УДК 622.831

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, (812) 328-86-25, kaf-sgp@mail.ru*
А.Д.КУРАНОВ, *аспирант, (812) 328-86-25, kuranov555@mail.ru*
А.Н.ШОКОВ, *аспирант, (812) 328-86-25, ntl2000@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.G.PROTOSENYA, *Dr. in eng. sc., professor, (812) 328-86-25, kaf-sgp@mail.ru*
A.D.KURANOV, *post-graduate student, (812) 328-86-25, kuranov555@mail.ru*
A.N.SHOKOV, *post-graduate student, (812) 328-86-25, ntl2000@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИКАРЬЕРНЫХ МАССИВОВ С УЧЕТОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ АЛМАЗОНОСНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Определены параметры напряженного состояния прибортового и подкарьерного массивов глубокого рудного карьера на примере разработки месторождения им. В.Гриба. Исследование выполнено с помощью численного моделирования методом конечных элементов.

Ключевые слова: прибортовой массив, подкарьерный массив, карьер, напряжения,

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF STRESSSTATE NEARBORD ARRAYS BASED SEQUENCE MININGCOMBINED WITH OPEN-UNDERGROUND MINING DIAMOND MINE

The parameters of the stress state of nearbord massif of deep open pit on the example of the field development of the V.Grib. This research was done by numerical simulation using finite elements method.

Key words: nearbord massif, underpit massif, open pit, stress.

В мире насчитывается более двух тысяч месторождений, разрабатываемых комбинированным способом. В последние годы наблюдается особенно интенсивный рост числа рудников, использующих комбинированные способы разработки, что связано с достижением карьерами запредельных глубин и возможностью отработки запасов глубоких горизонтов только подземным способом. Результаты анализа практики применения комбинированной технологии за рубежом, проведенной ИПКОН РАН*, указывают на то, что наибольшее число рудников, осуществляющих комбинированную отработку запасов, приходится на предприятия по разработке алмазов. При этом доля предприятий, разрабатывающих алмазоносные месторождения открытым способом, незначительна – порядка 20 %, преобладают комбинированные способы отработки, в то время как в России открытым способом разрабатывается 70 % месторождений, на подземные работы перешла незначительная часть рудников («Мир» и «Интернациональный»).

По разведанным запасам алмазов Россия занимает первое место в мире, промышленная добыча ведется в трех регионах: в Республике Саха (Якутия), Пермской и Архангельской областях. Комбинированная

* *Каплунов Д.Р.* Комбинированная геотехнология / Д.Р.Каплунов, В.Н.Калмыков, М.В.Рыльникова. М., 2003. 560 с.

Kaplunov D.R. Combined geotechnology / *D.R.Kaplunov, V.N.Kalmykov, M.V.Rylnikova.* Moscow, 2003. 560 p.

разработка обеспечит более полное извлечение запасов и улучшение технико-экономических показателей добычи алмазов, геомеханическое обеспечение единого проекта открыто-подземной разработки месторождения позволит разработать мероприятия по повышению устойчивости бортов в сложных гидрогеологических условиях, обосновать параметры систем вскрытия и разработки приконтурныхзапасов и в целом повысить безопасность отработки месторождений. Это подчеркивает необходимость изучения особенностей напряженного состояния прикарьерных массивов алмазоносных месторождений.

Исследование выполнено применительно к условиям отработки алмазоносного месторождения им. В.Гриба. Характерные для месторождений Архангельской алмазоносной провинции и многих других геологические и гидрогеологические условия отработки месторождения им. В.Гриба позволят использовать полученные результаты применительно к другим месторождениям.

Предполагается, что промышленная добыча ископаемых начнется в конце 2013 г. Разработка трубки будет вестись комбинированным способом в два этапа: за 16 лет открытым способом планируется добыть более 65 % запасов, оставшиеся алмазы будут извлекаться из рудника под дном карьера, с оставлением предохранительного рудного целика. Конечная глубина карьера составит 490 м.

В качестве метода исследования использовалось численное моделирование методом конечных элементов. Использование данного метода при оценке устойчивости борта карьера, в отличие от классических методик, основанных на теории предельного равновесия, позволит учесть в расчетах, помимо прочностных свойств массива, его деформационные свойства, неоднородное геологическое строение борта, обводненность пород и последовательность ведения открытых работ.

Объектом исследования является устойчивость борта карьера с учетом последовательности ведения открытых работ путем изменения контура борта карьера, т.е. учетом в явном виде движения борта карьера при разработке месторождения открытым способом. Для проведения исследования разработана плоская конечно-элементная модель. Граничные условия в модели были заданы следующим образом: в нижней грани модели запрещены перемещения в вертикальном направлении; в боковых гранях запрещены перемещения, перпендикулярные граням; верхняя грань свободна для перемещений.

