

9. Туманов В.В., Компанец А.И., Сухина Е.В., Савченко А.В. Исследование аномальных зон подработанного массива горных пород комплексом наземных геофизических методов. //Научные труды УкрНИМИ НАНУ, №3, 2008 г., с. 61-79.

10. Словник іншомовних слів. За редакцією члена-корреспондента АН УРСР О.С.Мельничука. – Головна редакція АН УССР. – Київ, 1974. – 776 с.

11. Барьехтар. Магнетизм, что это? – Киев: Наукова думка, 1981. – 208 с.

12. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1977. – 336 с.

13. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. – М.: Наука, 1990. – 288 с.

14. Веневцев Ю.Н., Гагулин В.В., Любимов В.Н. Сегнетомагнетики. – М.: Наука, 1982. – 224 с.

15. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука, 1987. – 160 с.

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ ОТВАЛА И БОРТА КАРЬЕРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е.К. Бабец, А.А. Сова, А.В. Сазонов, М.И. Русаков, Научно-исследовательский горнорудный институт ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Украина

Геомеханическое обоснование возможности размещения отвала пустых пород вблизи юго-западного борта Глееватского карьера ПАО «ЦГОК». Было выполнено моделирование методом конечных элементов, уточнены параметры процесса сдвижения подработанного участка земной поверхности. Проведено геологическое описание залежи «Северная Червонная» Для определения устойчивости отвала и борта карьера был выполнен расчет минимального коэффициента запаса устойчивости.

Значительный объем отходов производства (выход товарной продукции, от добываемых объемов руды на ГОКах, равен 40-42%) и большие коэффициенты вскрыши (значительные объемы пустых пород при добыче руды) приводит к дефициту земельных ресурсов для их складирования, и значительным затратам на складирование. Кроме этого, возникает целый комплекс проблемных экологических вопросов (выбросы вредных веществ, нарушение водного режима вблизи отвалов и хвостохранилищ, возрастание вероятности техногенных катастроф). Поэтому вопрос использования участков земной поверхности, подработанных подземными горными работами, для размещения на них отвалов пустых пород является весьма актуальным.

В Кривбассе накоплен значительный опыт использования подработанных площадей. В настоящее время часть подработанных площадей земной поверхности используются под отвалы, карьеры, коммуникации, огороды дачи и т. п.

Для прогноза деформаций вблизи отвала, основания отвала и юго-западного борта карьера № 1 ПАО "ЦГОК" было выполнено моделирование методом конечных элементов (МКЭ, FEM). Данный метод начал применяться в 60-70 годах прошлого века в связи развитием ЭВМ. "Основная концепция МКЭ состоит в том, что искомую непрерывную величину, будь то напор фильтрационного потока или перемещения точек деформированного тела, аппроксимируют кусочным набором простейших функций, заданных ограниченными конечными подобластями (элементами). С помощью такой процедуры интегрирование дифференциальных уравнений аналитической постановки задачи сводится к решению системы линейных уравнений. В настоящее время существует значительное количество программных комплексов позволяющих решать значительный круг задач по определению деформаций, фильтрации, теплопереносу и разрушений.

Размещение отвала пустых пород вблизи юго-западного борта Глееватского карьера ПАО "ЦГОК" в осях 410-260 (0-130 осн ш. "Большевик") и между базисами I+125...I+1025 (ЛСП +1300...+2110 ш. "Большевик") позволяет не только экономить земельные ресурсы, но и

значительно сократить расстояние транспортирования вскрышных пород. Юго-западный отвал пустых пород будет сформирован на небольшом расстоянии от верхней бровки западного борта Глееватского карьера. С западной части на расстоянии 12-15м от нижней бровки отвала проходит ЛЭП 6кВ и в 18-28м железнодорожный путь и ж.д. станция. Отвал находится в зоне прямой подработки от подземных горных работ по залежи "Северная - Червоная", которая обрабатывалась шахтой "Большевик".

Целью исследования является обоснование безопасного отвалообразования на участке юго-западного борта Глееватского карьера ПАО "ЦГОК" подработанного подземными горными по залежи "Северная - Червоная" и обеспечения его максимальной емкости и устойчивости

В ходе работы решались следующие задачи:

1. Уточнение параметров процесса сдвижения и оценка возможности использования для складирования пустых пород подработанного участка земной поверхности.

2. Расчет устойчивости отвала на подработанном основании и системы отвал-карьер юго-западного борта Глееватского карьера.

