

А. С. Ковров /к. т. н./

Государственное высшее учебное заведение
«Национальный горный университет»,
г. Днепро, Украина

Е. В. Бабий /к. т. н./, Е. А. Бубнова /к. т. н./

Институт геотехнической механики
им. Н. С. Полякова НАН Украины, г. Днепро,
Украина

Геомеханическая оценка устойчивости внутреннего отвала на подработанном основании борта карьера

O. S. Kovrov /Cand. Sci. (Tech.)/

State Higher Educational Institution «National
Mining University», Dnipro, Ukraine

Ye. V. Babiy /Cand. Sci. (Tech.)/

Ye. A. Bubnova /Cand. Sci. (Tech.)/

Institute of geotechnical mechanics named after
M. S. Polyakov of the NAS of Ukraine, Dnipro,
Ukraine

Geomechanical assessment of the stability of internal dump on worked up foundation of the open pit edge

Цель. Оценка устойчивости внутреннего отвала возводимого на подработанном борте Первомайского карьера СевГЭК с учетом геометрических параметров, физико-механических характеристик пород и сейсмических воздействий от массовых взрывов.

Методика. Для исследования геомеханической устойчивости борта карьера при отработке месторождения использованы данные инженерно-геологических изысканий, технологические схемы ведения открытых горных работ, маркшейдерская съемка. Для численного моделирования устойчивости откосов внутреннего отвала и борта карьера применена программа конечно-элементного анализа Phase2 компании Rocscience Inc. версии 7.0.

Результаты. Выполнена геомеханическая оценка устойчивости внутреннего отвала возводимого на юго-западном борту карьера с учетом сложной структуры, свойств пород и сейсмических воздействий от массовых взрывов. Для трёхъярусного отвала рассчитаны коэффициенты запаса устойчивости с учетом сейсмических нагрузок от массовых взрывов на карьере в диапазоне 0,00625–0,1 g, что соответствует магнитуде 3–7 баллов. Выполнена оценка потенциального влияния погашенных подземных горных выработок на устойчивость внутреннего отвала.

Научная новизна. Установлено, что максимальные потенциальные смещения массива вблизи погашенных подземных выработок в борте карьера достигают $U_{xy} = 7,6-22,0$ м, а на поверхности отсыпанного отвала может образоваться масштабная просадка пород размерами до 50–60 м в диаметре и до 4 м в глубину. Сейсмические воздействия от массовых взрывов на карьере выступают в качестве триггерного фактора геомеханических нарушений.

Практическая значимость. Результаты численного моделирования устойчивости внутреннего отвала на подработанном основании борта карьера могут учитываться в проектах развития горных работ с целью обеспечения безопасности технологии открытых горных работ и внутреннего отвалообразования. (Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.)

Ключевые слова: устойчивость бортов карьеров и отвалов, внутренний отвал, максимальные смещения массива пород, коэффициент запаса устойчивости, сейсмическое воздействие, критерий разрушения Кулона-Мора.

Актуальность работы. Геомеханическая оценка устойчивости горнотехнических объектов, таких как откосы уступов и бортов карьеров и отвалов, является актуальной технологической задачей при ведении открытых горных работ. Особую важность данная задача приобретает при комбинированном способе разработки месторождений полезных ископаемых в сложных

горно-геологических условиях. Постоянный геомеханический мониторинг устойчивости откосов на карьере обусловлен необходимостью обеспечения безопасности технологических операций с учетом физико-механических свойств пород, их обводненности, статических и динамических нагрузок горнотранспортного оборудования и сейсмических воздействий.

При комбинированном способе разработки месторождений полезных ископаемых формируется сложная геомеханическая система, характерной особенностью которой является разнообразное воздействие ряда факторов естественного и техногенного происхождения. На напряженно-деформированное состояние горного массива одновременно влияют технологические операции открытых и подземных горных работ. При отработке верхней части залежи открытым способом и доработки месторождения подземным способом возникает ряд проблем, главными из которых являются осложнение поддержания бортов карьера в устойчивом состоянии из-за наличия и постоянного наращивания пустот под бортом и под дном карьера и обеспечения устойчивости подземных сооружений, подвергающихся влиянию открытых горных работ.

Опыт эксплуатации месторождений полезных ископаемых и строительства различных сооружений показывает, что явления и процессы, происходящие в массиве горных пород (как и условия, в которых они совершаются), сложны и разнообразны. Попытки разработать обобщенную теорию с использованием современных представлений физики и механики не дали удовлетворительных результатов. Предложенные методы решения геомеханических задач не отражают всего многообразия факторов и особенностей их влияния на конечные результаты процессов в массиве пород. В этом случае многое зависит от правильности выбора модели (математической или физической) изучаемой среды или условий задачи [1].