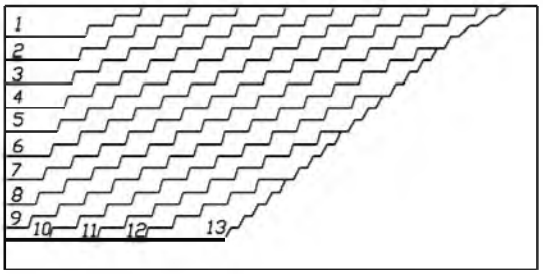


Рис.1. Схема положения борта карьера на каждом из рассматриваемых расчетных этапов (1-13)

Все породы при расчетах заданы как весомые упруго-пластические материалы, поведение которых описывается условием прочности Мора – Кулона. Средневзвешенные физико-механические свойства пород и прочностные свойства с учетом коэффициента структурного ослабления массива приведены в таблице. Последовательность раскрытия борта карьера в модели представлена 13 расчетными этапами (рис.1). Расчет модели был выполнен для однородного и неоднородного слоистого

Физико-механические и прочностные свойства руд и пород

Наименование пород	Объемный вес, кН/м^3	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.
Перекрывающие породы	22	170	0,20	0,045	30
Породы жерла трубки	25	1800	0,27	0,57	40
Породы кратера трубки	24	1750	0,22	0,081	35
Вмещающие породы – падунская свита	22	100	0,19	0,1	34
Вмещающие породы – мезенская свита	27	320	0,19	0,15	37

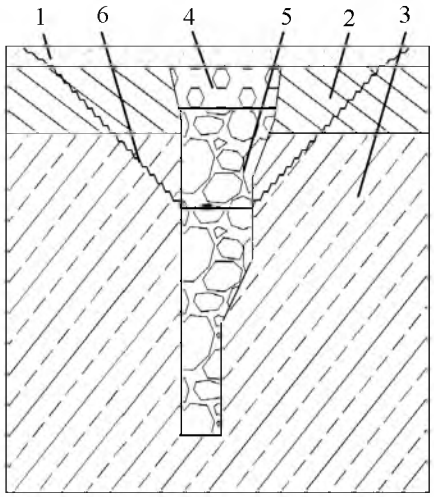


Рис.2. Расчетный геологический разрез месторождения им.В.Гриба

1 –перекрывающие породы; 2 – породы падунской свиты; 3 –породы мезенской свиты; 4 –кратерная фракция пород трубки; 5 –жерловая фракция пород трубки; 6 – проектный контур карьера

массива пород борта карьера. Для обоих случаев расчеты выполнялись с учетом и без учета действия грунтовых вод. Для случая неоднородного слоистого массива был использован геологический разрез алмазного месторождения им.В.Гриба (рис.2).

Для всех расчетных этапов определяется коэффициент запаса устойчивости*, являющийся ключевым показателем напряженно-деформированного состояния при оценке устойчивости бортов карьеров. Учет обводненности массива выполняется методом построения пьезометрических линий, исходя из которых определяется поровое давление, включающееся в анализ напряженного состояния для расчета эффективных напряжений и учитываемое при расчете коэффициента запаса устойчивости борта. Считается, что высота высачивания подземных вод в пространство карьера составляет 20 м на первых трех этапах расчета, 40 м на этапах расчета с 4-го по 6-й, 60 м на этапах с 7-го по 9-й, 80 м на этапах с 10-го по 12-й и на заключительном 13-м этапе расчета высота высачивания составляет 120 м.

На первоначальном этапе исследования выполнено моделирование однородного геологического строения массива. Из анализа зависимости коэффициента запаса устойчивости по этапам раскрытия карьера (рис.3) можно заключить, что с увеличением глубины карьера коэффициент запаса устойчивости уменьшается немонотонно.

Кривая имеет изгибы, соответствующие этапам расчета 2-3 и 10-11, которые объясняются изменением параметров борта карьера: в первом случае – увеличением высоты борта, во втором – увеличением угла борта карьера, связанного с постановкой борта в конечное положение.

