УДК [622.271.33:624.131.537].001.57

А.С. Ковров

ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ОБВОДНЕННОСТИ МАССИВА ПОРОД НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ КАРЬЕРОВ

Выполнено моделирование устойчивости борта карьера на Вольногорском горно-металлургическом комбинате в программе Phase2 по критерию Кулона-Мора. Определены коэффициенты запаса устойчивости откосов карьера с учетом сложной структуры массива пород и влияния гидрологических факторов.

Ключевые слова: устойчивость откосов карьеров, метод конечных элементов, коэффициент снижения прочности на сдвиг, критерий прочности Кулона-Мора.

Введение

Управление природными и техногенными массивами при открытой разработке месторождений полезных ископаемых заключается в совокупности мероприятий по поддержанию уступов, бортов карьеров и отвалов в устойчивом состоянии путем изменения в процессе разработки геометрических параметров откосов, обеспечивающих экономичное и безопасное ведение горных работ [1]. При этом учитываются изменяющиеся в пространстве физико-механические свойства и структурные особенности массива пород, гидрогеологические и техногенные факторы.

Критерием оценки состояния как природных, так и техногенных массивов, в общем случае, является коэффициент запаса устойчивости (КЗУ). В наиболее общем виде, применительно к оценке устойчивости открытых горных выработок, величину КЗУ можно представить как отношение интегралов удерживающих и сдвигающих сил по предполагаемой линии (поверхности) скольжения.

Обоснование уменьшения коэффициента запаса устойчивости бортов карьера только на 5%, в конечном итоге, может позволить уменьшить объем извлекаемой горной массы и площадь карьера от 1,5 до 20% в зависимости от горно-геологических условий разработки (при сохранении объемов извлекаемого полезного ископаемого) [2]. Также известно, что на карьерах с глубиной до 300 м увеличение результирующего угла наклона борта на 3–4° позволяет сократить объем вскрыши до 10–11 млн м^3 на 1 км фронта работ, что повышает общую эффективность открытой разработки [3].

Особую важность проблема устойчивости откосов и бортов карьеров приобретает при отработке массивов мягких вскрышных пород. Так, например, разработка россыпных месторождений титано-циркониевых руд, являющихся ценным стратегическим сырьем Украины, осложняется комплексом геологических, гидрогеологических и техногенных факторов, влияющих на режим ведения горных работ. Наиболее мощное россыпное комплексное рутил-циркон-ильменитовое Малышевское месторождение разрабатывает Вольногорский горно-металлургический комбинат (г. Вольногорск, Украина). Технологической особенностью данного месторождения является сложный и изменчивый характер горно-геологических условий разработки, а с учетом гидрогеологических условий возникает опасность образования сдвигов пород вскрыши.

Целью данной работы является оценка устойчивости откосов борта карьера № 7 «Север» для условий Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения в программе конечно-элементного анализа Phase2. Для ее выполнения поставлены следующие задачи:

1. Определить коэффициент запаса устойчивости борта карьера с учетом сложной структуры массива пород по критерию Кулона-Мора.

2. Оценить влияние гидрогеологических показателей на устойчивость откосов.

Изложение основного материала. Вскрышные породы месторождения представлены пестрыми сарматскими зеленовато-серыми глинами и четвертичными красно-бурыми глинами, красно-бурыми и лессовидными суглинками. Характеристика вскрышных пород карьера № 7 «Север» Малышевского месторождения представлена в таблице.

Значения пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение определены для каждой литологической разности по формулам (1) и (2):

$$\sigma_p = 2Ctg\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

$$\sigma_{сж} = 2Ctg\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right), \quad (2)$$

где C – сцепление пород в массиве, МПа; φ – угол внутреннего трения, град [3].

Глины месторождения являются водоупором и повышают влажность вышележащих красно-бурых суглинков, что способствует возникновению зон ослабления с последующим развитием деформаций уступов карьера.

Рудный пласт имеет мощность 2,0–24,0 м, сложен мелкими и тонкозернистыми песками и в водонасыщенном состоянии может обладать плывунными свойствами [5]. Средняя мощность вскрышных пород составляет 45 м.

