УДК 622.271

В.В.БУДИЛОВА, *аспирант, lerrrrka@mail.ru*
А.А.ПАВЛОВИЧ, *канд. техн. наук, научный сотрудник, dandy332@mail.ru*
Д.А.ИКОННИКОВ, *канд. техн. наук, ассистент, sid_nitro_d@yahoo.com*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.V.BUDILOVA, *post-graduate student, lerrrrka@mail.ru*
A.A.PAVLOVICH, *PhD in eng. sc., research assistant, dandy332@mail.ru*
D.A.IKONNIKOV, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, sid_nitro_d@yahoo.com*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

Приведены результаты моделирования и оценки на основе метода конечных элементов границ распространения относительных горизонтальных деформаций с учетом структурных особенностей массива, а также прочностных и деформационных свойств различных литологических разностей, слагающих борт карьера.

Ключевые слова: горизонтальные деформации, прибортовой массив, наблюдения, метод конечных элементов.

ANALYSIS OF DISSEMINATION OF SURFACE DEFORMATION AT OPEN PIT MINING

The results of modeling and estimation based on the finite element method, of propagation boundaries of horizontal deformations with due account of structural features of rock mass, and also strength and deformational properties of various lithological differences composing the open-pit slope are represented.

Key words: horizontal deformations, pit wall slope, observations, finite element method.

Оценить одновременное влияние многочисленных нелинейных факторов на устойчивость бортов на этапе строительства карьера достаточно сложно. Существующие аналитические решения учитывают лишь некоторые факторы, притом часть из них – с большой погрешностью. Для своевременного предупреждения (и управления) деформационных процессов в прибортовом массиве карьера в условиях изменяющейся горно-геологической обстановки необходим оперативный контроль за состоянием откосов уступов и бортов карьеров. Поэтому на стадии разработки системы мониторинга необходимо достаточно точно определять расположение опорных и рабочих реперов, а также периодичность наблюдений.

Деформации прибортового массива достаточно сложно прогнозировать с учетом существующих нормативных документов [3, 6]. Однако по мере развития вычислительной техники все шире распространяются программные продукты, основанные на численных методах, в частности на методе конечных элементов, что позволяет оценивать деформационное состояние бортов карьера [4, 7]. Рассмотрим комплексный подход к созданию системы наблюдений для карьера им.В.Гриба. В этом случае предельные параметры рассчитываются на ос-

нове метода предельного равновесия, а оценка напряженно-деформированного состояния производится на основе метода конечных элементов в программном комплексе Plaxis.

Месторождение алмазов им.В.Гриба расположено в Мезенском районе Архангельской области и является основным месторождением алмазов Верхотинского рудного поля. По горно-техническим и гидрогеологическим условиям месторождение относится к очень сложным. Для характеристики инженерно-геологических условий месторождения им.В.Гриба весь законтурный массив трубки был расчленен на два комплекса, характеризующихся различными особенностями строения, литологическими и физико-механическими свойствами: покровный и вмещающий.

Покровный инженерно-геологический комплекс, средней мощностью 66 м, состоит из песчано-глинистых четвертичных отложений, доломитов олмуго-окуневской свиты, песчаников и аргиллитов воереченской свиты и песчаников урзугской свиты. Вмещающий инженерно-геологический комплекс представлен породами падунской и мезенской свит и состоит из переслаивания алевролитов и аргиллитов рифея, аргиллитов с прослоями песчаников и алевролитов усть-пинежской свиты, алевролитов с прослоями песчаников и аргиллитов мезенской свиты, песчаников с прослоями алевролитов и аргиллитов падунской свиты. Средняя мощность комплекса составляет 380 м. Массив характеризуется высокой степенью обводненности до глубины 230 м. Гидрогеологические условия месторождения относятся к сложным.

Научным центром (НЦ) геомеханики и проблем горного производства Национального минерально-сырьевого университета были выполнены расчеты максимальных параметров устойчивых бортов карьера для условий отработки месторождения открытым способом. Глубина карьера на конец отработки составит 450 м, а угол наклона 34,3°. Расчеты основывались на теории предельного равновесия и выполнялись методом многоугольника (векторного сложения) сил. Расчетами НЦ было установлено, что для обеспечения устойчивости бортов необходимо проведение дренажных мероприятий. С учетом этих мероприятий, вводя в исходные данные нормативное значение коэффициента запаса, определяли максимальные параметры борта карьера.

Однако инженерные методы расчета, к которым относится метод векторного сложения сил, имеют ряд недостатков. При учете прочностных свойств пород они не позволяют оценить полную картину распределения напряжений и деформаций в массиве.