Учитывая особенности комбинированного способа разработки, создание насыпных массивов вскрышных пород в виде внешних или внутренних отвалов требует детальных инженерно-геологических расчетов и геомеханической оценки для обеспечения безопасной эксплуатации горных работ.

Целью исследования является оценка устойчивости внутреннего отвала с учетом геометрических параметров, физико-механических характеристик пород и сейсмических воздействий от массовых взрывов на Первомайском карьере СевГОК (Кривбасс, Украина).

В ходе выполнения работы поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать горнотехнические и геологические условия участка разработки месторождения, изучить физико-механические свойства вмещающих горных пород вскрыши.

2. Выполнить геомеханическую оценку устойчивости внутреннего отвала возводимого на нерабочем борту карьера с учетом сложной структуры, свойств пород и учетом сейсмических воздействий от массовых взрывов.

3. Оценить потенциальное влияние погашенных подземных горных выработок на устойчивость внутреннего отвала, отсыпанного на подработанном основании борта карьера.

Методология. Для исследования геомеханической устойчивости борта карьера при отработке месторождения использованы данные инженерно-геологических изысканий, технологические схемы ведения открытых горных работ, маркшейдерская съемка.

Для численного моделирования устойчивости откосов внутреннего отвала и борта карьера применена программа конечно-элементного анализа Phase2 компании Rocscience Inc. версии 7.0. Программа позволяет выполнять анализ устойчивости откосов методом конечных элементов и вычислять критический коэффициент снижения прочности КСП, который по своему смыслу является эквивалентным коэффициенту запаса устойчивости откоса (КЗУ). Алгоритм расчета коэффициента устойчивости массива включает итерационное вычисление прочностных характеристик во всех элементах массива посредством поэтапного нагружения модели, в результате чего напряжения в откосе достигают предела прочности на сдвиг и возникает сдвижение пород (оползень). Процесс вычислений КСП повторяется до момента потери откосом устойчивого состояния и КЗУ графически выражается в виде наиболее вероятной линии скольжения, по которой происходит сдвижение массива. Если $KЗУ > 1$, то откос находится в устойчивом состоянии, а при $KЗУ \leq 1$ возникают оползневые процессы.

Максимальные сдвиговые деформации в Phase2 рассчитываются по следующему выражению:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2},$$

где ε_1 и ε_3 – наибольшие и наименьшие главные деформации, которые для плоской задачи соответствуют значениям наибольшего и наименьшего напряжений σ_1 и σ_3 .

Сейсмические воздействия на массив в программе Phase2 задаются посредством безразмерных сейсмических коэффициентов в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Обзор выполненных исследований. Вопросы устойчивости подрабатываемых откосов уступов карьеров и отвалов рассматриваются в контексте конкретной технологии комбинированной разработки с учетом влияния наиболее значимых факторов, к которым относят горно-геологические условия месторождения, его обводненность, статические и динамические нагрузки, сейсмические воздействия и др. [2].

Для целостной оценки устойчивости однородных откосов необходимо учитывать наличие в

массиве трещин или других нарушений сплошности среды [3], а также уровень грунтовых вод и обводненность массива пород, что существенно влияет на коэффициент запаса устойчивости [4; 5].

Устойчивость насыпных массивов в зоне ведения открытых разработок также является актуальной технической задачей. Так, например, при сооружении насыпи для конвейеров циклично-поточной технологии (ЦПТ) скальных пород вскрыши в Первомайском карьере СевГОК имели место оползневые процессы на рабочем борту карьера вследствие гидродинамических и сейсмических воздействий [6].

Подземные горные выработки, как в процессе эксплуатации, так и после погашения и закладки выработанного пространства, могут оказывать значительное влияние на напряженно-деформированное состояние горных пород, вплоть до земной поверхности. Так, деформации массива пород вокруг очистных камер при отработке рудных месторождений носят сложный нелинейный характер и могут распространяться на значительные расстояния в зависимости от геометрических параметров и глубины закладки камер [7].

В работе [8] приведена оценка устойчивости подрабатываемых откосов при разработке золоторудных месторождений глубокого залегания и крутого падения со сложным тектоническим строением расположенных в сейсмоактивных зонах на примере месторождения Мурунтау. Показано, что сейсмические воздействия как естественного, так и искусственного происхождения, могут инициировать масштабные оползневые процессы в массиве за счет развития трещиноватости.