Физико-механические характеристики пород [4]

Наименование вскрышных пород и их мощность	**Средняя мощность слоя h_i, м**	**Плотность γ, кг/м^3**	**Сцепление С, МПа**	**Угол внутр. трения φ, град**	**Предел прочности на сжатие/растяжение $\sigma_{сж.}/\sigma_р$, МПа**
Суглинки буровато-серые (0–5 м)	3	1,68	0,011	14	0,028 0,017
Суглинки палевые, местами бурые (0–12 м)	8	1,87	0,009	19	0,025 0,013
Суглинки желто-бурые (0–14 м)	8	1,955	0,0175	21	0,051 0,024
Суглинки красно-бурые (0–7 м)	6	1,89	0,029	14	0,074 0,045
Глины красно-бурые (0–20 м)	10	1,895	0,073	10,5	0,176 0,121
Глины серовато-бурые (0–10 м)	5	1,79	0,059	15	0,154 0,091
Глины зелено-серые (0–5 м)	5	2,2	0,0975	31	0,345 0,110
Пески (0–78 м) рудные нерудные	–	 1,58 1,72	 0,015 0,005	 32 30	 0,054 0,017

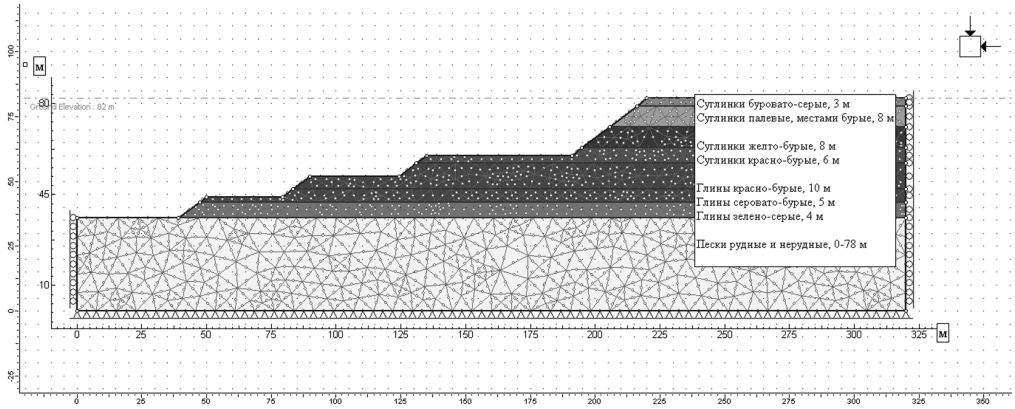

Рис. 1. Профиль борта карьера № 7 «Север»

Передовой вскрышной уступ, мощностью 22 м, отрабатывается вскрышным комплексом ТК-2 в составе роторного экскаватора KU-800, двух забойных, магистрального и отвального конвейеров, перегружателя PVZ-6600, отвалообразователя ZP-6600 с отсыпкой вскрыши в выработанное пространство. Ниже расположены три вскрышных уступа, мощностью по 8 м, которые отрабатываются экскаваторами ЭКГ-8(10)И по транспортной системе с погрузкой в автосамосвалы БелАЗ-7548 и вывозкой породы во внутренний отвал [4].

Для оценки устойчивых параметров откосов на карьере № 7 «Север» в программе конечно-элементного анализа Phase2 были заданы геометрические параметры борта (рис. 1) и заданы физико-механические характеристики сложноструктурного массива пород согласно данным таблицы. Принимаем следующие параметры эластичности пород: модуль Юнга – 20 МПа; коэффициент Пуассона – 0,35 для суглинков и 0,43 – для четвертичных глин. В качестве критерия прочности был выбран критерий Кулона-Мора, наиболее часто используемый для оценки прочности грунтов и мягких пород.

Результаты моделирования устойчивости откосов необводненного сложноструктурного массива представлены на рис. 2.