Альтернативой инженерным методам расчета являются численные методы. В численных методах сплошная среда еще при разработке расчетной схемы приводится к некоторой дискретной модели, имеющей конечное число степеней свободы. Достоинство численных методов состоит в получении количественных результатов при решении задач, более полно учитывающих многообразие различных факторов, оказывающих влияние на устойчивость бортов карьеров, таких как: геометрические размеры, структурные особенности, неоднородные включения, прочностные и деформационные свойства массива горных пород.

Одним из наиболее распространенных численных методов является метод конечных элементов (МКЭ), который основан на применении приближенных методов вычислений, методов матричной и линейной алгебры [1]. В этом методе рассматриваемая бесконечная область заменяется конечной и разбивается на определенное конечное число элементов, в каждом узле которых должны соблюдаться условия равновесия и совместимости деформаций. Эти условия закладываются в систему линейных уравнений, число которых соответствует числу узлов расчетной схемы. Количественные значения неизвестной величины отыскиваются в ограниченном числе точек (узлов) области, а в пределах элементов значения неизвестной функции и ее производных определяются уже аппроксимирующими функциями и их производными [7].

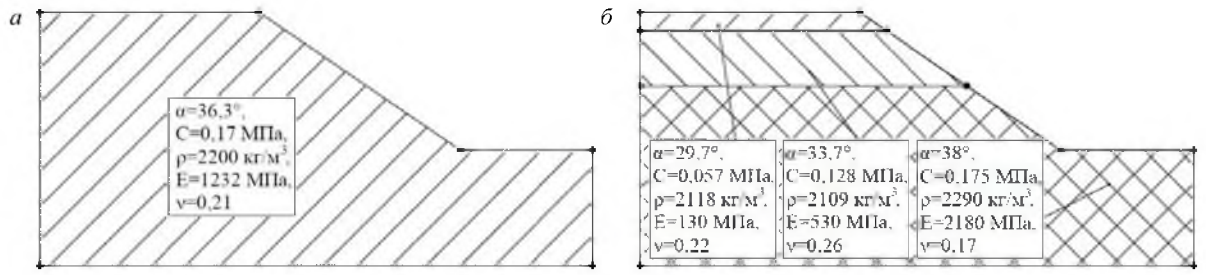


Рис.1. Схема модели: однородного (*а*) и слоистого (*б*) откоса

Для оценки напряженно-деформированного состояния массива на карьере месторождения им.В.Гриба был произведен анализ в программном комплексе Plaxis, реализующим метод конечных элементов. В качестве исходных данных принимались: плоский борт карьера, структурные особенности массива, прочностные и деформационные свойства различных литологических разностей, слагающих борт карьера. Расчеты выполнялись вдоль намеченных профильных линий наблюдательной станции карьера. Для этого была создана расчетная модель со средневзвешенными свойствами массива (однородный откос), а также модель, учитывающая свойства пород различных инженерно-геологических комплексов (слоистый откос), рис.1. При этом рассматривалось два случая: дренированный и обводненный откос (с параметрами $h_v = 80$ м, $j = 10°$).

Наибольшее внимание при расчетах уделялось распределению относительных горизонтальных деформаций, поскольку именно от расстояния их распространения относительно бровки карьера зависит длина закладываемых профильных линий для маркшейдерских наблюдений. В ходе проведения расчетов были выявлены некоторые закономерности. Так, значения коэффициента запаса устойчивости и относительных горизонтальных деформаций зависели от частоты сетки конечных элементов. В свою очередь, деформационные характеристики оказывали незначительное влияние на значение коэффициента запаса, данный факт также отмечается в работах [2].

Распределение горизонтальных деформаций для массива, находящегося в состоянии предельного равновесия, представлено на рис.2. Расстояния приводятся в относительных единицах высоты карьера H и отсчитываются от верхней бровки. Из графика видно, что относительные горизонтальные деформации для модели слоистого откоса больше, чем для однородного. Это связано с различием значений модуля упругости покрывающего слоя и средневзвешенного модуля упругости по всему прибортовому массиву.

Распределение относительных горизонтальных деформаций по земной поверхности для модели слоистого обводненного откоса, где k – коэффициент уменьшения параметров прочности (сцепления c и угла внутреннего трения φ), показано на рис.3. Коэффициент k поэтапно увеличивается до тех пор, пока не происходит разрушение.

Легко заметить, что при $k = 1$ (при исходных физико-механических параметрах) значения горизонтальных деформаций находятся в пределах тысячных долей, изменяясь в диапазоне от 0,002 до 0,004, что сопоставимо со значениями, приведенными в методических указаниях [5]. Развитие горизонтальных деформаций при снижении прочности прибортового массива демонстрируют кривые $k = 1{,}18 \div 1{,}32$.