Устойчивость внутренних и внешних отвалов вскрышных пород в значительной степени зависит от сейсмических воздействий. Массовые взрывы на карьере выступают в качестве триггерного фактора, инициируя деформации в прибортовом массиве и активизацию оползневых процессов [9].

Несмотря на большой объем выполненных ранее исследований, практически отсутствуют работы по методике комплексной оценки месторождений, отрабатываемых открыто-подземным способом, вопросы устойчивости подрабатываемых откосов уступов карьеров и отвалов остаются актуальными.

Исходные данные. Первомайский карьер принадлежит ПАО «Северный горно-обогатительный комбинат» и является крупнейшим в Европе горнодобывающим предприятием по добыче и переработке железорудного концентрата и окатышей. Карьер имеет в длину 3100 м, ширину 2600 м, глубину 475 м при максимальной проектной глубине отработки – 650 м. Нижний его горизонт находится на отметке – 355 м. Транс-

портировка рудной горной массы с нижних горизонтов карьера осуществляется большегрузными автосамосвалами до дробильного узла на горизонте – 115 м, и далее на поверхность конвейером. Скальные вскрышные породы транспортируют автомобильно-железнодорожным транспортом. В настоящее время производственная мощность карьера определена на уровне 23,0 млн т сырой руды в год.

Для более полного извлечения запасов и восполнения выбывающих мощностей, связанных с отработкой дна, комбинатом в соответствии с проектом ведутся горные работы по расширению северных границ карьера в пределах существующего горного отвода с отработкой запасов северной рудной залежи, попадающих в разнос борта. В соответствии с проектом развития горных работ предусматривается организация складирования вскрышных пород в выработанном пространстве Первомайского карьера, что позволит сократить эксплуатационные затраты на транспортировку горной массы. Проектные решения по формированию временного внутреннего отвала разработаны на основании утвержденного проекта, выполненного ООО «Южгипроруда».

Рациональность размещения временного отвала на юго-западном борту карьера позволит значительно уменьшить дальность транспортировки скальной вскрыши по сравнению с дальностью транспортировки в существующие отвалы. Помимо эффективности технических решений по складированию вскрышных пород в выработанное пространство, улучшается экологическая обстановка района за счет снижения пыления поверхности внешних отвалов.

Основание, на котором предусматривается произвести отсыпку отвала, сложено крепкими скальными породами. Породы, слагающие борт карьера, к которому будет осуществлено примыкание отвала, в интервале отметок +98,0...+53,0 м представлены скальными, полускальными (переходная зона) и мягкими породами.

Предварительно выполненный расчет группы уступов показывает их полную устойчивость, коэффициент устойчивости более 1,2. Потеря устойчивости вышеуказанных уступов не будет происходить по причине пригрузки их скальными породами, отсыпаемыми в тело отвала.

Гидрогеологические условия площадки строительства отвала простые. Имеются незначительные выходы воды из четвертичных отложений, ранее высачивающейся вдоль существующего уступа горизонта +102 м, которые почти полностью перехватываются существующей дренажной системой. Для отвода воды из точки сброса предусматривается строительство дренажной траншеи. В настоящее время гидрозащита кон-

тура карьера сформирована, поэтому защита внутреннего отвала от подтопления не предусматривается.

Временный приконтурный отвал вскрышных пород находится на юго-западном борту Первомайского карьера, вблизи существующих перегрузочных площадок №15, 16 горизонта +53,0 м и занимает площадь 35,0 га (рис. 1). Подошвой отвала является горизонт +53,0 м, сложенный скальными породами с хорошей несущей способностью, поэтому подготовительные работы по подготовке основания не предусматриваются. Верхняя граница отвала проходит по существующему уступу с отметкой +100,0 м сформированного борта карьера (рис. 2).

Ярусы отвала формируются под углами естественных откосов отсыпаемых пород. Рабочие

откосы ярусов отвала формируются под углами естественных откосов отсыпаемой горной массы, и углы в среднем составляют 36–37°. Согласно рекомендациям по повышению устойчивости отвала предусматривается отсыпка трех ярусов: 1-й ярус с отметкой разгрузки +70,0 м, 2-й ярус – +85,0, 3-й ярус – +100,0 м. В конечном положении ярусы примыкают к бортам карьера, образуя ровную поверхность на отметке +100,0 м.