Откос верхнего вскрышного уступа находится в относительно устойчивом состоянии (КЗУ = 1,11), однако по-

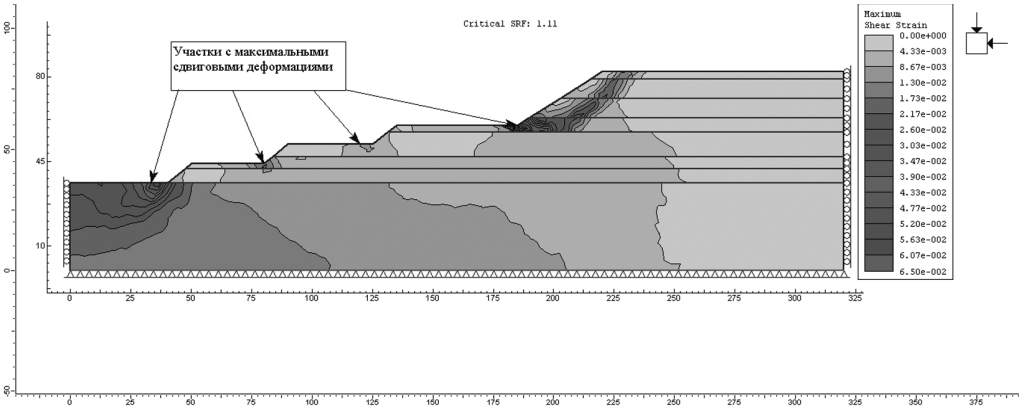

Рис. 2. Максимальные сдвиговые деформации откосе

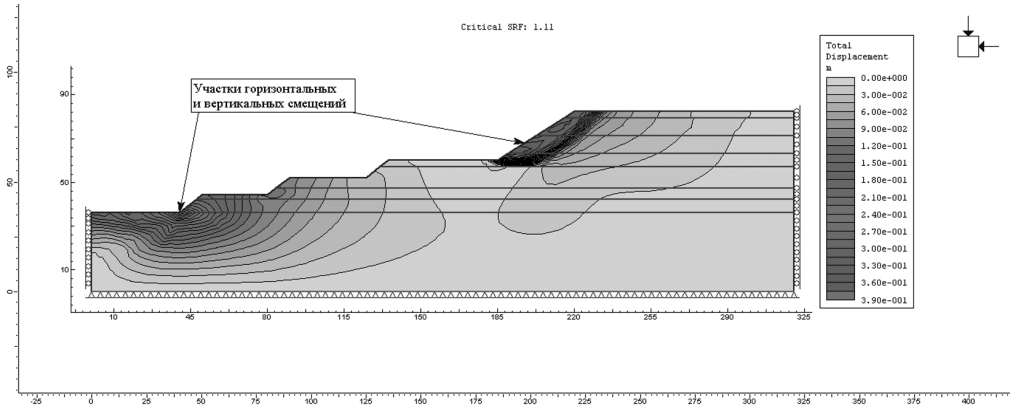

Рис. 3. Смещения в необводненном массиве (КЗУ = 1,11)

лученного значения КЗУ может оказаться недостаточно для обеспечения устойчивости откоса, если учитывать в условиях моделирования влияние таких факторов, как гидрогеологические характеристики месторождения или внешние нагрузки оборудования на уступах.

Сочетанное действие этих факторов вместе с геологическими особенностями массива может существенно снижать сопротивление пород сдвигу. Поэтому, для бортов, сложенных мягкими породами, рекомендуемые значения КЗУ варьируют в диапазоне 1,1–1,3.

Верхние четыре слоя четвертичных суглинков при заданных условиях моделирования наиболее подвержены сдвиговым деформациям. Нижележащие слои глин как более плотные, в меньшей степени подвержены геомеханическим нарушениям.

Наибольшие деформации наблюдаются на уровне нижней бровки верхнего вскрышного уступа в слое красно-бурых суглинков ($\varepsilon_{max} = 6{,}2 \cdot 10^{-2}$), а также на расстоянии 4,3 м от подошвы самого нижнего вскрышного уступа ($\varepsilon_{max} = 5{,}6 \cdot 10^{-2}$), на границе зелено-серых глин с рудными песками. Аналогичным участкам прибортового массива соответствуют зоны максимальных горизонтальных и вертикальных смещений пород (рис. 3).

