

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.232

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ БЛОЧНОГО КАМНЯ ОТ МАССИВА УДАРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ПЛАСТИЧНОЕ ВЕЩЕСТВО В ШПУРЕ

П. Н. Тамбовцев

*Институт горного дела СО РАН им. Н. А. Чинакала, E-mail: tambovskiy@mail.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты физического моделирования процесса отбойки природного камня от массива пластичным веществом, определены значимые факторы, влияющие на энергозатраты и качество отделения блоков. Даны рекомендации последовательности приложения ударной нагрузки, схемы бурения шпуров, соотношения размеров отделяемых блоков от массива.

Массив, строчка шпуров, пластичное вещество, инструмент, удар, трещина, отделение блока

В ИГД СО РАН разрушение твердых пород предложено осуществлять способом ударного воздействия на пластичное вещество (ПВ), размещаемое в шпуре [1, 2]. Особенностью такого разрушения является то, что с погружением клиновидного инструмента 3 (рис. 1а) в шпур пластичное вещество 2 воздействует давлением p на стенки шпура и образует трещину вдоль него. При вытеснении инструментом ПВ проникает в полость формируемой трещины, осесимметрично раздвигает ее поверхность и образует качественный разрыв породы 1. Предварительные экспериментальные результаты по разрыву каменных блоков [3, 4] (рис. 1б, в) показали перспективность дальнейших исследований рассматриваемого способа разрушения для обеспечения его практического применения в технологии добычи блочного камня.

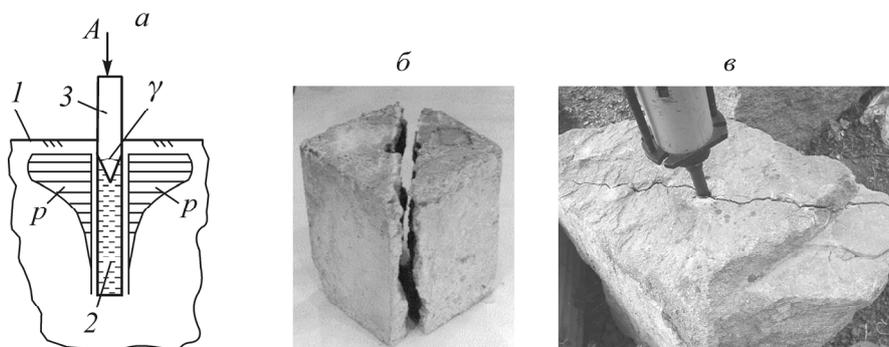


Рис. 1. Результаты направленного разрыва камня давлением пластичного вещества при внедрении инструмента: а — схема ударного воздействия A ; б — цементно-песчаный блок (размер $0.26 \times 0.26 \times 0.4$ м); в — гранитный негабарит ($2 \times 1.2 \times 1.4$ м)

Результаты экспериментов продемонстрировали возможность создания из одиночного шпура трещины, направление развития которой определяется расположением в шпуре передней кромки клина, вдоль которой возникает разрыв камня, и реализации на этой основе новой технологии отделения блочного камня от массива. Технология включает следующие этапы (рис. 2): бурение строчки шпуров, заполнение силовых (рабочих) шпуров пластичным веществом, установка на шпур с ПВ инструмента, предварительная проработка шпура ударными воздействиями на инструмент (уплотнение ПВ в шпуре), основной период воздействия ударной нагрузкой (образование трещины), перемещение средств механизации (бурового станка, установки нагнетания ПВ, ударной машины) на следующий участок горной породы, подлежащей разрушению.

При разделке блоков проводят те же операции, что и при отделении их от массива — бурение строчки шпуров, заполнение центрального шпура ПВ, установка инструмента, приложение ударной нагрузки до полного разрыва камня.

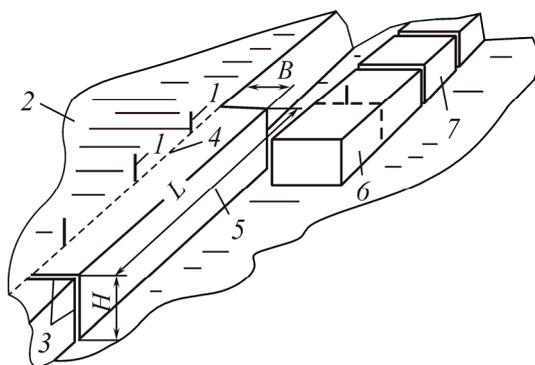


Рис. 2. Принципиальная схема технологии добычи блоков: 1 — инструмент (клин); 2 — массив; 3 — торцевая щель; 4 — линия откола вдоль строчки шпуров; 5 — уступ; 6 — отделенный монолит при разделке на блоки; 7 — конечные блоки