Особенностью рассматриваемого участка для сооружения внутреннего отвала является наличие пустот от погашенных выработок вследствие разработки железорудного месторождения подземным способом шахтой «Красный партизан». Поэтому при определении конечных границ отсыпки временного внутреннего отвала принималось во внимание расположение существующих коммуникаций и наличие зон возможного воронкообразования от подземных пустот, образованных при подземной разработке залежей.

По имеющимся технологическим данным разработка подземным способом была принята камерная с закладкой первичных камер. Размеры камер: высота – 22 м; длина – 40–60 м; ширина – 10 м.

Согласно технико-экономическому обоснованию проекта внутреннего отвала возможные зоны воронкообразования от подземных пустот не являются сдерживающим фактором по причине их незначительной площади. Предполагается, что нагружение земной поверхности отвальной массой в зоне возможного воронкообразования не активизирует развитие процесса сдвижения горных пород.

В настоящее время нет достоверных данных о степени закладки выработанного пространства камер и развития зон трещиноватости и ослабления породного массива. Поэтому уточняющая геомеханическая оценка устойчивости внутреннего отвала с учетом возможных деформаций борта карьера в зоне влияния погашенных подземных

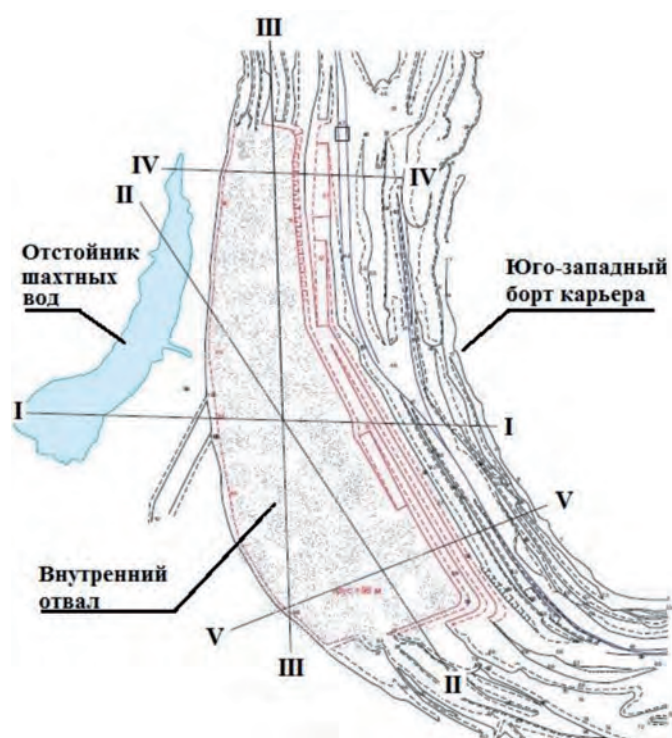


Рис. 1. План внутреннего отвала



Рис. 2. Профиль внутреннего отвала по разрезу I-I

ГОРНОРУДНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

выработок будет целесообразной для технико-экономического обоснования проектных работ.

Результаты. Для оценки устойчивости внутреннего отвала, отсыпаемого на юго-западном борте Первомайского карьера СевГОК в программе конечно-элементного анализа *Phase2* задан геометрический профиль исследуемого объекта. Для вскрышных пород заданы физико-механические характеристики вскрышных пород (табл. 1).

В качестве критерия разрушения для оценки устойчивости насыпи выбран критерий Кулона-Мора. Коэффициент Пуассона μ принимается равным 0,27 – для крупнообломочных грунтов, 0,30 – для песков и супесей, 0,35 – для суглинков и 0,42 – для глин согласно ГОСТ 20276-85 «Грунты. Методы полевого определения характеристик деформируемости».

Для оценки сейсмического воздействия от массовых взрывов на карьере в программе *Phase2* возможно задавать максимальные значения ускорений акселерограмм в диапазоне 0,00625–0,1 (в долях ускорения свободного падения g), что соответствует землетрясению с магнитудой 3–7 баллов.

Анализ устойчивости внутреннего отвала, выполненный по профилям 1-1, 2-2-, 4-4-, 5-5, позволил выявить наиболее уязвимые участки, подверженные деформациям и оползневым процессам, в результате чего были предложены инженерные мероприятия по выбору оптимальных геометрических параметров насыпи отвала.

Более детальная геомеханическая оценка методом численного моделирования позволила определить коэффициенты запаса устойчивости внутреннего отвала с учетом сейсмических нагрузок от массовых взрывов на карьере (рис. 3).

Профиль I-I. Без учета сейсмических воздействий КЗУ = 3,46. Максимальные смещения в откосе отвала достигают 0,56...0,84 м при заданных геометрических параметрах отвала. При сейсмических воздействиях от массовых взрывов от 0 до 7 баллов КЗУ откосов отвала изменяется от 3,46 до 2,3.