Анализируя графики рис.3, можно сделать вывод, что относительные горизонтальные деформации массива, находящегося в состоянии предельного равновесия ($k = 1{,}32$), на расстоянии от верхней бровки $1{,}1H$ и далее остаются на том же уровне, что и для массива с исходными физико-механическими характеристиками. В целом же, по поверхности прибортового массива для всех рассмотренных моделей деформа-

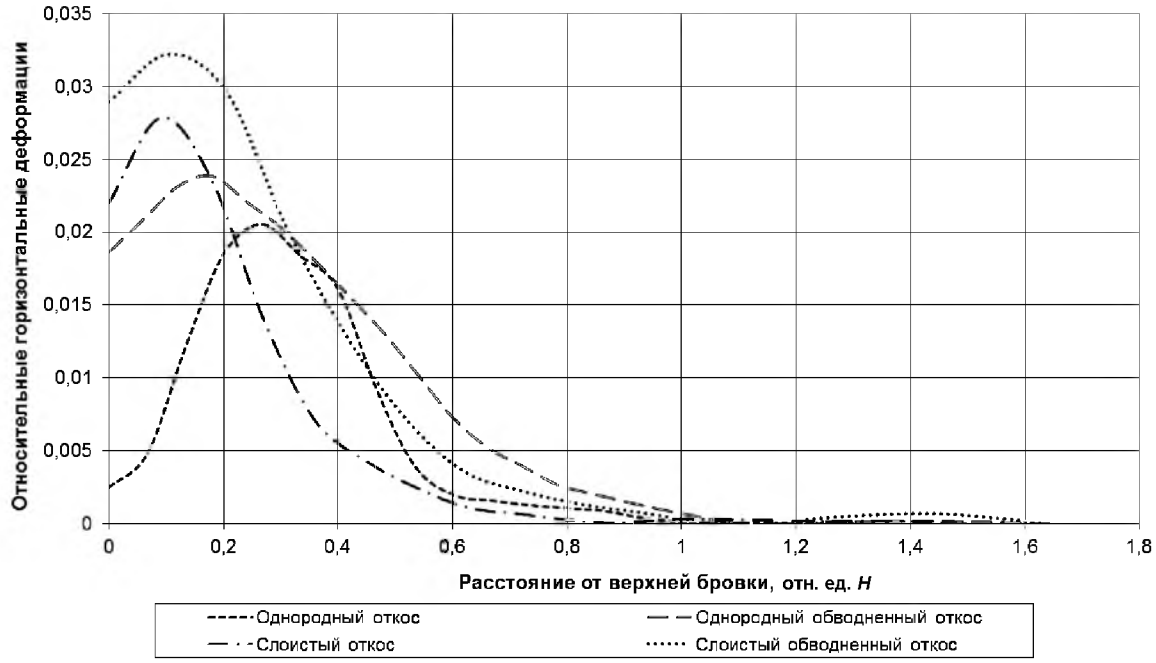


Рис.2. Распределение относительных горизонтальных деформаций дневной поверхности по мере удаления от верхней бровки для модели откоса, находящегося в состоянии предельного равновесия

