

*И.Ю. Рассказов, Г.М. Потапчук, В.И. Мирошников,
М.И. Рассказова*

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ С ЗАКЛАДКОЙ С НИСХОДЯЩЕЙ ВЫЕМКОЙ

Методом численного моделирования исследованы особенности формирования техногенного поля при отработке рудного тела нисходящими горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства. Выявленные закономерности перераспределения напряжений в элементах системы разработки и окружающем массиве горных пород позволили обосновать эффективный способ снижения удароопасности при ведении горных работ.

Семинар № 3

Одной из наиболее сложных проблем подземной разработки месторождений полезных ископаемых в сложных горногеологических условиях и на больших глубинах является прогноз и предотвращение опасных проявлений горного давления, нередко приводящих к катастрофическим последствиям.

Достаточно остро проблема удароопасности стоит на Дальнем Востоке России, где действует целый ряд крупных и средних рудников, на которых наблюдается весь спектр динамических форм проявления горного давления вплоть до сильных с тяжелыми последствиями горных и горно-тектонических ударов. Результаты геомеханических исследований на месторождениях Николаевском, Южном, Антей и ряде других свидетельствуют, что их склонность к горным ударам во многом определяется высоким уровнем действующих в массивах тектонических напряжений [1-4]. Существенная неоднородность естественных полей напряжений, предопределяемая сложностью и особенностями тектонической структуры месторождений, еще больше усиливается при тех-

ногенном воздействии на породный массив в результате ведения горных работ. Перераспределение исходных напряжений и их опасная концентрация на отдельных участках является главной причиной опасных динамических проявлений горного давления. В этой связи выявление и учет закономерностей формирования дополнительного (техногенного) поля напряжений имеют важное значение для обеспечения безопасного и эффективного освоения удароопасных месторождений.

В последние годы наиболее сложная геомеханическая ситуация сложилась при отработке глубоких горизонтов месторождения урановых руд «Антей» [4]. Месторождение представлено в виде локализованных в зонах разломов крутопадающих рудных тел субмеридионального простираания мощностью от нескольких до первых десятков метров и протяженностью по глубине до 1500 м. Вмещающими породами являются мелко- и среднезернистые лейкократовые граниты, а также биотитовые граниты и гранитогайсы. Форма гранитных тел жильная, реже линзообразная.

Основными структурными элементами месторождения «Антей» являются сближенные в пространстве субпараллельные сложно построенные зоны разломов 160 и 13. Они имеют встречные падения и на глубине 750 м практически сливаются. Зона разлома 160 является основной рудоконтролирующей и рудовмещающей и состоит из серий швов север-северо-восточного простирания (по азимуту 25-30°) и крутого падения. Мощность швов тектонических напряжений изменяется от 1 до первых десятков метров.

Практически все разновидности пород месторождения проявляют склонность к упругому деформированию и хрупкому разрушению в динамической форме. К наиболее удароопасным породам относятся лейкократовые граниты, предел прочности которых на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) в среднем изменяется от 180 до 250 МПа, модуль Юнга (E) — от 59,3 до 68,3 ГПа.

По результатам натуральных измерений установлено [3], что в гранитах фундамента действует неравнокомпонентное поле напряжений, в котором преобладают горизонтальные сжимающие напряжения, наибольшие из которых в 1,5–2,5 раза превышают гравитационную составляющую от веса налегающей толщи пород, что указывает на определяющее влияние тектонических сил в формировании естественного напряженного состояния.

Очистные работы на месторождении достигли глубины 700 м (на XI горизонте). На ниже лежащих горизонтах ведутся горно-подготовительные работы. С переходом горных работ на более глубокие горизонты и увеличением выработанного пространства (в настоящее время площадь подработки превышает 100 тыс. м²) начал происходить рост числа и интенсивности динамических проявлений горного давления. Так, если до 2000 г. на

месторождении отмечалось не более 8 случаев динамических проявлений горного давления в год, то начиная с 2004 г. ежегодно регистрируется до 100 и более динамических явлений.

