

УДК 622.83, 622.271.33

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПРИБОРТОВОГО МАССИВА КАРЬЕРА
С КРУТОПАДАЮЩЕЙ СЛОИСТОСТЬЮ ГОРНЫХ ПОРОД**

С. В. Цирель, А. А. Павлович, Н. Я. Мельников, Б. Ю. Зуев

*Санкт-Петербургский горный университет, E-mail: Pavlovich_aa@pers.spmi.ru,
21-я линия, д. 2, Васильевский остров, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия*

Приведены результаты физического моделирования бортов глубоких карьеров с использованием эквивалентных материалов. Выполнены поверочные расчеты методом предельного равновесия. Определены смещения в модели и рассчитаны коэффициенты запаса устойчивости откосов на всех этапах моделирования. Проанализирован характер деформирования и разрушения откосов от первых проявлений деформирования до полной потери устойчивости при различных прочностных показателях контактов слоев. Установлено, что механизм разрушения бортов с крутым падением слоев в массив определяется сдвиговой прочностью по контактам горных пород. При прочностных свойствах контактов, близких к прочностным свойствам массива, деформирование борта происходит по плавной криволинейной поверхности скольжения по механизму, близкому к изотропному откосу. При наличии контактов со сдвиговыми характеристиками, резко отличающимися в меньшую сторону от прочностных свойств массива, деформирование борта происходит путем изгиба с последующим опрокидыванием. При промежуточном варианте наиболее вероятен механизм разрушения, сочетающий изгибы слоев с их дальнейшим срезом по криволинейной поверхности.

Слоистость, борт карьера, физическое моделирование, эквивалентные материалы, коэффициент запаса, механизм разрушения, смещение

DOI: 10.15372/FTPRPI20190303

Горные породы прибортовых массивов можно охарактеризовать как слоистую трещиноватую среду, а их поведение в большей части случаев описать с использованием законов сыпучей среды [1 – 5]. Данное допущение для оценки устойчивости бортов позволяет использовать критерий Кулона – Мора, по которому предельно-напряженное состояние откоса достигается при некотором соотношении нормальных и касательных напряжений. На основании этого разработано около 150 методов расчета устойчивости откосов [6]. Но до сих пор не выработано общепринятого подхода к оценке устойчивости откосов с обратной крутопадающей слоистостью, так как механизм их деформирования отличается от деформирования изотропных массивов и массивов со слоистостью, падающей согласно с направлением бортов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-10101).

Методы оценки устойчивости бортов карьеров основаны на предположении, что горные породы в прибортовом массиве разрушаются путем среза. Для определения степени устойчивости откосов осуществляется сравнение сдвигающих и удерживающих сил по наиболее ослабленной поверхности. В бортах карьеров со сложным структурным строением существует вероятность возникновения условий, когда разрушение откосов будет иметь иной характер, например откосы, в которых крутопадающая слоистость направлена в массив (обратная слоистость).

В российской практике немного работ посвящено оценке устойчивости бортов карьеров с обратным падением слоев. Это связано с тем, что прибортовые массивы подобного строения устойчивее массивов со слоистостью, падающей в выработанное пространство. Исследования в этом направлении проводились применительно к осадочным толщам пород на угольных карьерах с характерным наличием протяженных слоев с низкими прочностными свойствами по контактам пород. Наибольший вклад в изучение данного механизма внес Б. Г. Афанасьев, результаты работы которого включены в “Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах” [7, 8]. Отмечено, что при наличии в прибортовом массиве обратной слоистости ($\beta = 50 - 90^\circ$) механизм деформирования борта происходит в несколько этапов и проявляется в виде изгиба и опрокидывания слоев. Для учета этих особенностей разработана методика с введением поправок, основанных на результатах физического моделирования, в расчет изотропного откоса [8].

В [9] отмечается, что данная методика в связи с узким диапазоном условий, для которых она установлена, имеет ограниченное применение и требует оформления бортов карьеров под весьма пологими углами. В реальных условиях горные работы могут вестись и в режиме допустимых деформаций, т. е. имеется возможность увеличения углов бортов карьеров. Однако предложения по корректировке прочностных свойств, сделанные в [9], не позволяют надежно оценить устойчивость откосов. В [8, 9] приводится лишь один из возможных механизмов деформирования массивов при обратной слоистости.

