентов нагрузки, полученных в различных опытах, произведем в соответствии с выражением

$$F_{e,\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^N F_{e,i}^2} \quad (3)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Если сравнить полученные результаты с данными, зафиксированными при свободном разрушении песчаника (рис. 2б и табл. 2), то нетрудно видеть, что силовое малоциклическое разрушение имеет существенные преимущества по энергозатратам.

Суммарные энергетические затраты при силовом малоциклическом разрушении, как следует из сравнения результатов, приведенных в табл. 2.1 и 2.2, меньше примерно в 5 раз необходимых для реализации режима свободного скальвания и составляют $H_w = 0,52$ кВт·час/м³. Таким образом, нетрудно видеть, что создание предварительного напряженно-деформированного состояния масси-

Таблица 2
Статистические результаты обработки осциллограмм при свободном разрушении песчаника

Характеристика	Y, кН	Z, кН	X, кН
Среднее значение	43,7	12,0	35,3
Эффективное значение	53,3	20,4	41,2
Стандарт отклонения	20,2	11,1	22,1
Коэффициент вариации	0,47	0,92	0,63

ва и использование его при повторном прокатывании дискового инструмента является более рациональным, с энергетической точки зрения, способом разрушения.

Исследование режима силового малоциклического разрушения проводилось с целью определения влияния конструкции дисков на эффективность процесса. По результатам серии опытов, проведённой при шаге разрушения $t_p = 70 \dots 80$ мм, построены регрессионные зависимости величины компонент нагрузки от суммарной глубины внедрения (рис. 9).

Как показали результаты стендовых исследований «катастрофическое» разрушение происходило при суммарной глубине внедрения $h_{\Sigma} = 15 \dots 20$ мм за 2...4 прохода инструмента. Максимальные значения нагрузок, возникающих за один проход инструмента, не превышали 41 и 4 кН для усилий внедрения и перекатывания. Трещина разрушения во всех опытах достигала основания блока и происходило отделение элементов с размерами $1,0 \times 0,08 \times 0,4$ м³.

Поскольку в процессе силового малоциклического разрушения песчаника размеры отделившихся кусков определяются не только параметрами резания, сколько габаритами разрушаемого блока, наличием и направлением естественных трещин, границ раздела, плоскостей скольжения и прочих текстурных неоднородностей, не удалось систематизировать данные для получения зависимостей потребных энергетических затрат от параметров разрушения. Однако оценка энергоёмкости процесса силового малоциклического разрушения песчаника для всей совокупности опытов даёт величины $H_w = 0,37 \dots 0,71$ кВт·час/м³.

Экспериментальные исследования позволили выяснить, что количество повторных проходов и величина заглубления за один проход не оказывают существенного влияния на момент возникновения катастрофического разрушения. Количественной мерой, характеризующей начало катастрофического разрушения, может служить параметр $v^* = t_p / h^*$ (h^* - критическая величина суммарной глубины внедрения, после достижения которой происходит отделение крупного элемента

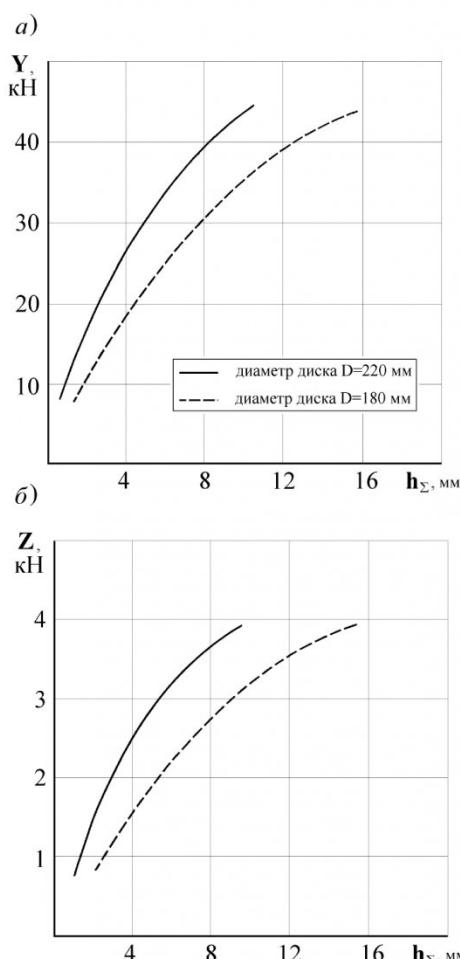


Рис. 9. Зависимости усилия внедрения (а) и перекатывания (б) от суммарной величины заглубления

