

УДК 551.242; 551.243

**К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕНЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ  
С УВЕЛИЧЕНИЕМ ГЛУБИНЫ КАРЬЕРА**

**А. Г. Багдасарьян<sup>1</sup>, В. Н. Сытенков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Всероссийский проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии, E-mail: pakobag@yandex.ru, Каширское шоссе, 33, 115409, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, Старомонетный пер., 31, 119017, г. Москва, Россия*

Известно, что при определенных условиях геолого-структурные, сейсмические, конструктивные и технологические факторы не препятствуют практическому увеличению углов наклона бортов на предельном контуре глубоких карьеров. Оценка устойчивости бортов карьера в предельных контурах осуществляется по показателю устойчивости борта, который в идеальном варианте должен приниматься равным  $n_{yc} = 1$ . Однако на практике  $n_{yc} = 1.2 - 1.3$ , что выполаживает борт карьера, расширяет его границы по поверхности и увеличивает объемы вскрышных работ. В связи с этим было предложено (автор идеи — В. Н. Сытенков) построить борт выпуклой формы с уменьшающимся с глубиной коэффициентом устойчивости. При этом предполагается, что с достижением карьером проектной глубины и отработкой запасов борт карьера теряет свое технологическое назначение и его коэффициент устойчивости может не превышать 1. Показано, что такой подход имеет не только экономические, но и определенные физические предпосылки.

*Механика горных пород, структура разрушения, неоднородная среда, устойчивость бортов карьера*

Основные приемы решения задач механики горных пород связаны с попытками выделить область массива, для которой можно задать начальные и граничные условия, и с выбором того или иного закона упругого или упругопластического деформирования среды (как правило, без должного обоснования). При этом, при отделении какой-либо области горной породы от массива она лишается важного качества — постоянного обмена энергией с окружающей средой. В действительности геофизическая среда непрерывно диссипирует поступающую извне механическую энергию и находится скорее в стационарном, а не статически равновесном состоянии.

Таким образом, возникают задачи описания исходной структуры, ответственной за диссипацию энергии, и выявления взаимосвязи между параметрами этой структуры и параметрами внешних деформационных процессов. При этом источником внешних воздействий могут быть как геотектонические процессы, так и инженерная деятельность человека. Тогда возникающая при критических движениях структура разрушения приобретает физический смысл как характе-

ристика состояния породного массива. Для решения практических вопросов механики горных пород следует обратить внимание на работы В. Н. Родионова (см., например, [1]), в которых изложенные выше качественные соображения облечены в достаточно простую математическую форму и получены согласующиеся с экспериментальными результатами решения ряда задач.

### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ РАЗРУШЕНИЯ НА БОРТАХ КАРЬЕРА

Математическим фундаментом теории В. Н. Родионова являются два уравнения. Первое задает равномерное распределение механически значимых неоднородностей для исследуемого участка геофизической среды. Эти неоднородности ответственны за необратимые деформации: на них концентрируются и релаксируют со временем напряжения. Вид закона распределения неоднородностей подсказан известным в геофизике фактом — независимостью механической добротности среды от частоты волны: каждая гармоника как бы сама “выбирает” себе структуру для “организации” диссипативного процесса. Следовательно, в рамках модели концентрации неоднородностей можно определить по затуханию упругих колебаний или волн.

Второе уравнение задает закон концентрации и релаксации напряжений на неоднородностях при сдвиговых деформациях. Концентрация напряжений предполагается пропорциональной скорости сдвиговой деформации, а скорость релаксации напряжений на неоднородности пропорциональна величине избыточных напряжений и обратно пропорциональна размеру неоднородностей.

Из решения этого уравнения следует, что для каждой скорости сдвиговой деформации существует предельный размер неоднородностей: на неоднородностях меньшего размера концентрация напряжений до критического уровня невозможна из-за релаксации.

В зависимости от параметров деформационного процесса в геофизической среде (горном массиве) возникает сетка напряженных неоднородностей определенного размера, способных концентрировать напряжения до разрушающих значений.

Образующиеся на этих неоднородностях трещины при прорастании до взаимного пересечения формируют структуру разрушения горного массива. При этом минимальный размер отдельных элементов в структуре разрушения определяется расстоянием между напряженными до критического уровня неоднородностями. При изменении скорости деформации (например, при ее уменьшении) роль концентраторов разрушающих напряжений переходит к неоднородностям другого (большого) размера, изменяются (увеличиваются) характерные размеры блоков в структуре разрушения, а картина разрушения остается подобной самой себе.