Наиболее полная классификация механизмов деформирования откосов для рассматриваемых условий предложена в [10], где процесс разрушения называют “опрокидывание”. Под механизмом опрокидывания понимается разрушение прибортового массива или его участка, включающего опрокидывание системы блоков, образованных плоскостями слоев, кливажом или трещиноватостью, которые направлены вдоль откоса и имеют несогласное с наклоном борта падение нарушения сплошности. Он проявляется как в скальных массивах, так и в мягких грунтах. Опрокидывание может быть первичным и вторичным и имеет свои разновидности (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Механизмы разрушения откосов при крутом падении слоев, направленных в сторону выработанного пространства

Первичное опрокидывание	Вторичное опрокидывание
Деформирование откоса путем изгиба слоев	Опрокидывание блоков в верхней части откоса ввиду скольжения блоков пород, залегающих в призме упора
Деформирование откоса путем опрокидывания блоков	Опрокидывание при резкой деформации вышележащего грунта либо при понижении горных работ
Деформирование откоса с элементами изгиба слоев и опрокидывания блоков	Опрокидывание призмы упора под действием скольжения призмы активного давления
	Опрокидывание блоков, образованных в результате формирования трещин отрыва

Опрокидывание слоев откоса протекает с небольшой скоростью. При этом деформирование может охватывать значительный объем горных пород с распространением трещин отрыва и последующим обрушением откоса [11]. Чаще обрушение начинается в области подошвы откоса при понижении горных работ или в процессе эрозии. Несмотря на достигнутые успехи в изучении механизмов деформирования откосов при крутом обратном падении слоев, надежный прогноз параметров бортов карьеров является затруднительным [12].

Для решения задач об устойчивости бортов карьеров при обратном падении слоев физическое моделирование выполняется редко, и аналитические решения применяются ограниченно [10]. Это связано со сложностью создания достоверной механико-математической модели. Наиболее распространены численные методы, основанные на методе конечно-дискретных или дискретных элементов [12–16]. Численное моделирование при обратном падении слоев не всегда позволяет достоверно воспроизводить весь процесс деформирования прибортового массива и выполнять надежное обоснование параметров карьеров [17].

Приведенный обзор показывает, насколько сложен процесс деформирования откосов с обратным падением слоистости, включающий в себя наклоны, изгиб, опрокидывание и подрезку слоев, и насколько расходятся между собой известные подходы. Разрушение таких откосов гораздо сложнее, чем простой сдвиг горной массы, принятый в традиционных методах.

Описанный в [8] способ расчета приводит к необходимости введения отрицательной поправки в $10–15^\circ$. Однако здесь не в полной мере учитываются прочностные характеристики контактов слоев, а именно сцепление. При использовании этого способа существует риск занижения предельных параметров бортов карьеров и уменьшения экономической эффективности открытой разработки, что может привести к неправильным “перестраховочным” решениям о нецелесообразности разработки месторождений в труднодоступных условиях с неразвитой инфраструктурой.

Цель настоящей работы — изучение механизма потери устойчивости прибортового массива с обратной крутопадающей слоистостью с помощью физического моделирования с использованием эквивалентных материалов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение особенностей поведения устойчивости откосов с обратной слоистостью проводилось с помощью физического моделирования на эквивалентных материалах. Для определения физико-механических свойств материала модели, воспроизводящей напряженно-деформированное состояние массива, использовались критерии механического подобия:

$$N_m = N_n \frac{\gamma_m l_m}{\gamma_n L_n} = N_n \alpha_\gamma \alpha_l, \quad \operatorname{tg} \phi_n = \operatorname{tg} \phi_m.$$

Здесь N_m , N_n — физико-механические характеристики модели и природы, имеющие размерность сила/площадь; γ_m , γ_n — плотность в модели и натуре; l , L — размер модели и в натуральных условиях; ϕ_m , ϕ_n — угол внутреннего трения в модели и натуре. Для анализа процессов деформирования борта карьера с обратной слоистостью моделировался борт высотой 500 м и учитывалось геометрическое $l/L = 0.0012$ ($l = 0.6$ м, $L = 500$ м) и динамическое подобие $\gamma_m/\gamma_n = 1.17$ ($\gamma_m = 3150$ кг/см³, $\gamma_n = 2700$ кг/см³).