Для обоснования основных параметров обсуждаемой технологии проведены экспериментальные исследования, в задачу которых входила оценка влияния технологических факторов (объем и схемы бурения, соотношения геометрических параметров блоков, площадь откола на один клин, порядок приложения ударной нагрузки) на качество отделяемых блоков и необходимую величину энергии единичных ударов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполнены на физической модели¹, масштаб которой равнялся 1 : 7 по отношению к реальной рабочей площади массива [5, 6], с высотой уступа $H = 2.1$ м, длиной $L = 9.1$ м. В модели бурили строчки шпуров диаметром 6 мм, глубиной до 280 мм. Рабочие шпуры заполняли пластичным веществом² и устанавливали инструменты, к которым прикладывали ударную нагрузку. Инструмент на конце имел клиновидную форму с углом заострения $\gamma = 90^\circ$. Ударная нагрузка прикладывалась поочередно к каждому инструменту, установленному в шпур с ПВ, в среднем по 5 ударов на инструмент. Минимальная энергия единичного удара, с которой воздействовали на инструмент, составляла 1.5 Дж. После нескольких серий ударов при отсутствии видимой трещины на поверхности массива в зоне около шпура энергию единичного удара повышали. Шаг изменения энергии удара составлял 1.5 Дж в диапазоне от 1.5 до 9 Дж, при дальнейшем повышении энергии — 3 Дж.

¹ Модель массива: плита размером 2500×1250×280 мм, пескобетон М-300 ОК 5-8 ГОСТ 28013-89.

² Пластичное вещество по ОСТ 6-15-1525-86.

В опытах оценивалось влияние длины рабочих шпуров x_1 , шага бурения x_2 и количества одновременно действующих инструментов x_3 на величины y_1 и y_2 , где y_1 — энергия единичных ударов, необходимая для отделения блока; y_2 — максимальная неровность профиля поверхности откола, определяющая качество образованных после отделения блока поверхностей. Величина y_2 находилась измерением наибольшего просвета под линейкой, приложенной к данной поверхности.

Условное отличие процессов отделения блока от массива и их разделки при проведении физического моделирования состоит в том, что при $B \ll M$ (рис. 3) наблюдался процесс, схожий с отделением блоков от массива, при $B \approx M$ — с разделением блока. Эксперимент проводили до полного разрыва камня. При этом фиксировалось количество ударов и энергия единичного удара y_1 в зависимости от коэффициента Q и объема откалываемого блока V . Коэффициент $Q = zd/S$, где z — суммарная длина шпуров в плоскости отделения; d — диаметр шпура; S — площадь отделения блока.

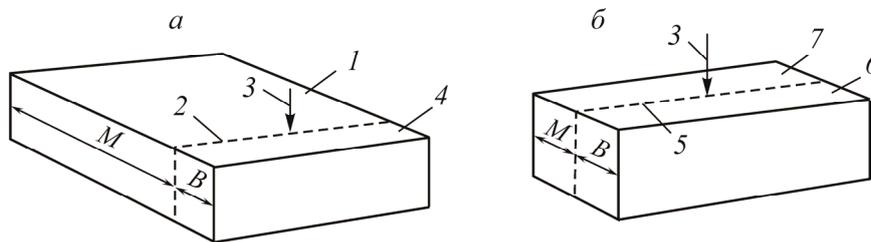


Рис. 3. Условные схемы физических моделей: *a* — отделение блока от массива; *б* — разделка блока: 1 — часть камня, рассматриваемая как массив; 2 — линия отделения блока, 3 — ударная нагрузка; 4 — отделяемый блок; 5 — линия разделки блока (весь камень рассматривается как крупноразмерный блок, разделяемый на части *б* и *7*)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

На первом этапе исследований для оценки влияния параметров x_1 , x_2 , x_3 на величину энергии y_1 и неровность профиля y_2 применена методика планирования многофакторного эксперимента [7, 8]. В каждой экспериментальной точке рассматриваемые факторы варьировались на двух уровнях. Глубина холостых шпуров составляла 220 мм, габаритные размеры отделяемых блоков 600×120×280 мм.