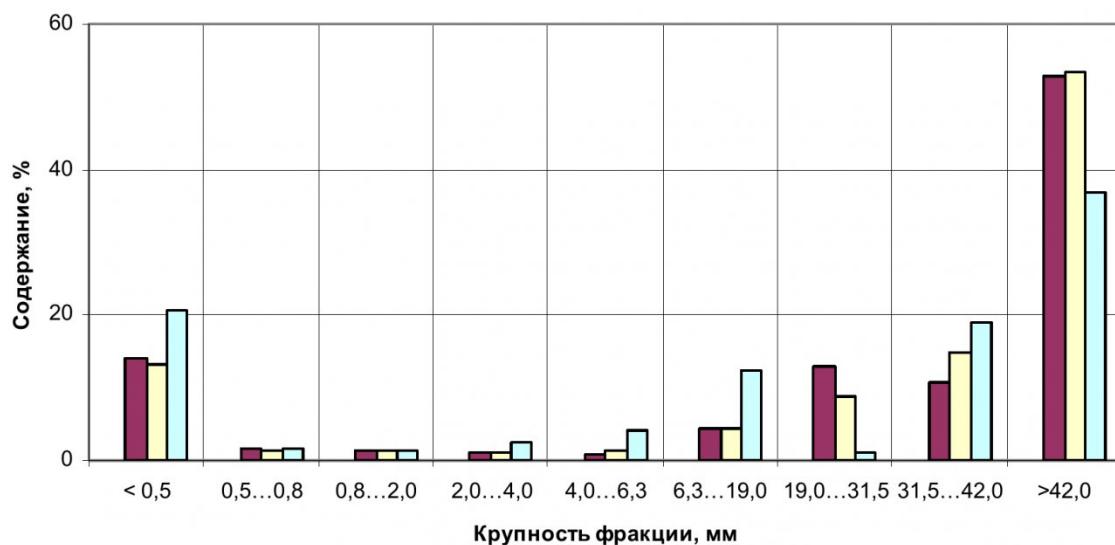


Рис. 11. Фракционный состав продуктов при свободном разрушении песчаника

массива), преодоление которого может трактоваться как достижение уровня напряжений в рассматриваемой области такой величины, при которой будет удовлетворяться один из критериев разрушения. Вариация этого параметра незначительна, среднее его значение по всей группе опытов составляет $V_{cp}^* = 3,995$ при среднем квадратическом отклонении $\sigma_V = 0,587$.

Введенные соотношения позволяют выделить статистически однородные процессы, характерные для различных режимов работы дискового инструмента, и разделить область возможных параметров разрушения на зоны, в которых реализуется свободное и силовое малоцикловое разрушение. Такая, в достаточной мере адекватная классификация процесса разрушения может служить основой для построения модели формирования осколков на базе имеющегося экспериментального материала.

Гранулометрический состав продуктов разрушения

Эффективность процесса разрушения может быть оценена на основе анализа фракционного состава продуктов разрушения [7]. Гранулометрический состав, помимо этого, определяет дальнейший технологический процесс переработки полезного ископаемого и, как следствие, цену конечного продукта.

Для оценки состава продуктов разрушения был проведен ситовой анализ, для чего вручную собирались все крупные осколки разрушенной породы, а пылевые фракции – с помощью пылесоса (рис. 10).

Ситовый анализ пылевых фракций с размером частиц менее 0,5 мм был произведен с целью сравнительной оценки различных режимов разрушения на запыленность рабочего пространства

в зоне работы исполнительного органа ДПФ. Со-



Рис. 10. Сбор пылевой фракции продуктов разрушения

поставление результатов ситового анализа продуктов разрушения песчаника (рис. 11 и 12) показало, что при силовом малоцикловом разрушении выход крупной фракции (+ 42 мм) в 1,35...2,00 раза больше, а выход штыба и пылевых фракций (- 6,3 мм) – в 1,05...1,55 раза меньше, чем при свободном резании.

Основные итоги и выводы

Использованные при лабораторных исследованиях процесса разрушения аппаратура и алгоритмы статистической обработки вносят погрешность, искажающую реальные величины нагрузки на дисковом инструмента не более чем в 1,15...1,20 раза, что вполне удовлетворяет требованиям проведения экспериментальных исследований.

Лабораторные исследования проводились при разрушении песчаника и диорита, которые относятся к породам, имеющим различные характери-

стики разрушаемости ($\chi_{песч} = 0,09$ и $\chi_{диор} = 0,12$) и обладающими значительной прочностью ($\sigma_{песч} = 61,0$ МПа и $\sigma_{диор} = 77,2$ МПа).