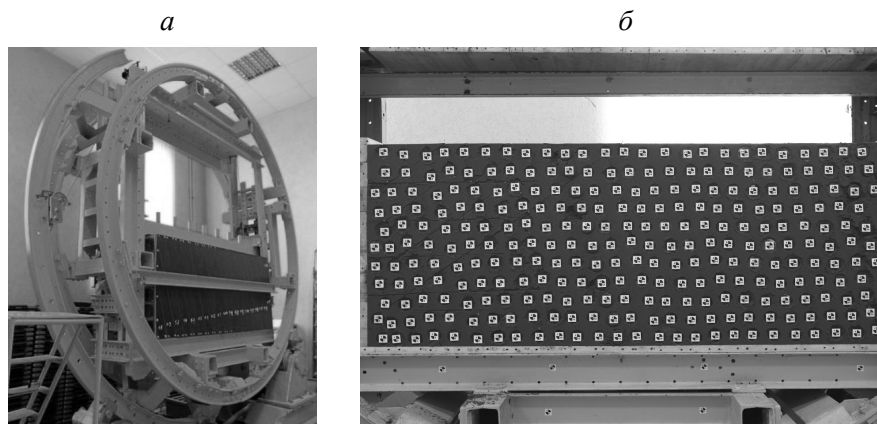


Рис. 1. Модель массива перед началом воспроизведения открытых горных работ: а — матрица поворотного стенда; б — реперные марки

В соответствии с расчетными параметрами эквивалентных материалов, по результатам лабораторных испытаний на сжатие, растяжение и сдвиг выбран следующий состав смеси: чугунная дробь — 60, кварцевый песок — 38, солидол — 2%. Материал модели укладывался в специальную матрицу поворотного стенда (рис. 1а) путем послойной укатки (7 циклов) с помощью катка с удельным давлением 2.5 Н/см². При моделировании обратной слоистости стенд поворачивался таким образом, чтобы укатка слоев осуществлялась в горизонтальной плоскости. Для моделирования слабых контактных условий между слоями располагался полиэтилен, для прочных — слюда. Между слоями устанавливались специальные стяжки с реперными марками (рис. 1б). Движение марок фиксировалось фоторегистратором Hasselblad H5D-200MS и видеорегистратором НАС НХ-3.

В ходе экспериментальных исследований изготовили три модели приборного массива, имитирующие различные условия:

- модель изотропного откоса, воспроизводящая прочностные характеристики массива $C_n = 0.53$ МПа, $\varphi_n = 32^\circ$;
- модель откоса с обратным падением слоев, воспроизводящая прочностные свойства по контактам слоев $C_n = 0.20$ МПа, $\varphi_n = 23^\circ$ (слоистый откос “прочный контакт”);
- модель откоса с обратным падением слоев, воспроизводящая прочностные свойства по контактам слоев $C_n = 0.07$ МПа, $\varphi_n = 19^\circ$ (слоистый откос “слабый контакт”).

Моделирование открытой отработки месторождения проводилось путем последовательной поэтапной выемки блоков до полного обрушения модели откоса. Схема извлечения блоков горной массы при моделировании с обратной слоистостью откосов (модель “слабый контакт”) показана на рис. 2. После каждого этапа выемки блоков осуществлялась фото- и видеосъемка.

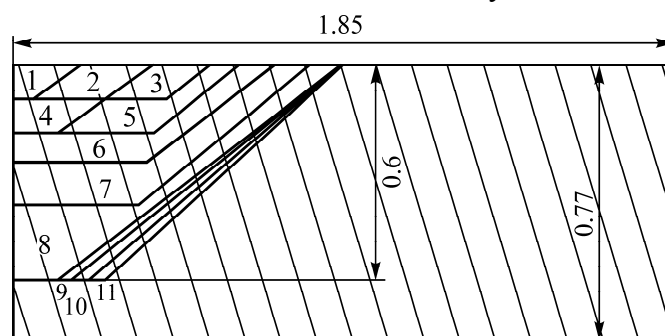


Рис. 2. Общая схема отработки модели “слабый контакт”

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе обработки полученных при моделировании данных выявлены особенности деформирования откосов от первичных проявлений смещений до резких скачков деформаций и полной потери устойчивости. Проанализированы механизмы их обрушения и рассчитаны устойчивости откосов методом алгебраического сложения сил для всех моделей на каждом этапе обработки. Результаты переведены для натуральных условий.