Профиль II-II. Без учета сейсмических воздействий КЗУ = 3,36. Смещения в массиве достигают 0,03–0,04 м. При сейсмических воздействиях от массовых взрывов от 0 до 7 баллов КЗУ откосов отвала снижается с 3,36 до 2,46.

Профиль III-III. Без учета сейсмических воздействий КЗУ = 8,19. Максимальные смещения в откосе отвала достигают 0,56...0,84 м при заданных геометрических параметрах отвала. При сейсмических воздействиях от массовых взрывов от 0 до 7 баллов КЗУ откосов отвала изменяется от 8,19 до 4,2.

Профиль V-V. Без учета сейсмических воздействий КЗУ = 2,03. Максимальные смещения в откосе отвала достигают 5,3...7,3 м при заданных геометрических параметрах отвала. При сейсмических воздействиях от массовых взрывов от 0 до 7 баллов КЗУ откосов отвала изменяется от 2,03 до 1,53. Несмотря на высокие значения КЗУ, отвал подвержен деформациям массива в виде осыпей и масштабных оползней.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования устойчивости внутреннего отвала на подработанном борте карьера и развитие возможных деформаций массива пород в зоне влияния погашенных подземных выработок по профилю I-I.

Расчет модели реализуется в 4 этапа с последовательной экскавацией пород и образованием по-

Таблица 1

Физико-механические характеристики вскрышных пород

Наименование инженерно-геологических элементов	Плотность γ , МН/м ³	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , град	Модуль деформации M_d , МПа	Коэффициент Пуассона, μ , безразм.
Почвенно-растительный слой	0,0165	0,005	20	4,7	0,3
Суглинок светло-желтый пылеватый	0,0194	0,027	16	5,6	0,35
Глина красно-бурая	0,0225	0,075	22	10,4	0,3
Глина серо-зеленая	0,022	0,089	28	19,2	0,3
Пески	0,0208	0,008	20	5,6	0,3
Седьмой сланцевый горизонт, магнетит-силикатные и силикат-магнетитовые кварциты	0,0268	30,0	82	5000000	0,2
Гданцевская свита, безрудные кварциты, кристаллические сланцы	0,0268	30,0	85	7000000	0,2
Седьмой железистый горизонт, магнетит-силикатные кварциты	0,0516	90,0	87	7500000	0,2
Техногенный слой, насыпь	0,025	0,1	35	108	0,27
Техногенный слой, тело внутреннего отвала	0,025	0,01	32	30	0,27

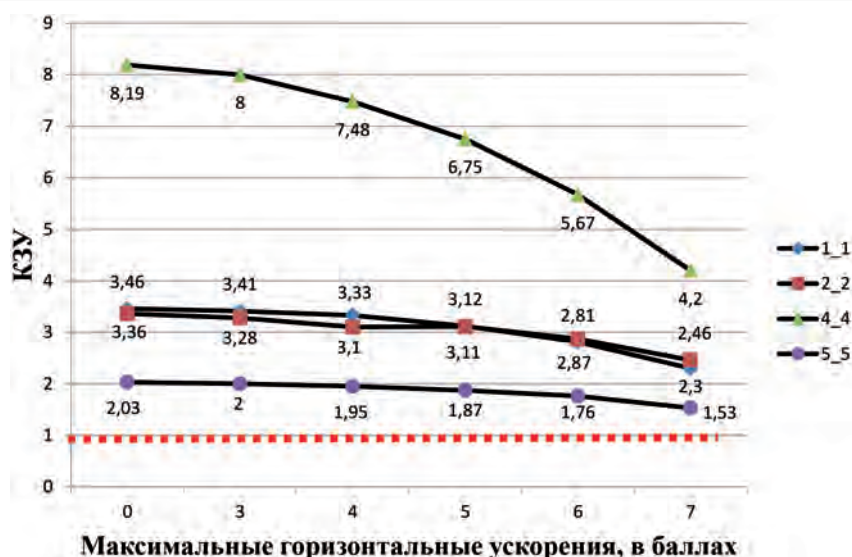


Рис. 3. Зависимость коэффициента запаса устойчивости отвала по профилям от сейсмических воздействий при массовых взрывах на карьере