Значения уровней факторов и соответствующие результаты эксперимента представлены в таблице. В последней строке приведены полученные уравнения регрессии, позволяющие количественно оценить по коэффициентам b_i степень влияния факторов x_1 , x_2 , x_3 на изменение выходных параметров y_1 , y_2 .

Значимость факторов. Результаты опытов, представленные в таблице, показывают следующее: на требуемую для отделения величину энергии y_1 значимо влияют шаг бурения (x_2 , $b_{21} = 2.1$) и количество одновременно действующих инструментов (x_3 , $b_{31} = -1.6$), так как коэффициенты ($b_{21} = 2.1$, $b_{31} = -1.6$) влияния этих факторов на y_1 превышают соответствующий доверительный интервал ($\Delta b_{y_1} = 1.55$). При увеличении x_2 параметр y_1 возрастает, а при увеличении x_3 — уменьшается. Фактор x_1 (глубина шпура с пластичным веществом) в заданном интервале (71 – 142 мм) не значимый ($|b_{11}| < \Delta b_{y_1}$).

На параметр y_2 (неровность профиля откола) значимо повлияли те же факторы: x_2 ($b_{22} = 14.8$) и x_3 ($b_{32} = -11.8$) при $\Delta b_{y_2} = 8.09$. Откол с наименьшим значением y_2 произошел в условиях опыта № 1 (таблица), в котором наибольшее количество инструментов ($x_3 = 4$ шт.), а шаг бурения

наименьший ($x_2 = 71$ мм). При двойном увеличении значения шага x_2 и сокращении инструментов x_3 до 2 (опыт № 2) увеличился показатель неровности ($y_{22cp} = 75$ мм) и энергия единичных ударов ($y_{12cp} = 13$ Дж).

Уровни факторов, матрица плана и результаты экспериментов

Показатель	Фактор			Оптимизационный параметр				Фото
	x_1	x_2	x_3 , шт.	y_{1j} , Дж	y_{1cp} , Дж	y_{2j} , мм	y_{2cp} , мм	
	мм							
Уровень:								
верхний $x_i = +1$	142	142	4					
нулевой $x_i = 0$	106	106	3					
нижний $x_i = -1$	71	71	2					
Номер опыта: 1	+	-	+	6 5	5/5	25 19	22	Рис. 4а, Рис. 4б
2	+	+	-	12 14	13	80 70	75	Рис. 4в Рис. 4г
3	-	-	-	8	8	52	52	-
4	-	+	+	10	10	58	58	Рис. 4е
Коэффициенты влияния на:								
y_1	$b_{11} = 0.4$	$b_{21} = 2.1$	$b_{31} = -1.6$		$b_{01} = 8.9$		$b_{02} = 51.7$	
y_2	$b_{12} = 3.3$	$b_{22} = 14.8$	$b_{32} = 11.8$					

Доверительные интервалы: $\Delta b_{y1} = 1.55$, $\Delta b_{y2} = 8.09$ при вероятности 0.95

Уравнения регрессии: $y_1 = 8.9 + 0.4x_1 + 2.1x_2 - 1.6x_3$, $y_2 = 51.7 - 3.3x_1 + 14.8x_2 - 11.8x_3$

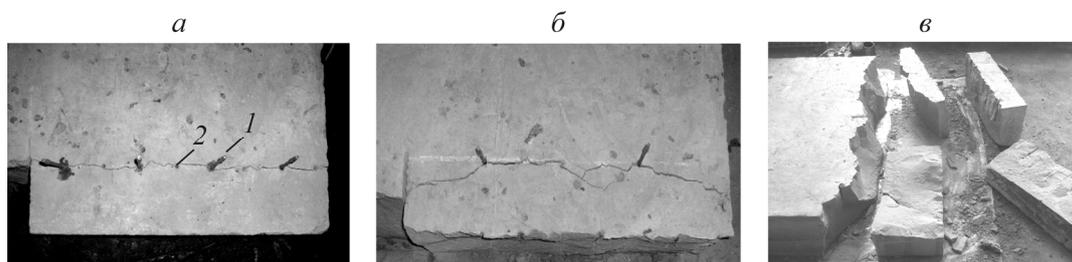


Рис. 4. Результаты отбойки блоков от массива: а — опыт № 1 (таблица); б — опыт № 2; в — сравнение результатов опытов № 1 и № 2; 1 — рабочие шпуров с инструментами; 2 — холостые шпуров

Значимость влияния фактора x_1 на параметр y_2 не превышает доверительного интервала ($|b_{12}| < \Delta b_{y2}$), однако внешний вид поверхности откола блоков (опыт № 1) показывает, что в местах недобуривания рабочих шпуров образуются неровности и сколы (рис. 4в).