Для решения поставленных задач применялись следующие методы исследований: метод теоретического обобщения и анализ ранее проводимых исследований, метод математического моделирования (МКЭ), расчетно-аналитический метод.

Отвал проектируется разместить на участке который находится в зоне прямой подработки, т.е. непосредственно над отработанной залежью "Северная Червоная". Залежь имеет длину по простиранию 250-450м, угол падения $\alpha = 40-60^\circ$, среднюю мощность около 30м (имеются участки мощностью до 60-70м) и северное склонение под углом 30° . Рудная залежь "Северная - Червоная" приурочена к контакту пород пятого железистого горизонта с породами верхней свиты. Форма залежи пластообразная, представлена сплошным рудным телом с извилистыми контурами выклинивания, с раздувами и пережимами (Рис. 1). Залежь до горизонта 452м обрабатывалась шахтой "Комсомольская" рудника им. К. Либкнехта (название залежи было — залежь "Шахты №5" Червоного пласта), а ниже до глубины 815м шахтой "Большевик". Залежь обрабатывалась системами подэтажного обрушения руды и вмещающих пород.

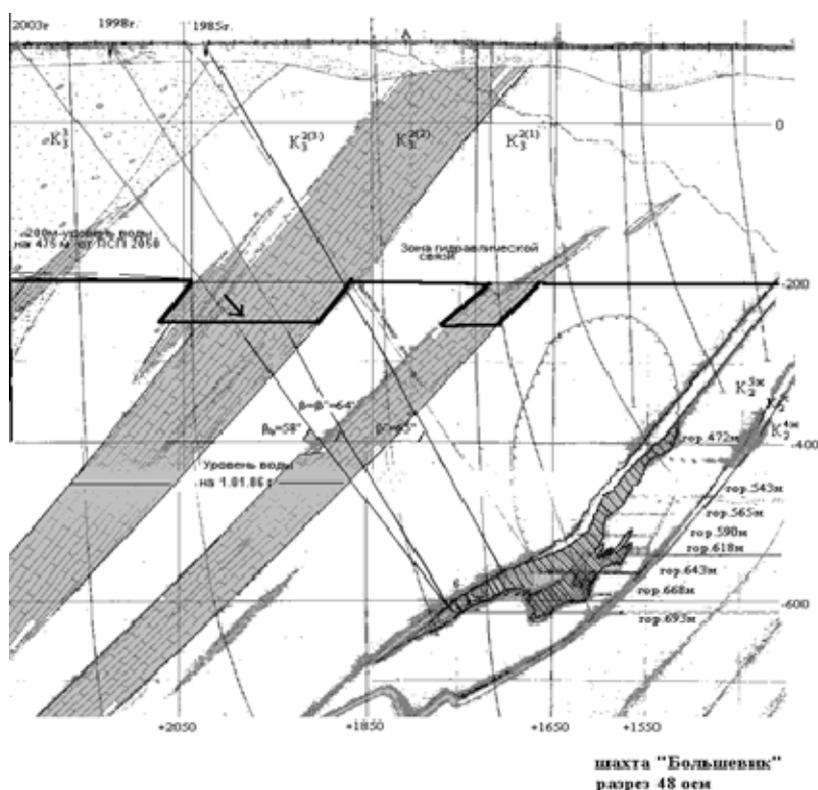


Рис. 1. Геологический разрез по 48 оси шахты "Большевик"

Согласно действующих "Правил охраны..." [2] залежь "Северная Червоная" по проявлению процесса сдвижения относится к группе Ш₂.

Анализ многолетних инструментальных наблюдений за процессом сдвижения позволил определить динамику изменения границ зон сдвижения и угловые параметры процесса сдвижения при конечной глубине отработки залежи "Северная Червоная". Фактические угловые параметры процесса сдвижения при отработке залежи "Северная Червоная", имеют следующие значения:

граничный угол сдвижения [2] - $\beta_{\square 0} = 58^{\circ}$;

угол сдвижения и угол разрыва вкрест простирания залежи - $\beta_{\square} = \beta''_{\square} = 64^{\circ}$;

угол сдвижения и угол разрыва по простиранию залежи - $\delta = \delta'' = 75^{\circ}$,

угол максимального оседания [2] - $\theta = 71^{\circ}$.

Процесс сдвижения (оседание поверхности, образование трещин и террас) от отработки залежи "Северная Червоная" закончился.