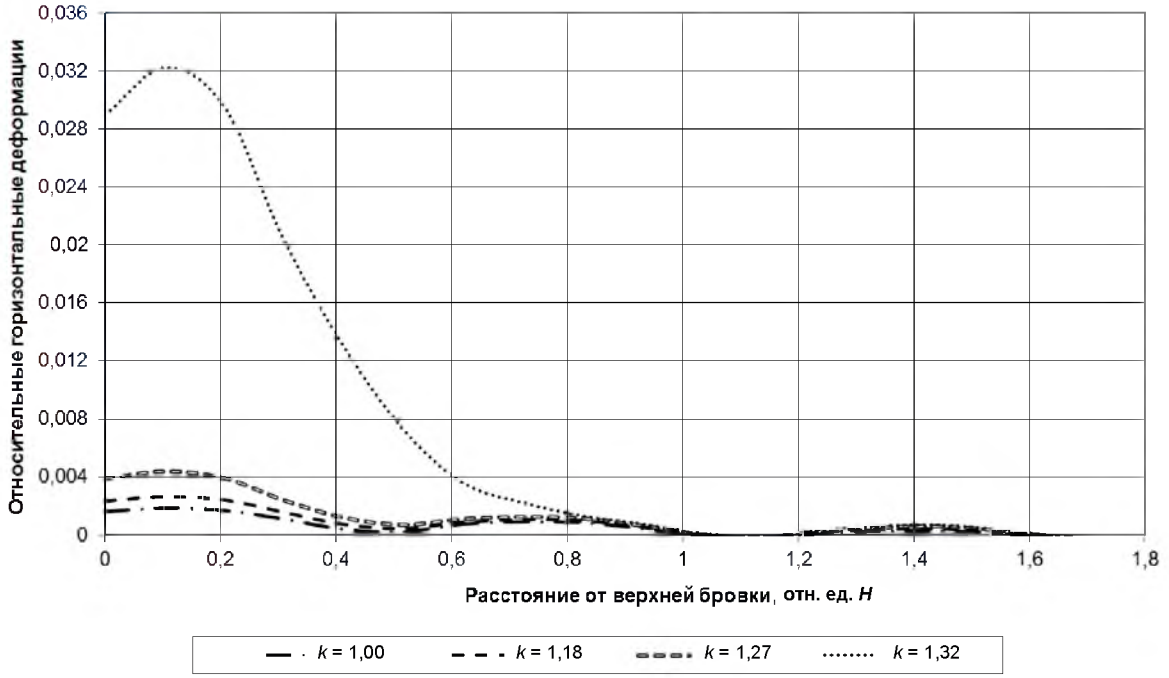


Рис.3. Распределение относительных горизонтальных деформаций дневной поверхности по мере удаления от верхней бровки на различных стадиях устойчивости прибортового массива

ции распространяются на расстояние (0,9-1,1)*H*. Следует отметить, что в нормативных документах в аналогичных условиях границы распространения горизонтальных деформаций по поверхности, примыкающей к верхней бровке откоса, составляют 1,5*H* [5].

Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что надежность оп-

ределения границ распространения горизонтальных деформаций зависит от надежности принимаемых деформационных характеристик массива. Однако упругие характеристики грунтов, в отличие от скальных пород, определить достаточно сложно. В связи с этим можно говорить о необходимости составления каталога, который смог бы объединить в себе показатели деформационных свойств пород различных месторождений.

В рассмотренном варианте расчеты выполнялись по направлению профильных линий, поэтому созданная геомеханическая модель может быть в дальнейшем адаптирована к реальным условиям при сопоставлении натурных данных наблюдений с результатами компьютерного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геомеханика: Учебник для вузов: В 2 т / И.В.Баклашов, Б.А.Картозия, А.Н.Шашенко, В.Н.Борисов // М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та. 2004. Т.2. 249 с.

2. *Зубков В.В.* Оценка фактора безопасности для анализа устойчивости бортов карьеров / В.В.Зубков, И.А.Зубкова // Записки Горного института. 2011. Т.190. С.183-191.

3. *Мочалов А.М.* Оценка устойчивости бортов карьеров по наблюдаемым деформациям // Совершенствование методов расчета сдвижений и деформаций горных пород, сооружений и бортов разрезов при разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях / ВНИМИ. Л., 1985. С.42-52.

4. *Мочалов А.М.* Развитие деформаций в однородном откосе при поэтапной отработке / А.М.Мочалов, А.В.Чебаков // Записки Горного института. 2011. Т.190. С.244-248.

5. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости / ВНИМИ. Л., 1987. 118 с.

6. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах / ВНИМИ. СПб, 1998. 208 с.

7. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.

REFERENCES

1. *Baklashov I.V., Kartozia B.A., Shashenko A.N., Borisov V.N.* Geomechanics. Text-book for Institutes. 2 Books. Moscow: Pub. house of the Moscow State Mining University. 2004. Book 2. 249 p.

2. *Zubkov V.V., Zubkova I.A.* Assessment of safety factor for analysis of stability of boards of open-cast mines // Proceedings of the Mining Institute. 2011. Vol.190. P.183-191.

3. *Mochalov A.M.* Estimation of open-pit slope stability by observable deformations // Improvement of methods for calculation of movements and deformations of rocks, structures and open-pit slopes in coal seam mining under complicated geological-and-mining conditions / VNIMI. Leningrad, 1985. P.42-52.

4. *Mochalov A.M., Chebakov A.B.* Development of deformations in homogeneous slope in stepwise mining // Proceedings of the Mining Institute. 2011. Vol.190. P.244-248.

5. Methodical Instructions on observations for deformations of slopes and dumps, Interpretation of their results and on prediction of stabilitry / VNIMI. Leningrad, 1987. 118 p.

6. Regulations for support of coal open-pit slope stability / VNIMI. Saint Petersburg, 1998. 208 p.

7. *Fadeev A.B.* Finite elements method in geomechanics. Moscow: Nedra, 1987. 221 p.