После обработки материалов фотосъемки с помощью специального программного обеспечения ТЕМА Motion 2D определены смещения в теле модели на каждом этапе моделирования. Результаты максимальных общих смещений в пересчете на массив Δl и расчетные коэффициенты запаса устойчивости n на каждом этапе всех моделей приведены в табл. 2. Расчет коэффициентов запаса для всех случаев выполнялся по модели разрушения изотропного массива.

ТАБЛИЦА 2. Максимальные смещения и коэффициенты запаса устойчивости

Изотропный откос			Слоистый откос “слабый контакт”			Слоистый откос “прочный контакт”		
Этап	n	Δl , м	Этап	n	Δl , м	Этап	n	Δl , м
1	2.60	0.07	1	2.48	0.40	1	2.41	0.12
2	2.34	0.13	2	2.48	0.42	2	2.36	0.26
3	2.17	0.19	3	2.44	0.28	3	2.18	0.11
4	1.68	0.11	4	2.32	0.77	4	2.08	0.11
5	1.47	0.09	5	2.28	0.62	5	1.64	0.12
6	1.33	0.19	6	1.76	0.97	6	1.47	0.15
7	1.28	0.04	7	1.43	2.90	7	1.34	0.80
8	1.12	4.57	8	1.36	10.24	8	1.31	1.97
9	1.00	186.99	9	1.32	6.47	9	1.19	1.26
—	—	—	10	1.24	22.20	10	1.09	205.47
—	—	—	11	1.18	62.40	—	—	—

Наблюдения показали, что разрушение однородного откоса характеризуется классическим сдвижением горной массы по плавной криволинейной поверхности скольжения (рис. 3). Обрушению предшествует резкий скачок деформаций (табл. 2, этап 9).

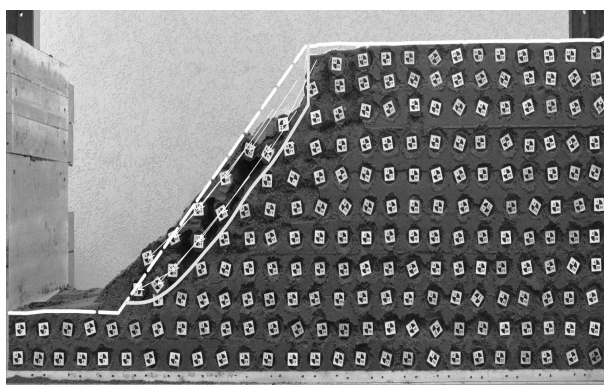


Рис. 3. Разрушение изотропного откоса. Толстая штриховая линия — контур до обрушения откоса, тонкая сплошная — точки обрушения, толстая сплошная — поверхность ослабления, по которой активировался сдвиговой механизм

Деформирование слоистого откоса “слабый контакт” отличается постепенной потерей устойчивости и представляет собой совсем иной механизм, чем резкое обрушение, свойственное изотропному откосу. Разрушению предшествовали резкие скачки деформаций, сопровождающиеся небольшими наклонами слоев, наблюдаемые на этапах 6 и 7. На этапах 8 и 9 процесс деформирования развивался с увеличением интенсивности наклона слоев с нарастающими деформациями, которые на этапах 10–12 трансформировались в полное опрокидывание слоев (рис. 4). Потеря устойчивости слоистого откоса “слабый контакт” произошла на этапе 10 при $n = 1.24$.