Используя изложенные представления, в [2] выявлены признаки формирования структуры разрушения на бортах карьера Мурунтау (Республика Узбекистан). Исследование прибортового массива проводилось на расстоянии  $H = 230$  м от свободной поверхности. В результате комплекса инструментальных работ определены характерные размеры минимальных  $L_{\min}$  и максимальных  $L_{\max}$  блоков, составляющих структуру разрушения, и оценены минимальные размеры механически значимых неоднородностей  $\ell_0$ , способных при сдвиговой деформации концентрировать напряжения до разрушающих значений. Установлено, что  $L_{\min} \approx 0.15 - 0.3$  м,  $L_{\max} \approx 10 - 12$  м,  $\ell_0 \approx (0.2 - 0.3) \cdot 10^{-2}$  м.

Как уже отмечалось, параметры структуры разрушения (характерные размеры составляющих ее блоков) полностью определяются характеристиками деформационного процесса в массиве (скоростью деформации). Поэтому, вычислив  $L_{\min}$ ,  $L_{\max}$  и  $\ell_0$ , нетрудно рассчитать соответствующую им скорость деформации  $\dot{\epsilon}_1$  в массиве [3]. Оказалось, что  $\dot{\epsilon}_1 \approx 2 \cdot 10^{-2}$  1/год.

Оценим теперь скорость деформационных процессов в прибортовом массиве  $\dot{\varepsilon}_2$ , связанную с инженерными работами по понижению уровня карьера. В работах [2, 3] показано, что при постоянной скорости понижения уровня карьера  $\dot{\varepsilon}_2$  может быть получена из выражения

$$\dot{\varepsilon}_2 \approx a/S, \quad (1)$$

где  $a$  — скорость понижения уровня карьера;  $S$  — протяженность склона.

Подставляя  $a \approx 10 - 15$  м/год,  $S = 460$  м, находим  $\dot{\varepsilon}_2 \approx (2 - 3) \cdot 10^{-2}$  1/год.

Еще раз уточним, что под  $\varepsilon$  понимается деформация сдвига, которая в теории В. Н. Родионова ответственна за концентрацию напряжений на неоднородностях среды. В рассматриваемом случае деформация сдвига направлена в сторону борта карьера. Подробный механизм концентрации неупругих напряжений на неоднородностях при наличии свободной поверхности представлен в [1].

Столь близкое совпадение определенных независимо друг от друга значений  $\dot{\varepsilon}_1$  и  $\dot{\varepsilon}_2$  заставляет предположить, что формирование структуры разрушения на бортах карьера Мурунтау обусловлено режимом горных работ, связанных с понижением его уровня. Из этого следует, что при  $a = \text{const}$  с понижением уровня карьера скорость сдвиговой деформации в прибортовом массиве будет изменяться обратно пропорционально протяженности склона  $S$  (или, что то же, глубине карьера  $H$ ).

Действительно, при  $a = \text{const}$

$$\dot{\varepsilon} \approx a/S \sim 1/S \sim 1/H.$$

Уменьшение скорости деформации должно привести к увеличению характерных размеров блоков формирующейся на бортах структуры разрушения:  $L_{\min}$  и  $L_{\max}$  будут расти с увеличением глубины карьера. Как показано в [4], время формирования структуры разрушения составляет примерно 1 мес.

Таким образом, положение фронта формирующейся во вмещающих породах структуры разрушения (вдоль вертикальной оси) практически совпадает с текущим уровнем горных работ.

Конечно, формирование структуры разрушения во вмещающих породах не означает немедленное обрушение на бортах карьера. Структура разрушения лишь делает массив более подвижным, более восприимчивым к климатическим воздействиям, открывает доступ влаги в межблоковое пространство, которая в процессе промерзания и оттаивания ослабляет связь между блоками, вымывает мелкие фракции и ведет к снижению устойчивости.

Кажется очевидным, что расчлененный на более мелкие отдельные прибортовой массив особенно подвержен влиянию климатических факторов и механических воздействий различной природы (массовые взрывы, землетрясения и т. п.). Поэтому если с увеличением глубины карьера характерные размеры блоков структуры разрушения увеличиваются, то должна расти и устойчивость бортов на более глубоких горизонтах (увеличивается период времени, в течение которого борт сохраняет устойчивость).

Данный вывод не кажется парадоксальным. В работе [3] выявлены признаки структуры разрушения в районе Туркестанского хребта: определены характерные размеры составляющих блоков и оценена скорость деформации в период ее формирования. Оказалось, что  $L_{\max} \approx 10$  км,  $L_{\min} \approx 0.1$  км,  $\dot{\varepsilon} \approx 2 \cdot 10^{-5}$  1/год.

Именно большими размерами элементов блочной структуры объясняется тот факт, что горы даже с очень крутыми склонами сохраняют устойчивость столетиями.

Визуальные обследования бортов карьера показали, что глубина проникновения структуры разрушения во вмещающие породы пропорциональна характерным размерам составляющих ее блоков. В качестве экспертной оценки можно считать

$$L_n \approx 1 - 2L_{\max},$$

здесь  $L_n$  — глубина проникновения;  $L_{\max}$  — размер максимального блока структуры разрушения.