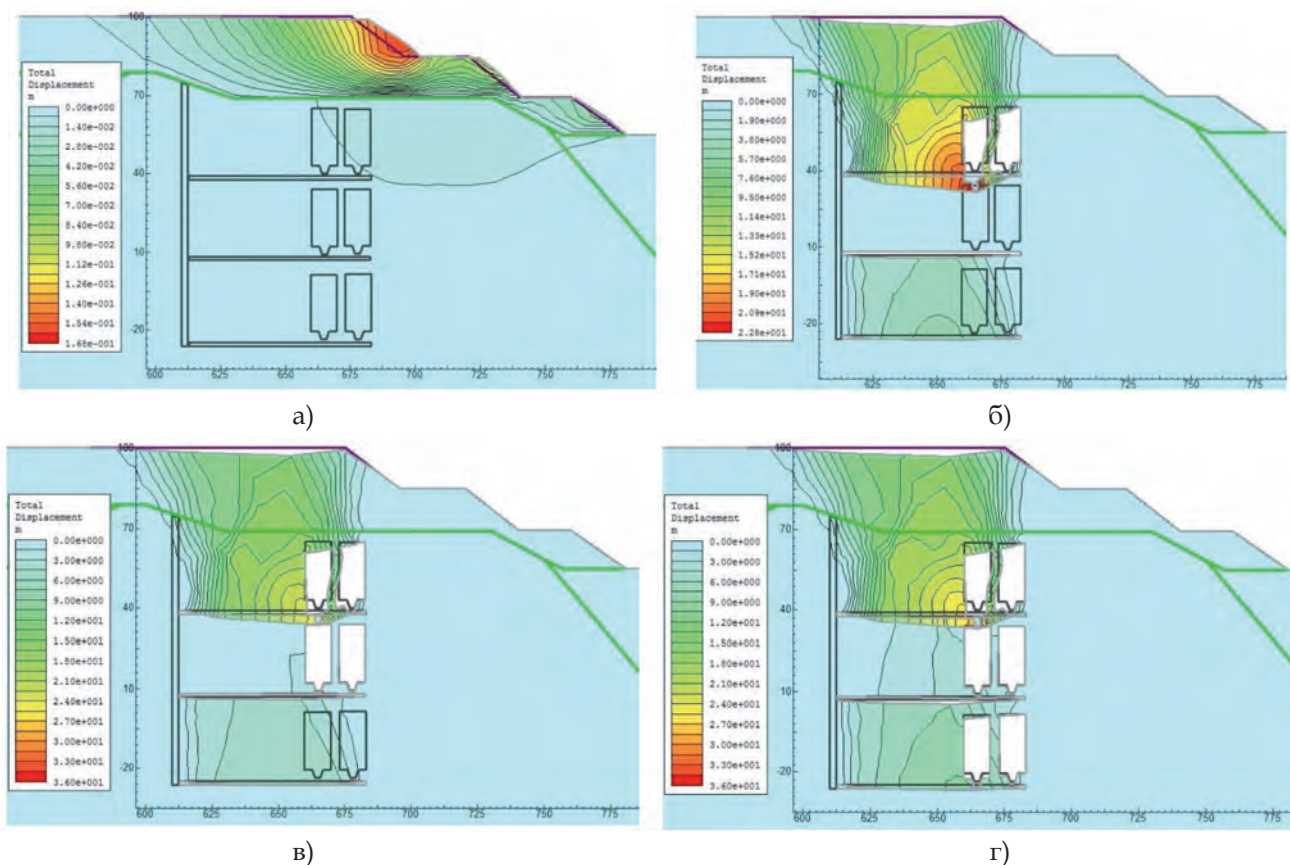


Рис. 4. Максимальные смещения массива пород по профилю I-I

лостей прямоугольного сечения, имитирующих камерный способ разработки рудных месторождений. Предполагается, что подземные горные выработки располагаются этажами в гданцевской свите безрудных кварцитов и кристаллических сланцев. В настоящее время нет достоверных данных о степени заполнения выработанного пространства вскрышными породами, поэтому в данной задаче камеры рассматриваются как ряд

полых выработок в упруго деформированном массиве. Согласно исходным данным первый этаж подземных выработок с кровлей на отметке +65,0 м проходит близко от верхней границы пород гданцевской свиты. Плоская поверхность этого геологического горизонта на отметке +70,0 м является основанием внутреннего отвала.

Без учета влияния этих выработок существенных просадок сформированной поверхности

внутреннего отвала не наблюдается (рис. 4а). Максимальные смещения массива в виде осыпей верхнего откоса достигают $U_{xy} = 0,14-0,16$ м.