В верхнем вскрышном уступе максимальные смещения ($d_{max} = 0{,}36$ м) возникают в верхних слоях палевых и желто-бурых суглинков. В самом ниж-

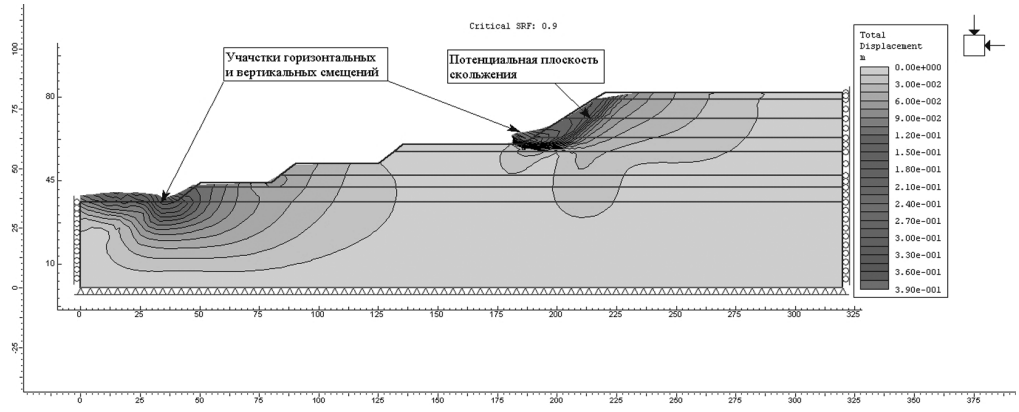

Рис. 4. Смещения в обводненном массиве (КЗУ = 0,9)

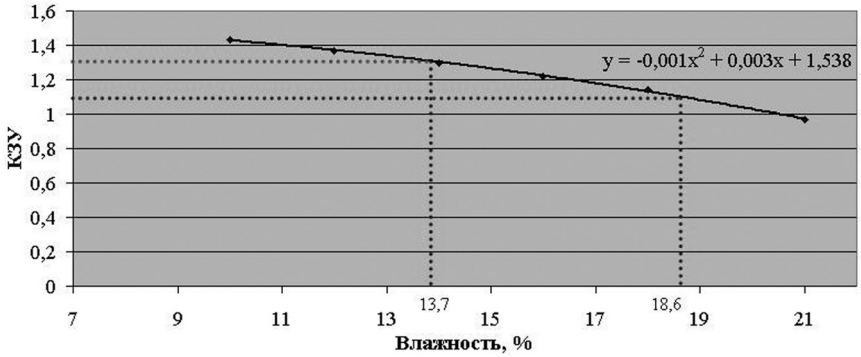

Рис. 5. Зависимость КЗУ от влажности вмещающих пород (суглинков)

нем добычном уступе участок максимальных смещений (d_{max} = 0,3 м) находится на уровне нижней бровки.

Гидрогеологические условия месторождения характеризуются наличием двух водоносных горизонтов. Верхний приурочен к лессовидным суглинкам, имеет мощность 5–13 м, характеризуется низкими значениями коэффициента фильтрации (до 0,2–0,3 м^3/сут), малой водообильностью. Нижний водоносный горизонт приурочен к тонкозернистым пескам полтавского горизонта.

Используя результаты зависимостей физико-механических характеристик суглинков от степени их влажности [6], можно определить коэффициент запаса устойчивости откосов с учетом обводненности горного массива по следующим уравнениям:

$$\varphi = -0,06W_0^2 + 0,12W_0 + 39,86\,, \qquad (3)$$

$$C = 0,07W_0^2 - 3,87W_0 + 58,78\,, \qquad (4)$$

где φ – угол внутреннего трения, град.; W_0 – влажность, %, C – сцепление, кПа. По результатам моделирования откоса для обводненного массива КЗУ равен 0,9 (рис. 4).

Максимальные смещения в обводненном массиве достигают значений d_{max} = 0,3 м, что обусловливает возникновение призмы обрушения.

На основании имеющихся и полученных закономерностей устойчивости обводненных откосов получена общая зависимость устойчивости прибортового массива от влажности вмещающих пород (суглинков), изображенная на рис. 5.

Зависимость имеет следующий вид:

$$КЗУ = -0,001W_0^2 + 0,003W_0 + 1,538\,, \qquad (5)$$

где W_0 – влажность пород, %.