Для разработки месторождения в качестве основной применяется достаточно редко встречающаяся в горной практике система разработки нисходящими горизонтальными слоями с закладной выработанного пространства твердеющими смесями. В зависимости от мощности рудного тела слои отрабатываются одной или несколькими заходками непосредственно под искусственной кровлей закладочного массива. Высота этажа между горизонтами 60 м. В соответствии со сложившимся в последние годы на руднике порядком подготовки и отработки запасов, рудный массив делится на два полублока, отрабатываемых одновременно по простиранию рудного тела. Постепенно уменьшающийся в процессе добычных работ рудный целик разгружается путем камуфлетного взрывания скважинных зарядов, размещаемых в вертикально пробуренных нисходящих скважинах диаметром 105 мм через 2,5 м).

Как показала практика, применяемые способы разгрузки не только не снижают степень удароопасности разрабатываемого массива горных пород, но и усугубляют ее, провоцируя процесс динамического разрушения межполублочных целиков. Именно с разрушением последнего связано наиболее мощное, из зарегистрированных на месторождении, динамическое явление, которое было классифицировано как горный удар горно-тектонического типа. Удар, произошедший 14.05.2005 г. в рудном целике блока 6А-1114 на уровне 13 слоя, сопровождался резким звуком, образованием воздушной волны, сейсмическим эффектом (сопоставимым со взрывом 10 тонн

ВВ), ощущавшимся в здании поверхностного комплекса рудника. В результате горного удара были разрушены борта и кровля уклона с 4 на 5 слой, сопряжения и искусственная кровля заходок 4 и 11 слоев, борта рудоспуска 6А-1114/1, разрушено крепление выработок.

Сложившаяся удароопасная ситуация на месторождении потребовала постановки и проведения комплексных геомеханических исследований, включающих экспериментальные шахтные измерения и математическое моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород методом конечных элементов (МКЭ) [5]. Данный метод весьма эффективен и широко применяется для оценки техногенных полей напряжений в конструктивных элементах систем разработки и прогнозирования проявлений горного давления [6-8].

С помощью математического моделирования МКЭ в упругой двумерной постановке решались следующие задачи: 1) исследовали изменение уровня напряжений в отдельных точках массива и элементах горных конструкций по мере уменьшения величины межполублочного целика в процессе отработки очистного блока (рис. 1); 2) оценивали эффективность применяемых профилактических мероприятий.

Расчеты напряженно-деформированного состояния участка массива горных пород, расположенного на глубине 580–740 м, проводили при следующих граничных условиях: первые главные напряжения σ_1 действуют в горизонтальной ($\sigma_1 = 50$ МПа), а вторые главные напряжения σ_2 — в вертикальной плоскости, при этом их величина задавалась пропорционально весу вышележащих пород и изменялась от 16,5 МПа (на глубине 630 м) до 18,59 МПа (на глубине 730 м). Модуль упругости принимали:

вмещающие породы $E_n = 70$ ГПа, руда $E_p = 35$ ГПа, закладочный массив $E_z = 9$ ГПа. Коэффициент Пуассона у пород, руд и закладочного массива составлял соответственно: 0,21, 0,22 и 0,22. Плотность изменялась от 2700 кг/м³ у пород и руд до 2600 кг/м³ у закладочного массива.

Моделировались следующие стадии отработки блока (см. рис. 1). На 1 стадии отрабатываются первые слои верхнего и нижнего полублоков (рудный массив делится на 2 полублока). На 2 стадии отрабатываются вторые слои верхнего и нижнего полублоков, а ранее отработанные слои заполняются твердеющей закладкой. Такой же порядок отработки сохраняется до 6 стадии включительно, а затем идет последовательная отработка только нижнего полублока (стадии 7-11). Сформировавшийся межполублочный целик разгружается камуфлетным взрыванием ряда вертикальных скважинных зарядов. Результаты расчетов представлялись в виде изолиний средних нормальных напряжений $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ и интенсивности касательных напряжений $\tau_{инт} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$. Анализ результатов моделирования показал следующее. До начала отработки блока напряжения сжатия концентрировались преимущественно в его нижней части вдоль границы закладочного и рудного массивов, при этом значения σ_{cp} не превышали 50 МПа. После деления рудного массива на два полублока (стадия 1 и последующие) область повышенных напряжений начинает перемещаться к центральной части межполублочного целика (точка А), значения которых на 6 стадии отработки превышают у σ_{cp} и $\tau_{инт}$ соответственно 70 и 50 МПа (рис. 1, 2).