При учете камерной отработки первого этажа подземных выработок возникают существенные деформации массива, а максимальные смещения вокруг камер достигают $U_{xy} = 7,6-19,0$ м, что сопоставимо с их размерами. Нарушение массива распространяется на сформированную поверхность внутреннего отвала в виде масштабной просадки размерами до 50–60 м в диаметре и до 4 м в глубину (рис. 4б). Также вероятны незначительные деформации откоса первого уступа отвала, однако их развитие происходит в противоположном направлении от выработанного пространства карьера.

Картина деформаций массива пород с учетом выработанного пространства камер первого и второго этажей существенно не меняется. Максимальные смещения возникают вокруг камер первого этажа и достигают значений $U_{xy} = 18,0-20,0$ м и на второй этаж не распространяются (рис. 4в). Если учесть наличие полости от всех подземных выработок, то смещения вокруг камер первого этажа достигают $U_{xy} = 19,0-22,0$ м, а вокруг выработок третьего этажа – $U_{xy} = 3,0-6,0$ м (рис. 4г).

Следует отметить, что рассмотренный выше сценарий развития деформаций и смещений пород внутреннего отвала на подработанном борте карьера может иметь место при соблюдении двух следующих условий: камеры подземных выработок полые без закладочного материала и наличие триггерного фактора в виде сейсмических воздействий от массовых взрывов на карьере.

Выводы. В работе выполнена геомеханическая оценка устойчивости внутреннего отвала, возводимого на нерабочем борту карьера с учетом сложной структуры, свойств пород и учетом сейсмических воздействий от массовых взрывов. Согласно рекомендациям по повышению устойчивости отвала предусматривается отсыпка трех ярусов: 1-й ярус с отметкой разгрузки +70,0 м, 2-й ярус – +85,0, 3-й ярус – +100,0 м.

В программе конечно-элементного анализа Phase2 рассчитаны коэффициенты запаса устойчивости внутреннего отвала с учетом сейсмических нагрузок от массовых взрывов на карьере в диапазоне 0,00625–0,1 g, что соответствует землетрясению с магнитудой 3–7 баллов. При сейсмических воздействиях от массовых взрывов от 0 до 7 баллов КЗУ откосов отвала изменяется в следующих диапазонах: от 3,46 до 2,3 для профиля I-I, от 3,36 до 2,46 для профиля II-II, от 8,19 до 4,2 для профиля III-III, от 2,03 до 1,53 для профиля V-V.

Выполнена оценка потенциального влияния погашенных подземных горных выработок шахты «Красный партизан» на устойчивость внутрен-

него отвала, отсыпанного на подработанном основании борта карьера. Несмотря на отсутствие достоверных данных о степени заполнения выработанного пространства подземных выработок, установлено, что максимальные смещения массива вблизи камер достигают $U_{xy} = 7,6-22,0$ м, а на поверхности отсыпанного отвала может образоваться масштабная просадка пород размерами до 50–60 м в диаметре и до 4 м в глубину. Сейсмические воздействия от массовых взрывов на карьере выступают в качестве триггерного фактора геомеханических нарушений.

Учитывая многообразие факторов, влияющих на устойчивость геотехнических объектов при комбинированном способе разработке полезных ископаемых, выполнить геомеханическую оценку без определенных погрешностей невозможно. Поэтому для учета всех особенностей скальных массивов горных пород и процессов, происходящих в них, необходимо применять комплексный подход, включающий аналитические, экспериментальные и статистические методы исследований.

Библиографический список / References

1. Казикаев Д. М. Комбинированная разработка рудных месторождений / Д. М. Казикаев. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета: Горная книга, 2008. – 360 с.
2. Kazikaev D. M. *Kombinirovannaya razrabotka rudnykh mestorozhdeniy*. Moscow, Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, "Gornaya kniga" Publ., 2008, 360 p.
3. Masahiro Shinoda. Seismic stability and displacement analyses of earth slopes using non-circular slip surface. The Japanese Geotechnical Society. Soils and Foundations. 2015, 55 (2): 227, 241. Available at: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.sandf.2015.02.001>
4. Johari A., Khodaparast A. R. Analytical stochastic analysis of seismic stability of infinite slope. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 79, Part A, December 2015, pp. 17-21. Available at: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.soildyn.2015.08.012>
5. Lian-Heng Zhao, Xiao Cheng, Yingbin Zhang, Liang Li, De-Jian Li. Stability analysis of seismic slopes with cracks. Computers and Geotechnics. Vol. 77, July 2016, pp. 77-90. Available at: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.compgeo.2016.04.007>
6. L. Lu, Z.J. Wang, M.L. Song, K. Arai. Stability analysis of slopes with ground water during earthquakes. Engineering Geology. Vol. 193, 2 July 2015, pp. 288-296. Available at: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enggeo.2015.05.001>
7. Ракишев Б. Р. Обеспечение геомеханической устойчивости насыпей для конвейеров при циклично-поточной технологии / Б. Р. Ракишев,

А. С. Ковров, С. К. Молдабаев, Е. В. Бабий // Вестник НАН Республики Казахстан. – 2016. – Т. 2, № 360. – С. 103–110.