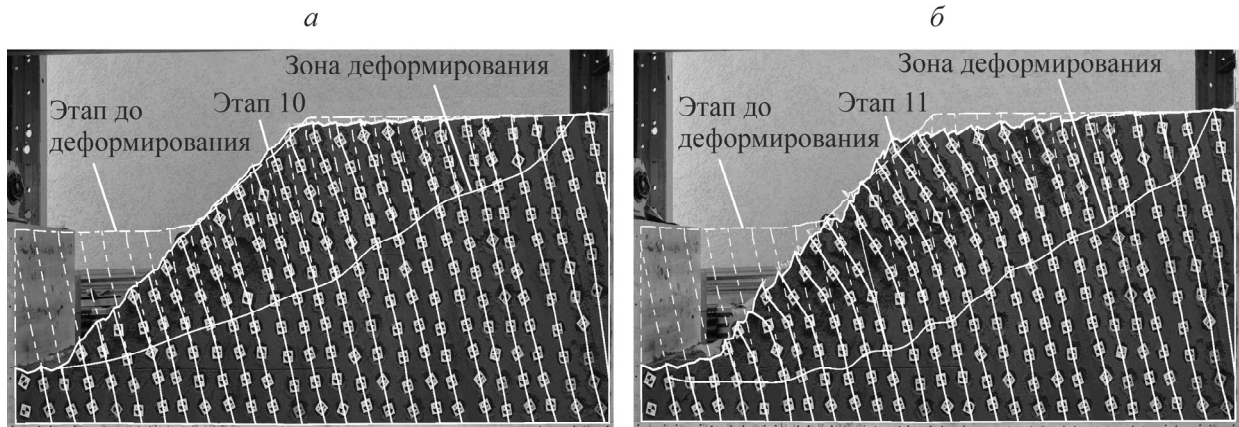


Рис. 4. Механизм опрокидывания слоев на этапе 10 (а) и 11 (б)

В ходе анализа разрушения слоистого откоса “прочный контакт” установлен механизм, совмещающий особенности разрушения изотропного и слоистого откоса “слабый контакт” и представляющий собой изгибы слоев с последующей их подрезкой вкрест наслоения (рис. 5). Разрушению предшествовали резкие скачки деформаций, характеризующиеся небольшими наклонами слоев. Резкие скачки зафиксированы на этапах 7–9, в отличие от разрушения изотропного откоса, где скачок наблюдался на одном этапе перед самым разрушением.

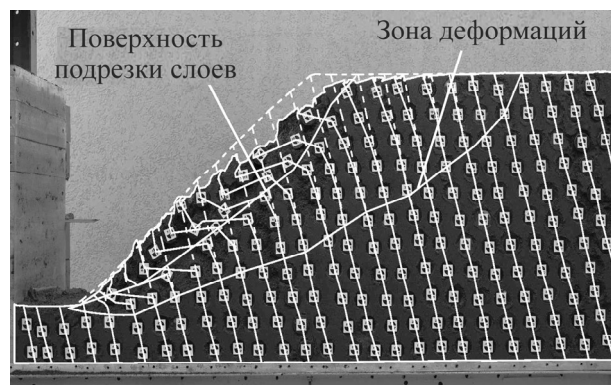


Рис. 5. Механизм деформирования слоистого откоса “прочный контакт”

Исходя из результатов определения коэффициентов запаса и максимальных смещений, а также определения углов наклона откосов, при которых произошла потеря устойчивости, отметим следующие характеристики деформирования и потери устойчивости откосов разного строения:

- изотропный откос: резкий скачок деформаций — $n = 1.12$, $\Delta l_{\max} = 4.57$ м, обрушение откоса — $n = 1.00$, $\Delta l_{\max} = 186.99$ м, угол откоса на момент потери устойчивости — 49° ;
- слоистый откос “слабый контакт”: резкий скачок деформаций — $n = 1.76$, $\Delta l_{\max} = 0.97$, 2.90 м, изгиб слоев — $n = 1.36$, 1.32 , $\Delta l_{\max} = 10.24$, 6.47 м, опрокидывание слоев — $n = 1.24$, 1.18 , $\Delta l_{\max} = 22.20$, 62.40 м, угол откоса на момент потери устойчивости — 39° ;
- слоистый откос “прочный контакт”: резкий скачок деформаций — $n = 1.34$, 1.31 , 1.19 , $\Delta l_{\max} = 0.80$, 1.97 , 1.26 м, разрушение откоса — $n = 1.09$, $\Delta l_{\max} = 205.47$ м, угол откоса на момент потери устойчивости — 44° .