Ранее было показано, что при увеличении глубины карьера  $L_{\max}$  увеличивается.

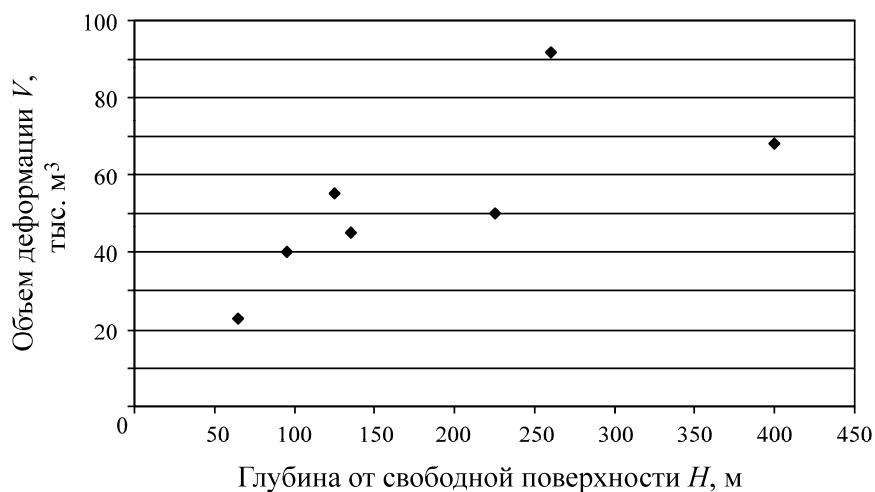
Таким образом, при полном (по глубине) обрушении зоны, занятой структурой разрушения, объемы обрушившейся породы должны возрастать с увеличением глубины карьера.

#### АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО КРУПНЫМ ОБРУШЕНИЯМ (ДЕФОРМАЦИЯМ) НА БОРТАХ КАРЬЕРА

Рассмотрим имеющиеся экспериментальные данные по объемам обрушений на различных расстояниях от свободной поверхности.

Наиболее представительными являются данные по крупным обрушениям (свыше 30 000 м<sup>3</sup>), поскольку более мелкие могут быть связаны с частичным поверхностным обрушением, когда отдаленные от борта участки структуры разрушения сохраняют относительную устойчивость.

Кроме того, исключим из рассмотрения подвижки, связанные с оползнями. Подвижки такого типа связаны с конкретными горно-геологическими условиями, а не с формированием структуры разрушения во вмещающих породах. Результаты анализа представлены на рисунке.



Объем деформаций на различных расстояниях от свободной поверхности

Как видно из рисунка, развитые нами представления о механизме обрушений на бортах карьера согласуются с экспериментальными данными. Обращает на себя внимание отсутствие крупных деформаций на глубинах свыше 400 м.

Это, скорее всего, связано с тем, что время, в течение которого борт сохраняет устойчивость, растет с увеличением глубины карьера. Поэтому на больших глубинах структура разрушения не успевает “созреть” до такого состояния, чтобы потерять устойчивость.

#### ВЫВОДЫ

Результаты выполненных исследований показывают зависимость устойчивости бортов от режима горных работ, связанных с понижением уровня карьера.

При примерно постоянной скорости понижения уровня карьера устойчивость бортов будет возрастать с глубиной, что позволяет для глубоких карьеров формировать борта выпуклой формы без потери устойчивости.

При формировании борта выпуклой формы скорость сдвиговой деформации бортового массива будет несколько больше, чем для борта с постоянным углом наклона. Это приведет к уменьшению характерных размеров блоков структуры разрушения и соответственно к некоторому уменьшению времени, в течение которого борт будет сохранять устойчивость (относительно времени устойчивости борта с примерно постоянным углом наклона). Для выбора оптимальной формы борта необходимо рассматривать оба этих варианта с учетом конкретных горно-геологических условий.

В целом полученные результаты свидетельствуют о возможности использования развитых В. Н. Родионовым представлений для решения задач механики горных пород.

Авторы выражают признательность доктору физико-математических наук А. А. Спиваку за внимательное прочтение работы и ценные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. — М.: Наука, 1986.
2. Багдасарьян А. Г., Лукишов Б. Г., Родионов В. Н., Федянин А. С. Выявление признаков формирования структуры разрушения на бортах карьера Мурунтау // ФТПРПИ. — 2008. — № 1.
3. Родионов В. Н., Сизов И. А., Багдасарьян А. Г. О структуре разрушения горного массива // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1989. — № 12.
4. Багдасарьян А. Г., Федянин А. С., Шеметов П. А. Оценка временных параметров формирования структуры разрушения в бортах карьера Мурунтау // ФТПРПИ. — 2009. — № 2.

*Поступила в редакцию 7/III 2013*