Rakishev V. R., Kovrov A. S., Moldabaev S. K., Babiy E. V. *Obespechenie geomekhanicheskoy ustoychivosti nasypov dlya konveyerov pri tsiklichno-potochnoy tekhnologii*. Vestnik NAN Respubliki Kazakhstan. 2016, vol. 2, no. 360, pp. 103-110.

7. Хоменко О. Є. Натурні дослідження поведінки масиву гірських порід навколо первинних очисних камер / О. Є. Хоменко, М. М. Кононенко // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 9–10. – С. 21–24.

Khomenko O. Ye., Kononenko M. M. *Naturni doslidzhennya povedinky masyvu hirs'kykh porid navkolo pervyynykh ochysnykh kamer*. Naukovyy visnyk NHU. 2010, no. 9-10, pp. 21-24.

8. Сайиідкасимов С.С. Оценка устойчивости подрабатываемых бортов карьера при комбинированной разработке золоторудных месторождений в районах со сложными сейсмо-тектоническими условиями / С. С. Сайиідкасимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 6. – С. 289–310.

Sayiidkasimov S. S. *Otsenka ustoychivosti podrabatyvaemykh bortov kar'era pri kombinirovannoy razrabotke zolotorudnykh mestorozhdeniy v rayonakh so slozhnyimi seysmo-tektonicheskimi usloviyami*. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016, no. 6, pp. 289-310.

9. Ковров А. С. Оценка сейсмических воздействий на устойчивость откосов насыпного массива / А. С. Ковров // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – № 5. – С. 96–104.

Kovrov A. S. *Otsenka seysmicheskikh vozdeystviy na ustoychivost' otkosov nasypnogo massiva*. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2016, no. 5, pp. 96-104.

Purpose. Evaluation of the stability of the internal rock dump on the worked up pit edge of Pervomaiskiy quarry of SevGOK taking into consideration geometry, rock physical and mechanical properties and seismic impacts from blasting operations.

Methodology. To study geomechanical stability of the pit edge while mining operations, the data of engineering and geological surveys, technological schemes for conducting open mining operations, surveying data were

used. For numerical simulation of the internal dump slope stability and the pit edge slope stability, the finite element analysis software Phase2 by Rocscience Inc. is used.

Findings. Geomechanical assessment of the stability of the quarry internal dump constructed on the southwestern pit edge taking into consideration complex structure, rock properties and seismic effects from blasting operations has been carried out. For a three-tier dump, safety factors were calculated taking into consideration seismic impacts from blasting operations at a quarry in the range of 0.00625-0.1 g, which corresponds to a magnitude of 3-7 earthquake. The potential effect of extinguished underground mine workings on the stability of the internal dump was assessed.

Originality. It is established that the maximum potential displacement of the massif near the extinguished underground workings in the pit edge reaches the value $U_{xy} = 7.6-22.0$ m, and a large-scale subsidence area of rocks up to 50-60 m in diameter and up to 4 m in depth can form on the surface of the internal dump. Seismic impacts from blasing operation at the quarry can be as a trigger factor for geomechanical disturbances.

Practical value. The results of numerical simulation of the stability of internal dump on worked up the pit edge foundation can be considered in mining development projects to ensure the safety of the open mining technology and internal dumping operations.

Key words: stability of the open pit edges and dump slopes, internal dump, maximum rock mass displacements, safety factor, seismic impact, Mohr-Coulomb failure criterion.

Благодарность

При выполнении работы были использованы представленные ООО «Южгипроруда» геологические, гидрогеологические и технологические данные. Маркшейдерской службой Первомайского карьера были представлены планы горных работ и строительства.

Авторы работы выражают искреннюю благодарность заведующему отделом геомеханических основ технологии открытой разработки месторождений Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины) профессору Четверику Михаилу Сергеевичу за научное руководство при выполнении данных исследований.

**Рекомендована к публикации
д. т. н. М. С. Четвериком**

Поступила 29.07.2017

Metallurgical and Mining
Industry

www.metaljournal.com.ua