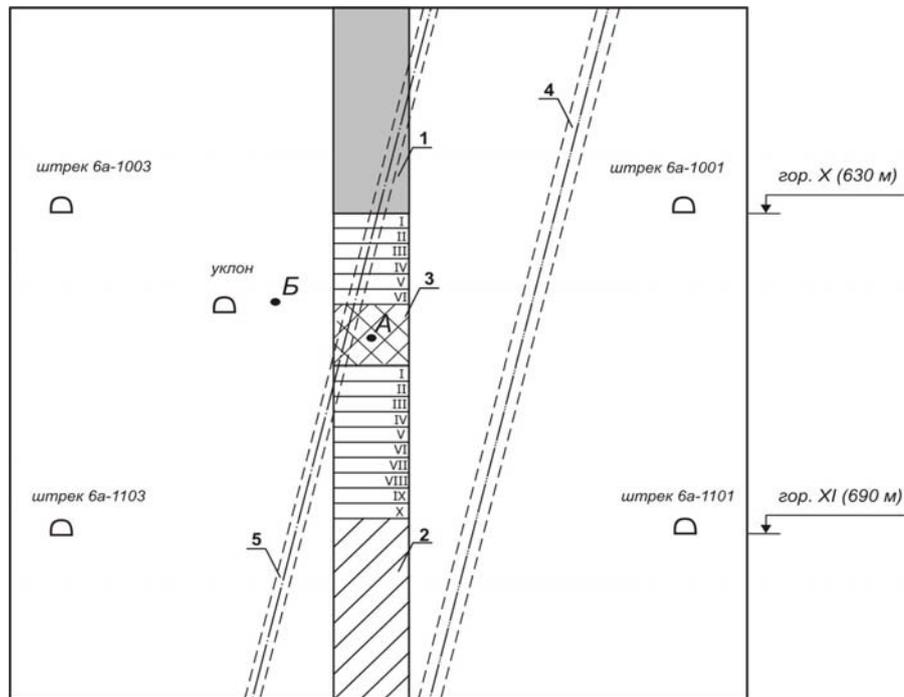


Рис. 1. Обобщенная расчетная схема для моделирования НДС участка месторождения, обрабатываемого нисходящими слоями с закладкой выработанного пространства: 1, 2 – соответственно закладочный и рудный массив, 3 – междуполублочный массив, 4, 5 – тектонические нарушения (римскими цифрами показана очередность отработки горизонтальных слоев; А и Б – характерные точки в массиве)

При этом резко (более чем в 2,5 раза) увеличивается интенсивность касательных напряжений в участке массива вдоль левой границы очистного блока в области влияния уклона (точка Б). Напряженно-деформированное состояние здесь приближается к одноосному ($\sigma_{ср} \approx \tau_{инт}$) и характеризуется высоким уровнем напряжений сдвига, что может приводить к значительным объемным деформациям и вероятности разрушения этого участка массива. Отработка нижнего полублока (стадии 7-11) практически не влияет на уровень напряжений в точках А и Б (см. рис. 1), приводя лишь к разгрузке массива вдоль вертикальных границ закладочного массива.

Резко меняется картина распределения напряжений после проведения профилактических мероприятий по снижению удароопасности путем щелевой разгрузки междуполублочного целика. Сквозная разделка щели шириной 1 м приводит к его разгрузке, но одновременно вызывает резкое (более чем в 2 раза) увеличение сжимающих напряжений в нижней части блока на уровне XI горизонта, расположенного на глубине 690 м от поверхности. Значения $\sigma_{ср}$ в почве выработок 10 слоя превышают 100 МПа, указывая на высокую вероятность динамических проявлений горного давления при зарезке следующего слоя.