Образование воронок от отработки залежи "Северная Червоная" ниже горизонта 156м не зафиксировано. Выполненный расчет по методике изложенной в работе [3] исключает возможность образование воронки на земной поверхности от подземных горных работ по залежи "Северная Червоная" ниже горизонта 156м.

На территории планируемой для размещения отвала в 2010-2012 годах институтом ГП "Кривбасспроект" были выполнены детальная геодезическая съемка и инженерно-геологические изыскания. Инженерно-геологические изыскания включали в себя бурения скважин глубиной до 35м и определение физико-механических свойств образцов песчано-глинистых пород. Полученные результаты были использованы при расчетах коэффициента запаса устойчивости и деформационных характеристик отвала и борта карьера методом МКЭ.

С целью повышения запаса в расчетах выбор местоположения разрезов осуществлялся исходя из максимально возможной "плохой" конфигурации карьера и отвала. Из двух построенных разрезов был выбран разрез 1з-1в (с большей глубиной карьера и большей выпуклостью борта), по которому в дальнейшем выполнялись все геомеханические расчеты. Фактическое и проектное положение юго-западного борта имеют выпуклый контур с кривизной $6,78 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ и $7,30 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$. Для прогноза деформаций вблизи отвала, основания отвала и юго-западного борта было выполнено моделирование методом конечных элементов (МКЭ, FEM). Для наших условий была использована программа ED-Elas2D состоящая из трех подпрограмм PreProcessing (построение модели), Processing (вычисление модели), PostProcessing (визуализация результатов моделирования). Работа каждой подпрограммы заканчивается созданием результирующего текстового файла состоящего из значительного числового массива. Программа позволяет определять и отстраивать поле векторов смещений (полный вектор, вектор по оси x, вектор по оси y), относительных горизонтальных деформаций, напряжений, изолиний смещений (полный вектор, вектор по оси x, вектор по оси y), относительных горизонтальных деформаций ($E_x, E_y, E_{xy}, E_i, E_{ii}, \text{Ang}$), напряжений ($S_x, S_y, S_{xy}, S_i, S_{ii}, \text{Ang}$).

Геометрическое подобие модели достигалось путем использования фактических (координат) размеров борта и отвала (как в обычной САД системе). Граничные условия заключались в запрещении вертикальных смещений на нижней ограничивающей поверхности и горизонтальных смещений на вертикальных ограничивающих поверхностях массива (Рис. 2.). Силовое воздействие на массив обусловлено только собственным весом пород. Решение задачи выполнялось в плоской постановке. Это приводит к некоторому завышению полученных результатов расчета, что позволяет получить дополнительный запас надежности. Фактор времени в расчетах отсутствует, поэтому все полученные результаты являются максимальными за весь период разноса борта карьера отсыпки отвала. Были рассмотрены и промоделированы пять расчетных схем (положений) борта карьера и отвала:

1. Проектное положение борта карьера без отвала (3002 элемента).
2. Проектное положение борта карьера с отвалом до горизонта 115м (3744 элемента).
3. Проектное положение борта карьера с отвалом до горизонта 135м (4140 элемента).
4. Проектное положение борта карьера с отвалом до горизонта 155м (4249 элемента) Рис.2.
5. Фактическое положение борта карьера (3948 элементов).

Моделируемый массив разбивался на треугольные элементы разного размера. Сгущение сетки выполнялось вблизи контура борта, основания отвала и самого отвала.