Далее, опираясь на результаты экспериментов, влияние факторов x_1 , x_2 , x_3 на достижение оптимальных выходных параметров y_1 , y_2 исследовали более детально. Для этого в последующих опытах шаг бурения сокращали ($x_2 = 71, 59, 49$ мм), а длину рабочих шпуров x_1 увеличивали до 250 мм. С уменьшением шага бурения соответственно уменьшалась неровность профиля откола ($y_2 = 25, 18, 14$ мм). После установления приемлемой величины неровности $y_2 \leq 15$ мм в опытах последовательно уменьшали количество одновременно действующих инструментов ($x_3 = 4, 3, 2, 1$) (рис. 5). На рис. 6 представлены экспериментальные точки максимальной неровности профиля откола y_2 в зависимости от величины x_2 .

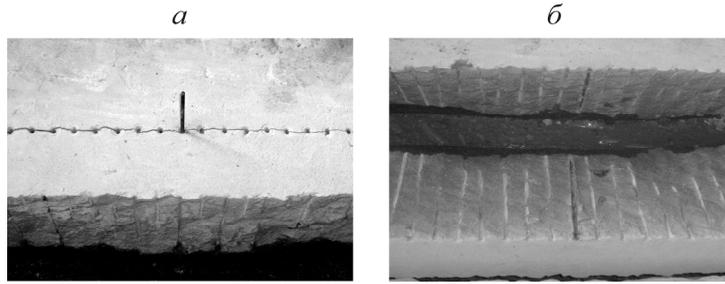


Рис. 5. Образование магистральной трещины одиночным клином при $x_1 = 250$ мм, $x_2 = 35$ мм, $x_3 = 1$ шт. (а) и поверхности откола $y_2 \leq 10$ мм (б)

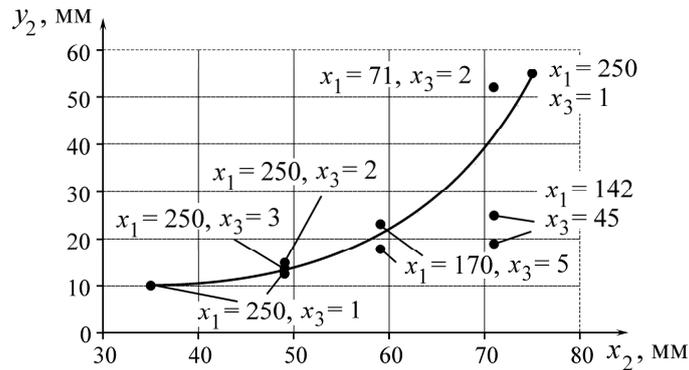


Рис. 6. Зависимость максимальной неровности профиля откола от шага бурения при различных значениях x_1 (мм), x_3 (шт.)

Шаг бурения. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что при параметре $Q \geq 0.12$ изменение x_3 (количество действующих инструментов) влияет только на величину энергии y_1 , необходимую для отделения блоков (y_1 увеличивается при уменьшении x_3), а неровность профиля откола y_2 остается практически одинаковой ($y_2 = 13-15$ мм при $x_2 = 49$ мм) во всех опытах (см. рис. 6). При шаге бурения $x_2 = 35$ мм и $x_3 = 1$ шт. максимальная неровность откола блоков составляет $y_2 \leq 10$ мм (см. рис. 5). Из рис. 6 видно, что с ростом x_2 увеличивается y_2 , а также разброс значений y_2 при $x_2 = \text{const}$. В большинстве опытов разброс y_2 обусловлен влиянием фактора x_3 , более наглядно это проявляется в опытах при $x_2 = 71$ мм. На рис. 7 показаны результаты откола блоков, при которых шпуров бурились на всю высоту уступа (280 мм), а величина шага x_2 составляла 50 мм (рис. 7а) и 75 мм (рис. 7б). При $x_2 = 50$ мм неровность $y_2 \leq 16$ мм, при $x_2 = 75$ мм неровность профиля откола заметно увеличилась $y_2 \leq 55$ мм.