$\sigma_{cp}, \tau_{шт}, \text{МПа}$

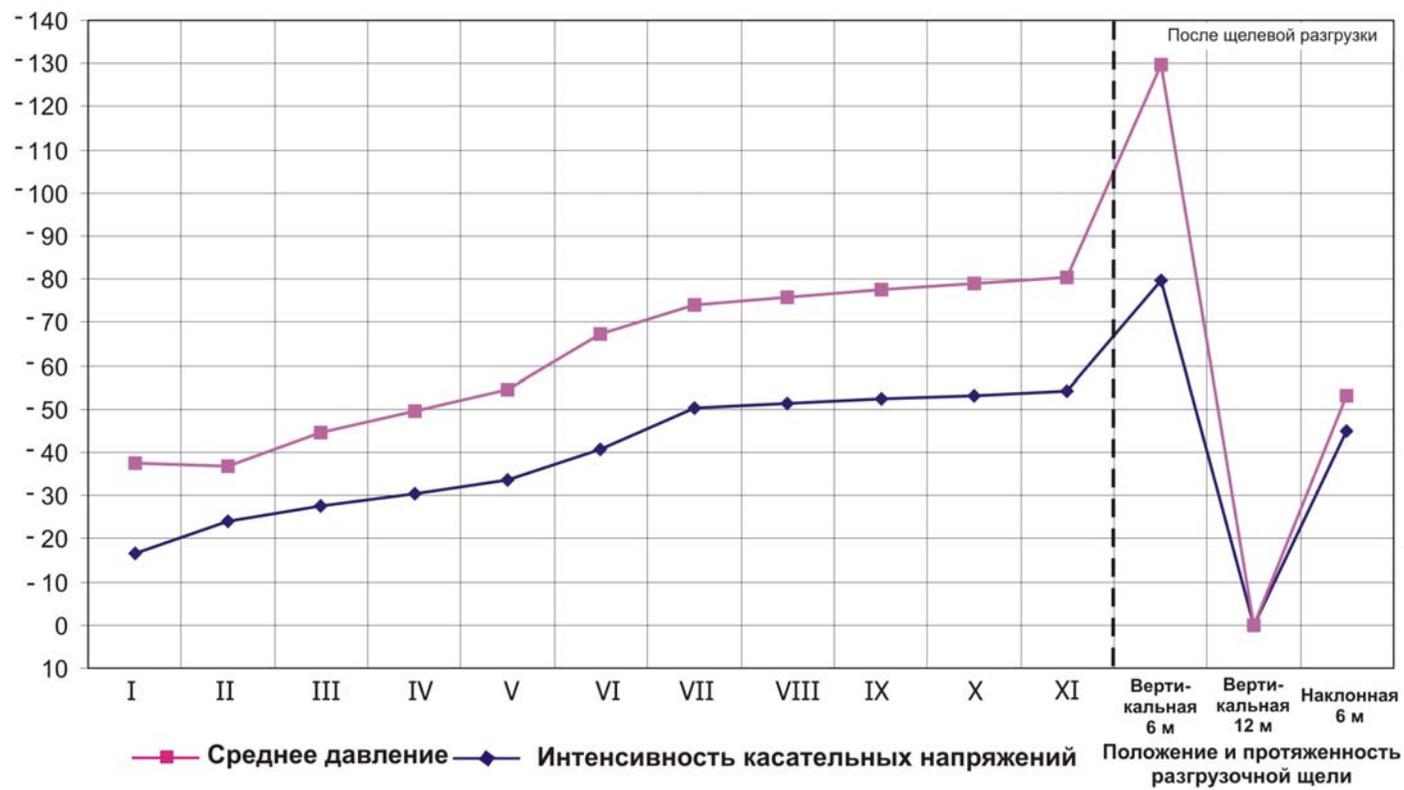


Рис. 2. Изменение среднего давления σ_{cp} и максимальных касательных напряжений $\tau_{шт}$ в центре межполублочного щелика (точка А) на различных стадиях отработки очистного блока