Регрессионный анализ результатов лабораторных исследований режима свободного разрушения показал, что максимальные значения, зарегистрированные в эксперименте, составили для усилия внедрения $Y = 35$ кН, а для усилия перекатывания $Z = 25$ кН при глубине внедрения 20 мм и шаге разрушения 50 мм. Отмечается большая интенсивность роста усилия внедрения Y по сравнению с компонентой Z , что связывается с неодинаковой скоростью приращения проекций площадок контакта с изменением глубины внедрения инструмента.

Энергетическая оценка эффективности разрушения песчаника при реализации режима свободного скальвания в сторону обнаженной поверхности показывает, что:

- разрушение песчаника хотя и возможно, благодаря высокой хрупкости ($\chi = 0,09$), но только стружками малого сечения (до 10 см²) и при больших (до 11,5 кВт·час/м³) энергетических затратах;
- разрушение диорита с четко выраженной слоистой структурой является достаточно эффективным, о чём свидетельствуют относительно низкие энергетические затраты (1,5...4,0 кВт·час/м³) и большие величины снимаемой

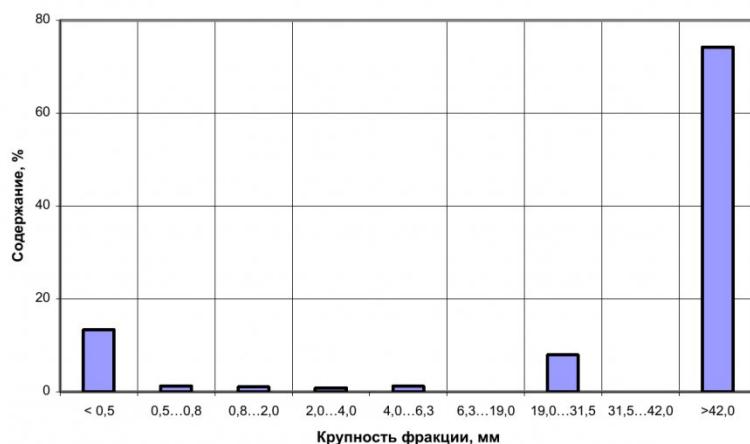


Рис. 12. Фракционный состав продуктов

стружки.

Суммарные энергетические затраты при силовом малоцикловом разрушении песчаника меньше примерно в 5 раз необходимых для реализации режима свободного скальвания и составляют $Hw = 0,37...0,71$ кВт·час/м³. Отсюда следует, что создание предварительного напряженно-деформированного состояния массива и использование его при повторном прокатывании дисков является наиболее рациональным, с энергетической точки зрения, способом разрушения.

Ситовый анализ продуктов разрушения песчаника показал, что при силовом малоцикловом разрушении выход крупной фракции (+ 42 мм) в 1,35...2,00 раза больше, а выход штыба (- 6,3 мм) и пылевых фракций (< 0,5 мм) – в 1,05...1,55 раза меньше, чем при свободном резании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson S.J., Morrell P.J., Larson D.A. A laboratory comparision of drag cutting methods in hard rock // Rept. Invest. Bur. Mines US Dep. Inter. - 1987. - N 9086. - p. 1-12.
2. Гайдукевич В. И. Вероятностная обработка осциллограмм электрических величин / В. И. Гайдукевич, А. А. Мельникова. – М.: Энергия, 1972.- 112 с.
3. Логов А. Б. Механическое разрушение крепких горных пород /А. Б. Логов, Б. Л. Герике, А. Б. Раскин. – Новосибирск: Наука, СО, 1989. - 140 с.
4. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке./ Н. Джонсон, Ф. Лион// -М.: Мир, 1981. - 516 с.
5. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц.// - М.: Мир, 1983. – Т.2. 256 с., ил.
6. Моффет Р. Дж. К теории погрешности при однократных замерах // Теоретические основы инженерных расчетов // -М.: Мир, 1982. - Т.104. - Вып.2. - С.204-218.
7. Позин Е. З. Измельчение углей при резании / Е. З. Позин, В. З. Меламед, С. М. Азовцева // -М.: Наука, 1977. - 136 с.

□ Авторы статьи:

Герике
Борис Людвигович
- докт. техн. наук, профессор,
гл. науч. сотр. ИУУ СО РАН

Логов
Александр Борисович
- докт. техн. наук, профессор,
гл. науч. сотр. ИУУ СО РАН

Герике
Павел Борисович
- аспирант ИУУ СО РАН