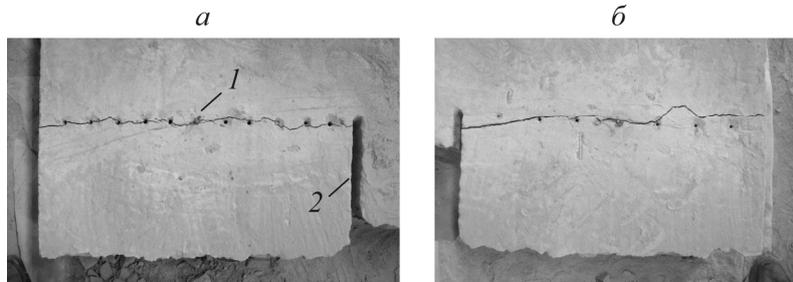


Рис. 7. Отделение блоков ($600 \times 240 \times 280$ мм): а — неровность откола $y_2 \leq 16$ мм при $x_2 = 50$ мм, б — неровность откола $y_2 \leq 55$ мм при $x_2 = 75$ мм; 1 — инструмент; 2 — торцевая щель

На основе этих данных можно заключить, что шаг бурения холостых шпуров имеет пороговое значение $x_2 \approx 50$ мм, превышение которого резко увеличивает неровность профиля откола. Опыты показали, что для обеспечения гарантированного направленного откола коэффициент Q должен находиться в пределах $Q = 0.09 - 0.16$.

Схема бурения. Классическим вариантом [5] схемы бурения при отделении блоков от массива является бурение холостых шпуров на глубину, равную высоте уступа ($h_1 = H$) с допустимым шагом x_2 (рис. 8а). Бурение промежуточных шпуров глубиной $h_2 = H/4$ (рис. 8б) позволяет в 1.5 раза увеличить допустимую величину x_2 до $x' = 1.5x_2$, при которой неровность откола y_2 останется на том же уровне.

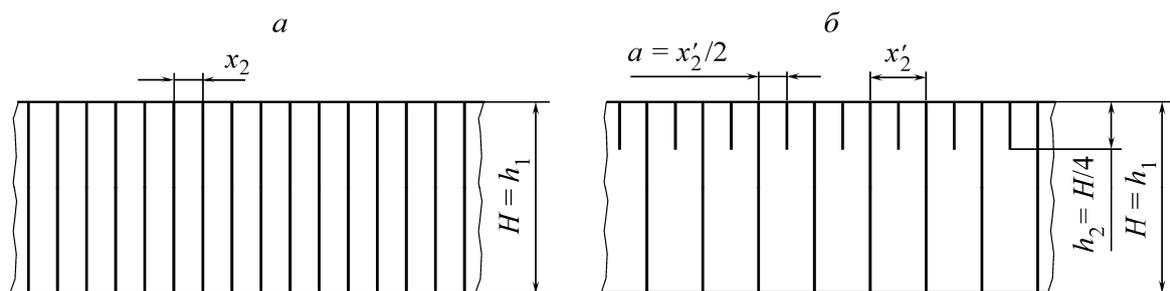


Рис. 8. Схемы бурения строчки шпуров

Диагональный скол. При отделении блоков вдоль строчки шпуров, имеющих глубину холостых шпуров меньшую, чем высота уступа ($h_1 < H$), возникает диагональный скол на свободную поверхность (рис. 9а), причем высота диагонального скола $H_{ск}$ обратно пропорциональна глубине бурения холостых шпуров h_1 (рис. 9б). Если отделяемый блок имеет соотношение размеров $H/B \geq 2.5$, вероятность появления диагонального скола резко возрастает вне зависимости от глубины h_1 и шага x_2 бурения.

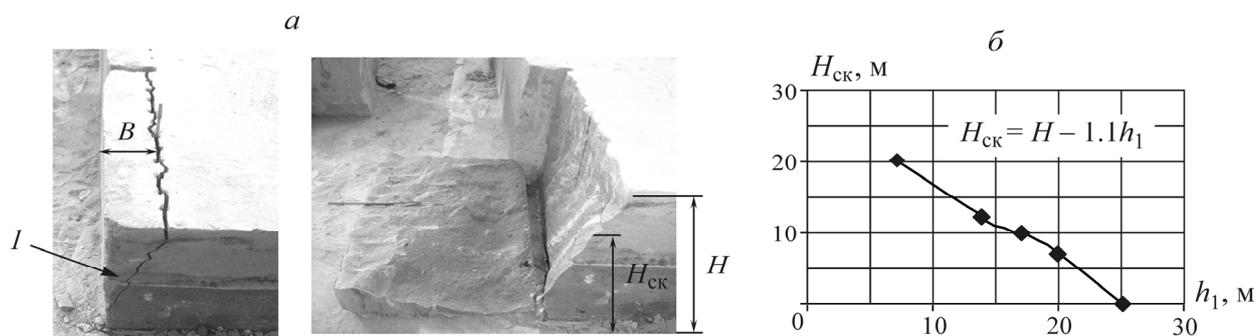


Рис. 9. Влияние глубины бурения h_1 на возникновение диагонального скола $H_{ск}$: а — характерная картина диагонального скола при соотношении $H/B = 2.5$; б — экспериментальная зависимость $H_{ск}$ от h_1