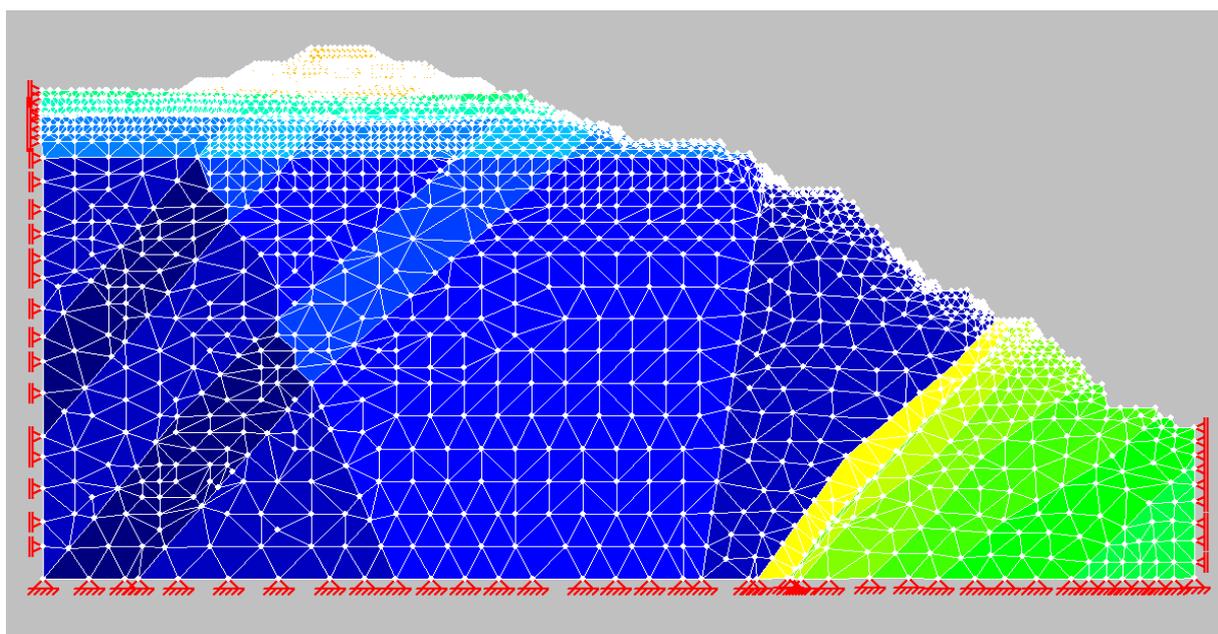


Рис. 2. Расчетная схема моделирования МКЭ юго-западного борта карьера и отвала (результат работы 1 подпрограммы)

Для построения модели, кроме геометрических параметров модели, необходимо знать объемный вес и деформационные свойства моделируемых пород.

Ведение горных работ приводит к развитию деформаций в горном массиве. При расчетах деформаций пород как правило используется силовое гравитационное воздействие вызванное объемной массой (ρ) вмещающих пород и деформационные свойства пород: E – модуль продольной упругости (модуль Юнга) и ν (μ) – коэффициент Пуассона.

Объемная масса горных пород колеблется от 1500 кг/м^3 до 3500 кг/м^3 . Коэффициент Пуассона величина безразмерная и в соответствии с теорией упругости $\nu=0-0,5$, для горных пород $\nu=0,2-0,45$. Коэффициент Пуассона равен отношению поперечной деформации к продольной с обратным знаком и характеризует объемную деформацию материала. Модуль упругости горных пород колеблется в широких пределах от 80 МПа до $8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ и зависит от ряда факторов (состава и строения пород, слоистости, метода определения, масштабного эффекта, условий нагружения образца). Поэтому деформационные характеристики были определены путем обратного расчета с учетом максимального оседания земной поверхности ($-4,5 \text{ м}$) в результате подземной разработки.

Анализ полученных результатов показывает, что при достижении проектного положения отвала (отметка $+155 \text{ м}$) максимальные (за 10 лет) суммарные горизонтальные деформации земной поверхности в районе ж.д. путей и ЛЭП будут равны $83-96 \text{ мм}$ и направлены в сторону от отвала, а оседания $20-22 \text{ мм}$. Опыт подработки электрифицированных ж.д. путей УЗ в условиях Кривбасса с такими же (а иногда и с большими) по величине деформациями земной поверхности не вызывает серьезных затруднений в эксплуатации, при условии периодического ремонта и исправления ж.д. полотна. Деформации откоса борта карьера в результате его разноса и разгрузки на разных горизонтах имеют разные величины. Величина полного вектора деформации на горизонте $+10 \text{ м}$ равна 300 мм , на горизонте -110 м — 164 мм , на горизонте -182 м — 98 мм (Рис. 3).

Разрушение бортов отвалов и карьеров происходит в результате действия касательных напряжений. Деформация разрушения проходит по линии действия максимальных касательных напряжений τ_{xy} (в нашем случае S_{xy}). Анализ результатов моделирования при разносе борта и сооружении отвала до отметки $+155 \text{ м}$ показывает, что максимальные (или близкие к ним)

касательные напряжения ($0,169\text{МПа}$) наблюдаются (красный цвет) на отметках +135м, +115м, +100м, +40м, +25м, +10м, -5м, -20м (Рис. 4).