Также можно заключить, что степень обводненности массива пород в значительной мере влияет на устойчивость борта карьера. Из зависимости также следует, что влияние грунтовых вод на устойчивость борта карьера без учета его геологии носит только количественный характер. Практически на всех этапах расчета отмечается уменьшение коэффициента запаса устойчивости обводненного борта по сравнению с необводненным на 6-22 %. Отмечена тенденция увеличения интенсивности снижения коэффициента запаса устойчивости обводненного борта с увеличением глубины карьера по сравнению с необводненным

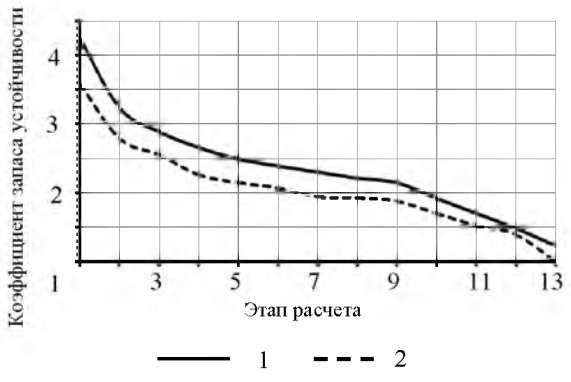


Рис.3. Зависимость изменения коэффициента запаса устойчивости борта по мере отработки карьера для однородного геологического строения массива без учета (1) и с учетом действия воды (2)

* *Куранов А.Д.* Закономерности формирования поверхностей скольжения откосов котлованов в разных грунтах и условиях нагружения / А.Д.Куранов, П.А.Деменков // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: Сб. научн. трудов. Вып.17. Донецк, 2011.С.260-264.

Kuranov AD. Regularities of formation of the sliding surfaces of slopes excavations in different soils and loading conditions / A.D.Kuranov, P.A.Demenkov // Improvement of the technology of construction of mines and underground structures. Sat Nauchn. works. Issue 17. Donetsk, 2011. P.260-264.

бортом. На графике также видно характерное отклонение кривой, соответствующее динамике изменения коэффициента запаса необводненного массива на расчетных этапах 10-11. Подобное отклонение вызвано изменением характера формирования поверхности скольжения в борту карьера. На расчетном этапе 11 борт уже наполовину находится в предельном положении, что вызывает значительное увеличение сдвиговых деформаций и изменение характера кривой динамики изменения коэффициента запаса устойчивости борта. С учетом сказанного можно заключить, что степень влияния грунтовых вод на устойчивость борта главным образом зависит от положения пьезометрической линии относительно поверхности скольжения, это подтверждается аналитическими подходами к решению подобных задач [3].

На следующем этапе было проведено исследование устойчивости борта карьера с учетом геологического строения массива пород месторождения им. В. Гриба. Анализируя зависимость (рис.4), из полученной кривой можно выделить три характерных участка.

Выделенные участки кривой соответствуют этапам отработки карьера: участок AB соответствует этапам 1-3 – отработке перекрывающих пород и пород кратера трубки; участок BC соответствует этапам 3-9 – отработке вмещающих пород и пород жерла трубки; участок CD соответствует постановке борта карьера в конечное положение.

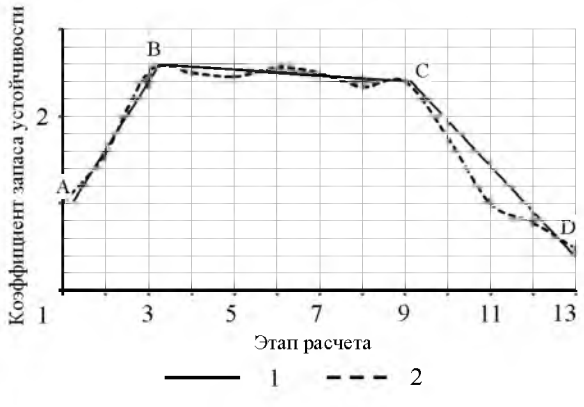


Рис.4. Зависимость изменения коэффициента запаса устойчивости борта по мере отработки карьера для неоднородного слоистого геологического строения массива без учета действия воды

1 – расчетная зависимость;
2 – кусочно-линейная аппроксимация

Как уже было упомянуто выше, кривая изменения коэффициента запаса в точке, соответствующей этапу 11, имеет изгиб, объясняемый формированием глобальной поверхности скольжения при увеличении угла борта карьера при постановке его в конечное положение. Образование характерных участков кривой и интенсивность снижения коэффициента запаса в пределах этих участков подчеркивает необходимость учета геологического строения борта при оценке его устойчивости с учетом последовательности ведения работ.

Сравнив зависимости изменения коэффициента запаса устойчивости борта карьера для однородного строения и неоднородного слоистого строения массива, можно сделать вывод, что при оценке устойчивости бортов карьера по мере его разработки подход с применением средневзвешенных характеристик пород недопустим. Это следует из расхождения значений коэффициента запаса устойчивости на этапах отработки карьера, предшествующих началу его постановки в конечное положение.