Энергия единичного удара. На второй стадии исследования проведены эксперименты³, направленные на выявление зависимостей энергии y_1 от размеров отделяемых блоков L, B , коэффициента ослабления плоскости отделения шпурами Q , количества одновременно действующих инструментов x_3 . Экспериментальные кривые представлены на рис. 10. Они показы-

³ Модель массива: плита размером $2500 \times 1300 \times 300$ мм, пескобетон М-300 ОК 5-8 ГОСТ 28013-89.

вают, что увеличение размеров отделяемых блоков (L, B) при прочих равных условиях требует повышения необходимой энергии удара y_1 , а увеличение коэффициента Q и количества инструментов x_3 — снижение y_1 (рис. 10в, з). Это связано с повышением потенциальной энергии упругой деформации отделяемых блоков, необходимой для роста магистральной трещины.

Установлено, что при отделении блоков с соотношением ширины и длины $L/B \geq 5$ ударной нагрузкой, прикладываемой к центральному шпуру, возникает радиальная трещина (разлом), ориентированная от фронтальной плоскости уступа к месту приложения нагрузки (рис. 11). Это можно объяснить тем, что отделяемый блок изгибается подобно балке; в сечении, где образуется радиальная трещина 1 , блок испытывает со стороны уступа предельное растягивающее напряжение.

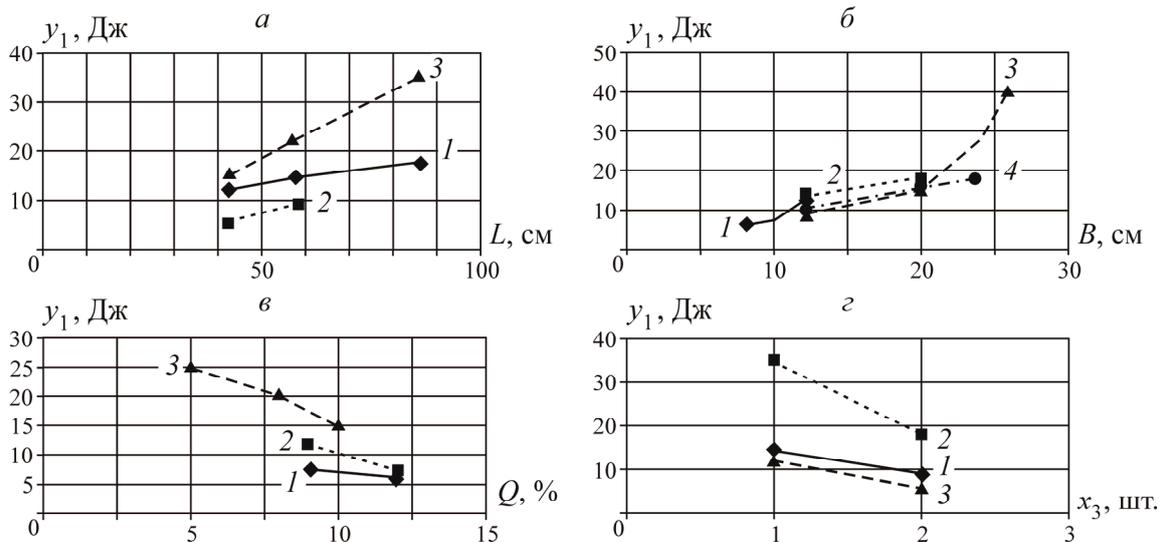


Рис. 10. Зависимости энергии единичного удара y_1 : а — от длины L отделяемого блока (1 — при коэффициенте ослабления шпурами $Q = 0.16$ и ширине монолита $B = 20$ см; 2 — $Q = 0.09$ и $B = 8$ см; 3 — $Q = 0.09$ и $B = 24$ см); б — от ширины B блока (1 — $Q = 0.09$ и $L = 43$ см; 2 — $Q = 0.16$ и $L = 86$ см; 3 — $Q = 0.16$ и $L = 130$ см; 4 — $Q = 0.9$ и $L = 86$ см); в — от коэффициента ослабления шпурами Q (1 — $L = 43$ см и $B = 10$ см; 2 — $L = 43$ см и $B = 12$ см; 3 — $L = 60$ см и $B = 24$ см); з — количества x_3 одновременно внедряемых клиньев (1 — $L = 86$ см, $B = 12$ см, $Q = 0.14$; 2 — $L = 86$ см, $B = 24$ см, $Q = 0.09$; 3 — $L = 60$ см, $B = 12$ см, $Q = 0.09$)