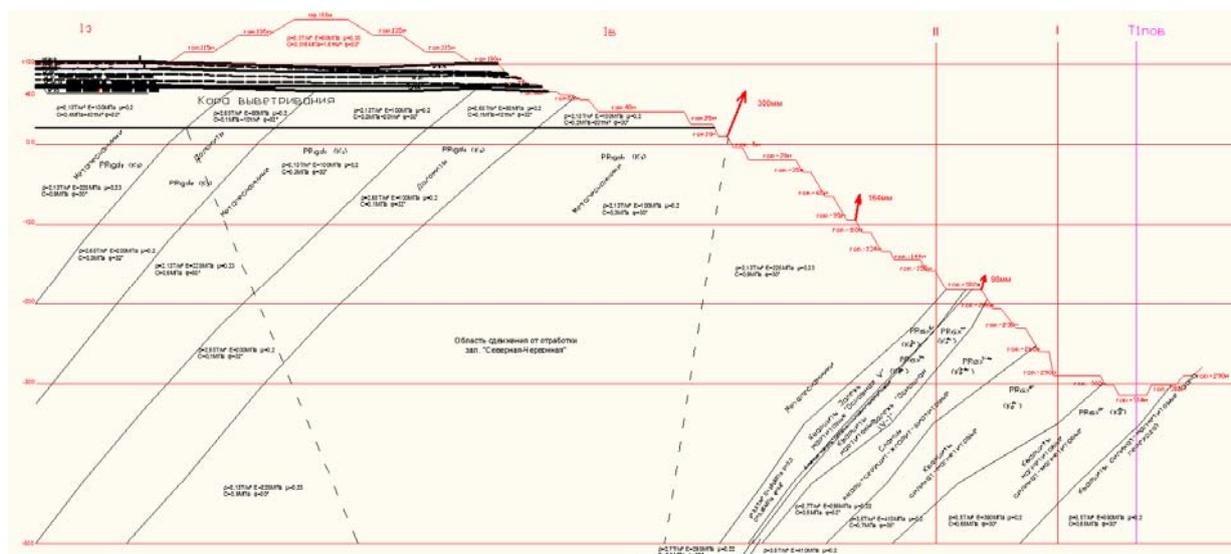


Рис. 3. Векторы деформаций проектного контура откоса борта карьера в результате его разноса и разгрузки по результатам моделирования МКЭ

Наиболее опасными участками на предмет развития оползней являются горизонты +135м, +115м, +100м, +40м, т.к. величина касательных напряжений больше сцепления пород и на этих участках возможно развитие оползней. Следует отметить, что моделирование фактического состояния борта карьера показывает (Рис. 5) наличие максимальных касательных напряжений ($0,186\text{МПа}$) на горизонтах +50м и +30м, однако оползневых явлений не наблюдаются. Учитывая этот факт, развитие оползня на отметке +40м на проектном контуре маловероятно. На остальных участках борта величина касательных напряжений меньше величины сцепления пород в массиве, поэтому развитие оползня невозможно.

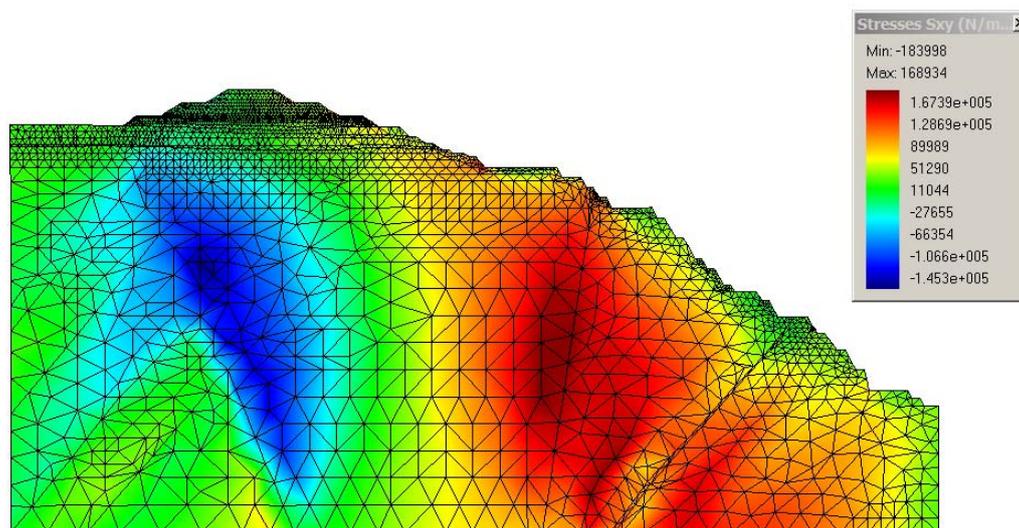


Рис. 4. Результаты расчета касательных напряжений МКЭ при проектном контуре борта карьера и отвала