В ходе исследования было установлено, что при учете геологического строения массива наличие грунтовых вод в том виде, в каком они учтены в расчете, не оказывает существенного влияния на устойчивость борта. Это объясняется тем, что пьезометрическая линия расположена на значительном расстоянии от поверхности скольжения практически на всех расчетных этапах. Из-за увеличения прочностных характеристик пород с глубиной, поверхность скольжения на большинстве расчетных этапов локализована в области перекрывающих и вмещающих пород падунской свиты. Таким образом, ниже пьезометрической линии находится незначительная часть призмы возможного обрушения, что и объясняет высокий коэффициент запаса устойчивости.

Во второй части исследования рассматривалась разработка первого горизонта месторождения под дном отработанного карьера с высотой предохранительного целика 50 м, с учетом последовательности ведения горных работ. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния в барьерном предохранительном целике, отде-

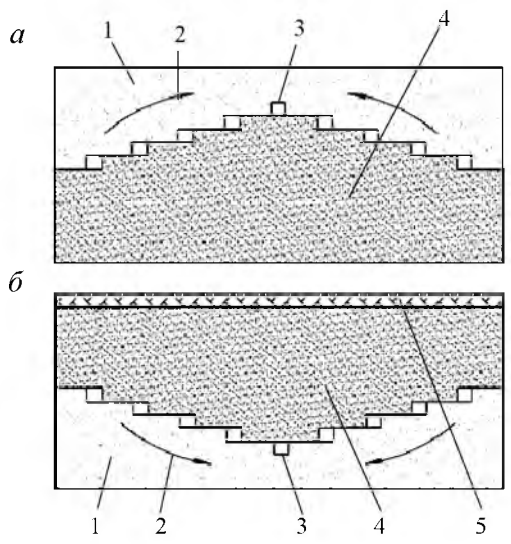


Рис.5.Порядок раскрытия выработок для системы разработки с заполнением выработанного пространства закладкой восходящими (*а*) и нисходящими (б) слоями

1– рудный массив; 2 – направление раскрытия выработок; 3 – раскрытая выработка; 4 – твердеющая закладка; 5 – разрезной слой

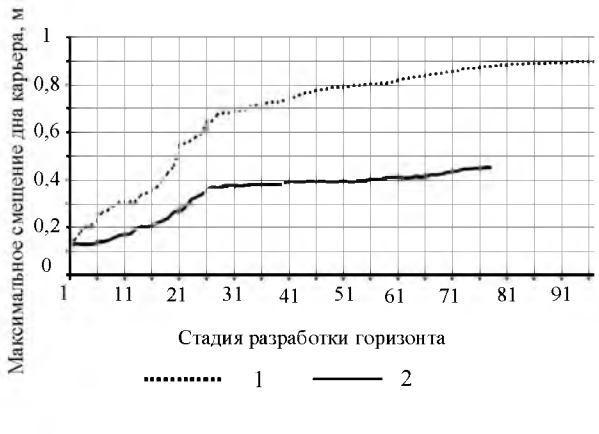


Рис.6. Максимальное смещение дна карьера по мере обработки горизонта восходящими (1) и нисходящими (2) слоями

ляющем рудник от дна карьера. Рассмотрены две системы разработки с заполнением выработанного пространства твердеющей закладкой: нисходящими и восходящими слоями. В работе не рассматривались варианты разработки с открытым выработанным пространством, так как их невозможно реализовать в неустойчивых кимберлитах, для них характерен высокий уровень потерь руды.

Для исследования выполнена плоская конечно-элементная модель с учетом последовательности раскрытия карьера и горных выработок. В модели приняты выработки шириной 5,1 м и высотой 3 м. Для рассматриваемых схем разработки характерна разработка рудного тела заходками последовательно отрабатываемых от центра рудного тела к его флангам с опережением смежных выработок. При этом формируется ступенчатый фронт очистных работ (рис.5). При системе разработки нисходящими слоями с закладкой выработанного пространства учтена отработка первого разрезного слоя выработками уменьшенной ширины 4,2 м.

Проанализируем влияние последовательности разработки на смещения поверхности дна карьера. Из представленной зависимости (рис.6) видно, что при системе разработки восходящими слоями с закладкой смещение дна карьера в два и более раз больше, чем при системе разработки нисходящими слоями. Это объясняется тем, что при нисходящем порядке разработки горизонта с увеличением глубины проводимых горных работ растет защитное перекрытие (кроме потолочины из разрезного слоя). Так, на этапе 27 расчета (рис.6) виден резкий перепад кривой, что соответствует замыканию четвертого слоя выработок, заполненных твердеющей закладкой. При восходящем порядке разработки горизонта характерно постоянное оседание поверхности дна карьера, связанное с проведением выработок с незакрепленной кровлей, которые в свою очередь позволяют кимберлитам свободно деформироваться в сторону выработанного пространства. Характерные отклонения кривой на этапах 14, 21, 26 (рис.6) связаны с формированием в центре рудного тела ступенчатого фронта работ.