При более частом бурении шпуров (увеличение Q) повышается уровень концентрации напряжений вдоль строчки шпуров, уменьшается площадь разрыва породы, в связи с чем снижается y_1 (рис. 10в).

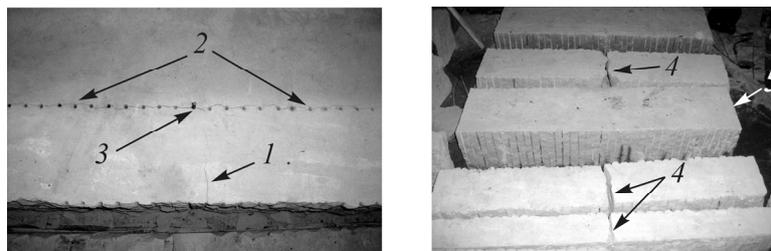


Рис. 11. Влияние соотношения L/B отделяемого блока на возникновение трещин: 1 — радиальная трещина; 2 — направленная трещина; 3 — место приложения ударной нагрузки; 4 — разлом блоков (при $L/B = 11, 6.5, 5$); 5 — отделенный блок без разлома ($L/B = 4.3$)

Порядок приложения ударной нагрузки. При отделении блоков от массива рабочие инструменты следует распределять равномерно с шагом по площади отделения, а ударную нагрузку прикладывать ко всем инструментам. Это позволяет уменьшить удельную нагрузку на инструмент (рис. 10г), общие энергозатраты разрушения A (рис. 12) и неровность поверхностей отделения y_2 . Например, при коэффициенте ослабления $Q = 0.09$ значения y_1 и y_2 при воздействии одиночным инструментом в условиях эксперимента (рис. 12а) составили $y_1 = 35$ Дж и $y_2 \leq 27$ мм при одновременном воздействии двумя инструментами $y_1 = 18$ Дж и $y_2 \leq 15$ мм (рис. 12б). Общие энергозатраты разрушения A в первом случае (рис. 12а) составили $A_1 = 4728$ Дж, во втором (рис. 12б) — $A_1 = 1854$ Дж.

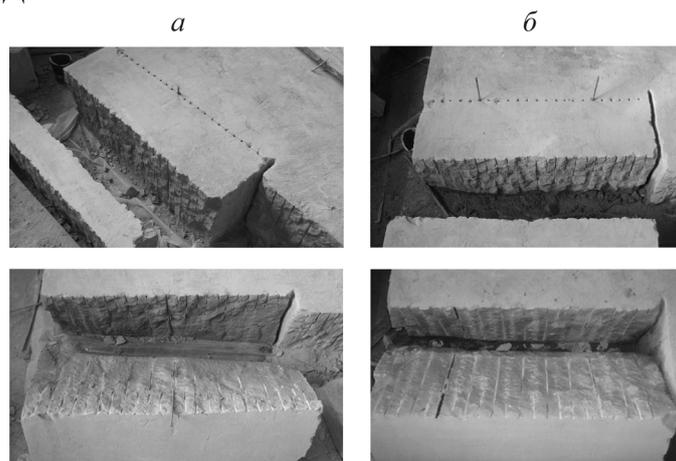


Рис. 12. Отделение блоков размером $L \times B \times H = 0.86 \times 0.24 \times 0.3$ м: а — одним инструментом (энергия единичного удара $y_1 = 35$ Дж, $y_2 \leq 27$ мм, $A = 4728$ Дж); б — двумя инструментами ($y_1 = 18$ Дж, $y_2 \leq 15$ мм, $A = 1854$ Дж)

Площадь откола на один инструмент. Максимальная площадь качественного откола ($y_2 \leq 16$ мм) на один инструмент в условиях экспериментов составила 0.168 м², с учетом масштаба модели (1 : 7) можно предположить, что в реальных условиях карьера площадь такого откола составит ≈ 8.2 м².