Для определения устойчивости отвала и борта карьера был выполнен расчет минимального коэффициента запаса устойчивости $K_{мз}$. Коэффициент запаса устойчивости K_3 определяют из отношения удерживающих сил к сдвигающим. Это отношение является численным критерием оценки устойчивости бортов отвалов и карьеров.

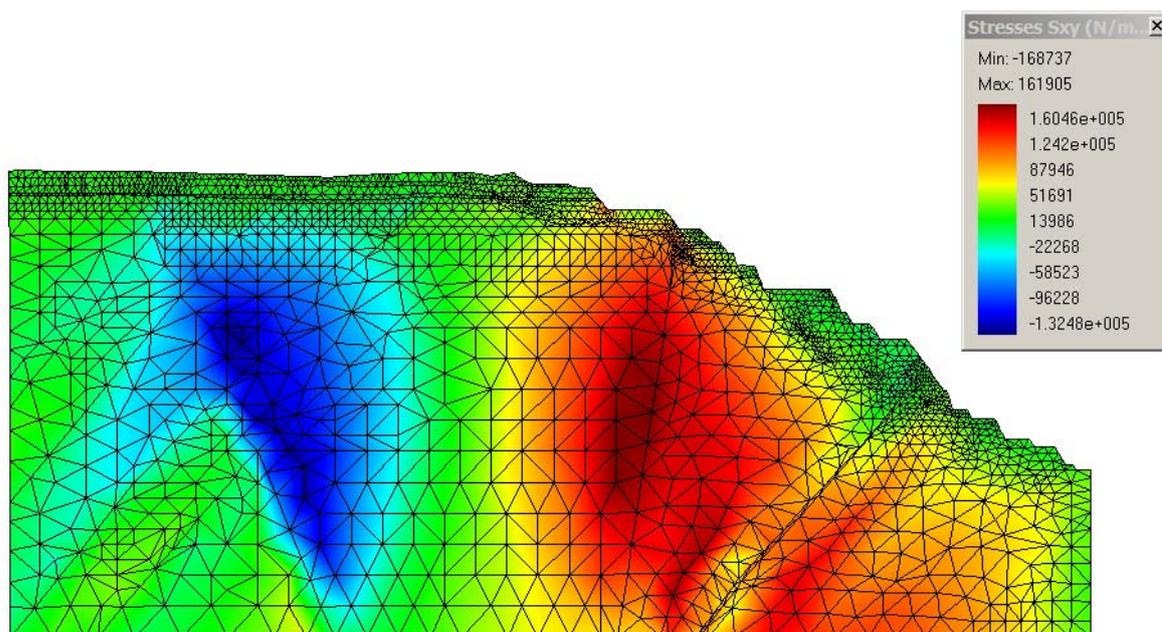


Рис. 5. Результаты расчета касательных напряжений МКЭ при фактическом контуре борта карьера и отвала

Рекомендуемые значения коэффициента запаса устойчивости были разработаны ВНИМИ [4, 5] и для рабочих бортов карьеров и отвалов принимаются равными $K_3=1,2$. Выбор схемы расчета [4, 5] устойчивости откосов зависит от формы поверхности скольжения, метода сложения поверхностных и объемных сил, криволинейности уступов, бортов и отвалов в разрезе и плане. Юго-западный борт карьера и отвал, согласно классификации типовых схем расчета [4, 5], относятся к VI схеме, т.е. расчет устойчивости производится по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения.

Для расчета коэффициента запаса устойчивости юго-западного отвала и борта карьера применялась программа Slope 5.01. Расчет выполнялся с учетом сейсмичности в 8 баллов. Выполнялось два расчета: расчет только для отвала и верхнего контура карьера до горизонта +25м (до нижней границы зоны выветренных пород); расчет отвала и карьера до отметки -182м. Анализ полученных результатов показывает, что рассчитанный коэффициент запаса устойчивости отвала и системы отвал-борт карьера превышает нормативный равный $K_3 = 1,2$. Для отвала минимальный коэффициент запаса устойчивости откоса равен 1,22, а для системы отвал - борт карьера 1,52. Таким образом, проектный контур отвала и борта карьера имеет устойчивое положение.