Зависимость максимальных смещений от коэффициента запаса для всех моделей на каждом этапе приведена на рис. 6.

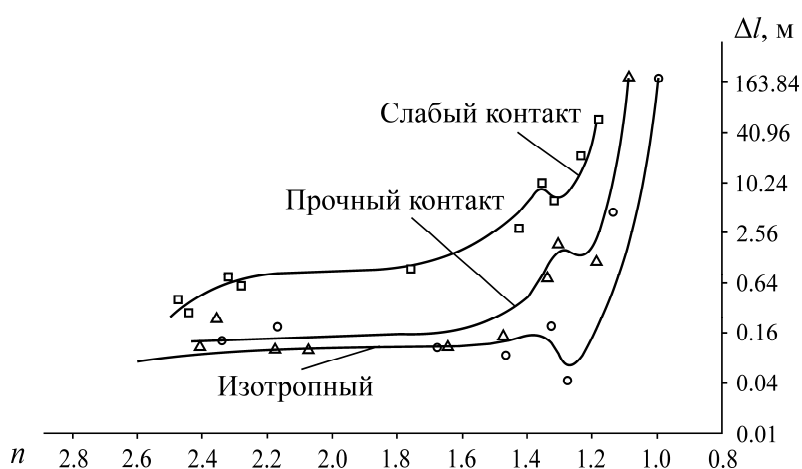


Рис. 6. Зависимость максимальных смещений от коэффициента запаса на каждом этапе обработки (ось Y имеет логарифмический масштаб)

Анализ экспериментальных исследований показал, что различие прочностных свойств на контактах слоев влияет не только на механизм разрушения и предельный устойчивый угол откоса, но и на размер зоны деформирования прибортового массива. Для всех моделей (изотропный откос — этап 7, слоистый откос “слабый контакт” — этап 9 и слоистый откос “прочный контакт” — этап 9) на определенной фазе уменьшения коэффициента запаса наблюдался этап некоторого снижения скоростей смещений, после которого продолжалось ее нарастание вплоть до разрушения откоса. Снижение скорости смещений может быть обусловлено накоплением энергии, вызывающей впоследствии ускорение ее разгрузки, сопровождающееся появлением и прорастанием трещин в массиве. Можно провести аналогию между протеканием данного процесса с явлением сейсмического затишья перед землетрясением.

Для этапов, на которых наблюдалась потеря устойчивости откосов, установлены зависимости изменения величин смещений на верхней площадке (по поверхности модели) до бровки откоса (рис. 7). Зоны деформирования верхней площадки борта для разных механизмов деформирования откосов имеют следующие значения: изотропный откос — $0.7H$; слоистый откос “слабый контакт” — $1.6H$; слоистый откос “прочный контакт” — $1.2H$ (H — высота борта).

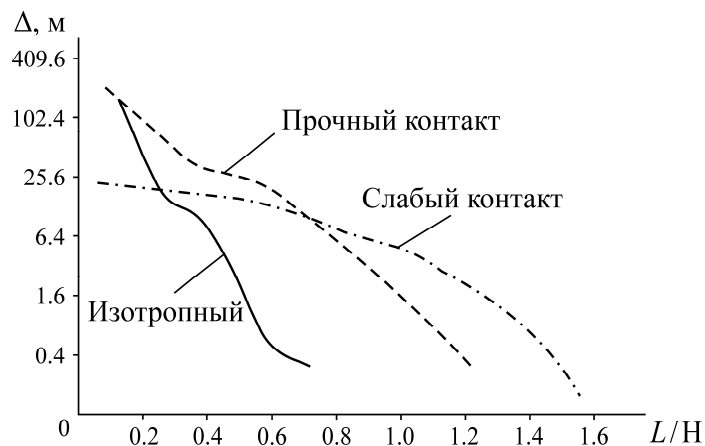


Рис. 7. Распределение смещений по поверхности модели на этапе разрушения откоса: Δ — смещение; L — расстояние точки смещения от поверхности откоса; H — высота откоса; ось Y имеет логарифмический масштаб

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что с помощью физического моделирования методом эквивалентных материалов, современного оборудования и способов обработки результатов можно устанавливать закономерности деформирования бортов карьеров применительно к конкретным горно-геологическим условиям, а также выявлять особенности поведения прибортового массива непосредственно перед обрушением и определять предельный угол борта карьера. По мере приближения откоса к предельному состоянию наблюдается этап снижения скорости смещений в прибортовом массиве, что может быть связано с накоплением упругой энергии, способствующим в дальнейшем ускорению сдвижения, процессов появления и прорастания трещин.