Разделка блоков. Результаты по разделке блоков показаны на рис. 13а, экспериментальные значения энергии единичного удара y_1 в зависимости от объема откалываемого блока V — на рис. 13б. В процессах разделки блоков энергия y_1 возрастает при уменьшении Q и увеличении объема V откалываемого блока (рис. 13б).

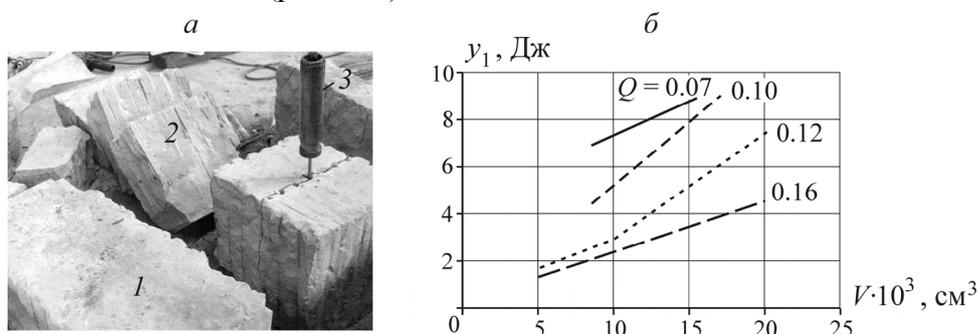


Рис. 13. Результаты разлома блоков: а — разделка блока 1 ($600 \times 240 \times 280$ мм) на блоки меньших размеров 2; 3 — пневмоударное устройство (3 Дж); б — экспериментальные зависимости энергии единичного удара y_1 от объема откалываемого блока V при коэффициенте ослабления шпурами $Q = 0.07; 0.10, 0.12, 0.16$

ВЫВОДЫ

Направленное отделение блоков от массива при работе нескольких инструментов происходит за счет концентрации напряжений в плоскости отделения при коэффициенте ослабления блока шпурами $Q \geq 0.07$. При воздействии на массив одиночным инструментом из центрального шпура направленный откол происходит при коэффициенте $Q \geq 0.12 - 0.16$.

Необходимая для роста магистральной трещины энергия удара u_1 на инструмент, внедряемый в шпур с ПВ, существенно повышается при снижении коэффициента Q , уменьшении количества одновременно используемых инструментов x_3 и увеличении размеров отделяемого блока (L, B). При этом увеличение x_3 (например в 2 раза) позволяет не только пропорционально снизить энергию удара (≈ 2 раза), прикладываемую к одному инструменту, но и уменьшить (≈ 2.5 раза) общие энергозатраты A на отделение блока.

При отделении блоков от массива ударной нагрузкой, прикладываемой к центральному шпуру в строчке шпуров, существует пороговое значение соотношения длины и ширины отделяемого блока ($L/B < 5$), при несоблюдении которого возникает радиальная трещина (разлом), ориентированная от фронтальной плоскости уступа к месту приложения нагрузки.

Высота диагонального скола $H_{ск}$ обратно пропорциональна глубине бурения холостых шпуров h_1 . При значении соотношения ширины и высоты отделяемого блока ($H/B \geq 2.5$) резко возрастает вероятность появления диагонального скола вне зависимости от глубины h_1 и шага x_2 бурения шпуров.

Автор благодарен д. т. н. Л. В. Городилу и д. т. н. Б. Н. Смоляницкому за полезные советы при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2131032 РФ. Способ разрушения горных пород / Н. Г. Кю, О. И. Чернов // Оpubл. в БИ. — 1999. — № 15.
2. Кю Н. Г. Особенности разрушения горных пород при флюидоразрыве пластичными веществами // ФТПРПИ. — 2011. — № 4.
3. Тамбовцев П. Н. Экспериментальные исследования процесса флюидоразрыва породных блоков ударным способом // ФТПРПИ. — 2004. — № 3.
4. Петреев А. М., Тамбовцев П. Н. Ударное нагружение твердой породы через пластичное вещество в шпуре // ФТПРПИ. — 2006. — № 6.
5. Карасев Ю. Г., Бака Н. Т. Природный камень, добыча блочного и стенового камня: учеб. пособие. — С.-Петербург. горн. ун-т, 1997.
6. Казарян Ж. А. Природный камень: добыча, обработка, применение: справочник. — М., 2002.
7. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М.: Наука, 1965.

Поступила в редакцию 5/VI 2014