Вывод

Для обеспечения устойчивости откосов верхних вскрышных уступов рассматриваемого карьера № 7 «Север» Вольногорского горно-металлургического комбината, сложенных суглинками, влажность пород не должна превышать 13,7–18,6%. При этом обеспечивается КЗУ в диапазоне 1,1–1,3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астафьев Ю.П., Попов Р.В., Николашин Ю.М.* Управление состоянием массива горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. – Киев; Донецк: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 272 с.

2. *Прогноз* устойчивости и оптимизация параметров бортов глубоких карьеров / Под общ. ред. С.З. Полищука. – Днепропетровск: Изд-во «Полиграфист», 2001. – 370 с.

3. *Шапарь А.Г.* Механика горных пород и устойчивость бортов карьеров. – Киев: Вища школа, 1973. – 120 с.

4. *Собко Б.Е.* Усовершенствование технологии открытой разработки россыпных титано-цирконievых руд: Монография. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2008. – 167 с.

5. *Гамалинский А.И., Гамалинский И.А., Терещенко В.В.* Выбор и обоснование технологических схем вскрытия и разработки Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения в сложных горно-геологических условиях // Науковий вісник НГУ, 2009. – № 12. – С. 36–42.

6. *Деревягина Н.И.* Исследование влияния физического состояния лессовых грунтов на их механические свойства в условиях объемно-напряженного состояния / Материалы VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований» / Под ред. Л.И. Зеленской. – Днепропетровск: ІМА-прес, 2010. – Вып. 7. – С. 72–74. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Ковров Александр Станиславович – кандидат технических наук, доцент,
Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина,
e-mail: kovrov@rambler.ru, kovrova@nmu.org.ua.

UDC [622.271.33:624.131.537].001.57

EFFECT OF COMPLEX GEOLOGY STRUCTURE AND WATER CONTENT OF ROCK MASS ON PIT WALL STABILITY

Kovrov A.S., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: kovrov@rambler.ru, kovrova@nmu.org.ua,
National Mining University, 49005, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Modeling of stability of open pit walls at Volnogorsky Mining and Metallurgy Integrated Works is performed based on Mohr–Coulomb criterion using Phase2 code. Stability factors are determined for pit walls, considering complex structure and hydrological characteristics of rocks.

Key words: pit wall stability, finite element method, shear strength reduction coefficient, Mohr–Coulomb criterion.

REFERENCES

1. Astaf'ev Yu.P., Popov R.V., Nikolashin Yu.M. *Upravlenie sostoyaniem massiva gornykh porod pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* (Ground control in open pit mineral mining), Kiev, Donetsk, Vishcha shk. Golovnoe izd-vo, 1986, 272 p.

2. *Prognoz ustoychivosti i optimizatsiya parametrov bortov glubokikh kar'erov*. Pod red. S.Z. Polishchuka (Stability prediction and optimization of deep pit wall parameters. Polishchuk S.Z. (Ed.)), Dnepropetrovsk, Izd-vo «Poligrafist», 2001, 370 p.

3. Shapar' A.G. *Mekhanika gornykh porod i ustoychivost' bortov kar'erov* (Rock mechanics and pit wall stability), Kiev, Vishcha shkola, 1973, 120 p.

4. Sobko B.E. *Usovershenstvovanie tekhnologii otkrytoy razrabotki rossypnykh titano-tsirkonievykh rud*: Monografiya (Improvement of open pit mining technology for titanium–zirconium placers. Monograph), Dnepropetrovsk, NGU, 2008, 167 p.

5. Gamalinskiy A.I., Gamalinskiy I.A., Tereshchenko V.V. *Naukoviy visnik NGU*, 2009, no 12, pp. 36–42.

6. *Derevyagina N.I. Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Geografiya, geoekologiya, geologiya: opyt nauchnykh issledovaniy»*. Pod red. L.I. Zelenskoy. Vyp. 7 (Proceedings of VII International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists «Geography, Geoecology, Geology: Scientific Research Experience», Zelenskaya L.I. (Ed.), issue 7), Dnepropetrovsk, IMA-pres, 2010, pp. 72–74.