Механизм разрушения откоса с падением слоев в массив в первую очередь определяется прочностью контактов: при прочностных свойствах контактов, приближающихся к прочности основного массива, наиболее вероятно разрушение по плавной криволинейной поверхности скольжения, как у однородного откоса; при менее прочных контактах (“прочный контакт”) — наиболее вероятен механизм разрушения, сочетающий изгибы слоев с их дальнейшей подрезкой по криволинейной поверхности; при еще меньшей прочности контактов (“слабый контакт”) — изгибы слоев с последующим опрокидыванием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. — М.: Недра, 1965. — 378 с.
2. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. — М.: Физматлит, 1960. — 242 с.
3. Галустьян Э. Л. Геомеханика открытых горных работ. — М.: Недра, 1992. — 272 с.
4. Мочалов А. М. Исследование деформаций бортов карьеров при оценке их устойчивости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Л.: ВНИМИ, 1967. — 198 с.
5. Ким Д. Н. Исследование влияния структуры на прочность массива пород и параметры карьеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Свердловск: ВНИМИ, 1970. — 18 с.
6. Певзнер М. Е. Борьба с деформациями горных пород на карьерах. — М.: Недра, 1978. — 255 с.
7. Афанасьев Б. Г. Разработка научных основ расчета устойчивости слоистых прибортовых массивов на угольных разрезах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — СПб.: ВНИМИ, 1992. — 31 с.

8. **Правила** обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. — СПб.: ВНИМИ, 1998. — 208 с.
9. **Новикова Л. К.** Расчет оптимальных параметров бортов угольных разрезов в условиях крутого залегания слоев горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Караганда: КарГТУ, 1994. — 21 с.
10. **Goodman R. E. and Bray J. W.** Toppling of rock slopes, ASCE Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, 1976, Vol. 2. — P. 201–234.
11. **Цирель С. В., Павлович А. А., Зуев Б. Ю., Мельников Н. Я.** Оценка устойчивости бортов карьеров и откосов уступов при крутом несогласном с наклоном борта падении // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ: материалы VIII Междунар. научн.-практ. конф. — СПб.: Горн. ун-т, 2017. — С. 171–182.
12. **Guidelines** for open pit slope design, Editors John Read, Peter Stacey, CRC Press, Balkema, 2009. — 509 p.
13. **Mwango Bowa V., Xia Y., and Yan M.** Toppling of the jointed rock slope with counter-tilted weak planes influenced by the response to local earthquakes, Int. J. Min. and Min. Eng., 2018, Vol. 9, No. 4. — P. 302–320.
14. **Mitani Y., Esaki T., and Cai Y.** A numerical study about flexure toppling phenomenon on rock slope. Numerical modeling of discrete materials in geotechnical engineering, Civil Engineering, and Earth Sciences Conference, 2004. — P. 235–241.
15. **Zheng Y., Chen C., Liu X. W., and Shen Q.** Stability analysis of rock slopes against sliding or flexural-toppling failure, Bulletin of Engineering Geology and Environment, 2018, Vol. 77, No. 4. — P. 1383–1403.
16. **Sun C., Chen C., Zheng Y., Xia K., and Zhang W.** Topping failure analysis of anti-dip bedding rock slopes subjected to crest loads, World Academy of Science, Engineering and Technology Int. J. of Geotech. and Geol. Eng., 2018, Vol. 12, No. 11. — P. 670–678.
17. **Цирель С. В., Павлович А. А.** Проблемы и пути развития методов геомеханического обоснования параметров бортов карьеров // Горн. журн. — 2017. — № 7. — С. 39–45.

Поступила в редакцию 10/IV 2019

После доработки 10/IV 2019

Принята к публикации 28/V 2019