Отработка залежи велась системами с обрушением руды и вмещающих пород. Из-за северного склонения залежи процесс сдвижения развивался с запаздыванием. Последняя видимая трещина на земной поверхности висячем боку залежи образовалась в 1986 году. Ниже горизонта 543м процесс сдвижения развивался в виде образования свода над залежью. По результатам инструментальных наблюдений построены фактические границы зоны сдвижения и определены фактические угловые параметры процесса сдвижения на 2005. Процесс сдвижения (оседание поверхности, образование трещин и террас) от отработки залежи "Северная Червоная" закончился. Выполненный расчет исключает возможность образование воронки на земной поверхности от подземных горных работ по залежи "Северная Червоная" ниже горизонта 156м.

В ходе выполненных расчетов было получено поле векторов смещений (полный вектор, вектор по оси x, вектор по оси y), величины относительных горизонтальных деформаций, напряжений, изолиний смещений (полный вектор, вектор по оси x, вектор по оси y), величины относительных горизонтальных деформаций ($E_x, E_y, E_{xy}, S_i, S_{ii}, Ang$), напряжений ($S_x, S_y, S_{xy}, S_i, S_{ii}, Ang$) подработанного участка проектируемого борта карьера и отвала. Деформации откоса борта карьера в результате его разноса и разгрузки на разных горизонтах имеют разные величины и

колеблются от 100 до 300мм. Разрушение бортов отвалов и карьеров происходит в результате действия касательных напряжений. Деформация разрушения проходит по линии действия максимальных касательных напряжений τ_{xy} (в нашем случае S_{xy}). Анализ результатов моделирования при разносе борта и сооружении отвала показывает, что максимальные касательные напряжения наблюдаются на горизонтах с отметками +135м, +115м, +100м, +40м, +25м, +10м, -5м, -20м.

Размещение отвала на подработанной территории (в центре мульды сдвижения), приводит, к улучшению геомеханической обстановки, как для отвала, так и для борта карьера.

Проектный контур отвала и борта карьера имеет устойчивое положение. Минимальные расчетные коэффициенты запаса устойчивости больше нормативных и соответственно равны: для отвала 1,22; системы отвал-карьер 1,52.

Список литературы

1. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987, 221с.
2. Правила охраны сооружений природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне /ВНИМИ-Л.,1975. - 66с.
3. Сдвижение горных пород и земной поверхности при разработке рудных залежей Криворожского бассейна / К.К. Бойчук, А.Л. Монахов, В.Н. Романенко, А.В. Сазонов. В кн.: IX международный конгресс по маркшейдерскому делу, Чешская республика, Прага. 18-22 июня 1994г. Том-доклады, 1994г. С.542-544.
4. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л.:ВНИМИ, 1972.- 165с.
5. Методичні вказівки з визначення оптимальних кутів нахилу бортів, укосів уступів і відвалів залізорудних та флюсових кар'єрів // Під ред. проф. А.Г. Шапаря // -К: - 2009. – 201с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОТВАЛА НА ПОДРАБОТАННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Е.К. Бабец, А.А. Сова, А.В. Сазонов, М.И. Русаков, Научно-исследовательский горнорудный институт ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Украина

Геомеханическое обоснование возможности расширения склада окисленных кварцитов (автоотвал №4) ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог" на подработанной территории. Проведено геологическое описание основания склада, анализ расчёта деформаций и напряжений методом конечных элементов в основании и конструкции склада окисленных руд, выполнены расчеты по определению коэффициента запаса устойчивости на участке расширения и в южной части склада окисленных кварцитов, описание системы контроля устойчивости склада.

Дальнейшая разработка месторождения магнетитовых кварцитов карьером №3 ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог" приводит к необходимости складирования попутно добываемых окисленных кварцитов.

Окисленные кварциты из карьера №3 ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог" отсыпаются в специальный склад (отвал №4), который формируется вблизи северного и северо-восточного борта карьера. Проектные решения по формированию склада окисленных кварцитов выполнялись ООО "Южгипроруда" в 2010г. и НИГРИ ГВУЗ "КНУ" в 2013-14гг. В связи с корректировкой графика объемов складирования и сохранения производительности карьера возникла необходимость в расширении площади склада окисленных кварцитов. Площадь складирования увеличивается в западном и в северном направлениях от существующего