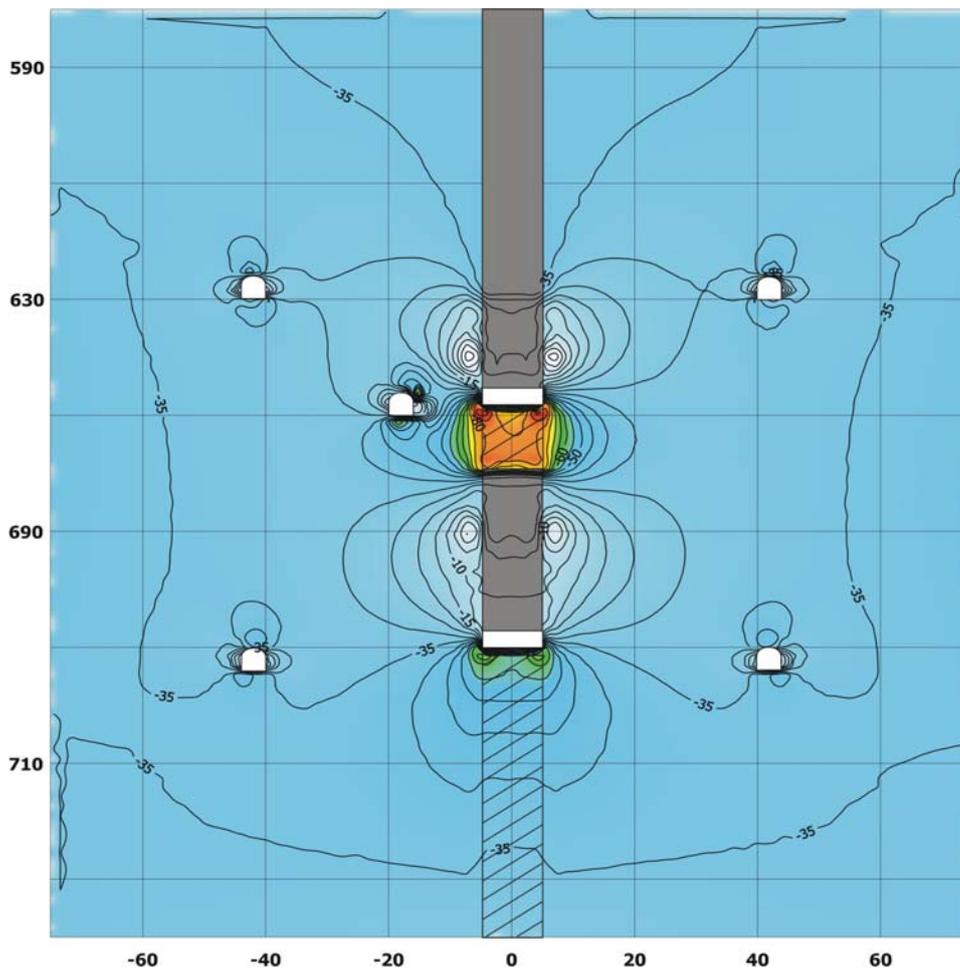


Рис. 3. Распределение σ_{cp} в массиве горных пород на 6 стадии отработки очистного блока (размер целика 12 м)

Кроме того, сквозная разгрузочная щель существенно осложняет выемку запасов межполублочного целика, сопряженную с проходкой горизонтальных выработок (заходок), в кровле которых будут находиться разрушенные взрывом породы.

В случае создания щели не на всю высоту целика (а именно такая практика сложилась при разработке данного месторождения), напряжения снижаются только в окрестностях самой щели, зато в нижней ее части они резко возрастают,

достигая величины близкой к пределу прочности горных пород (см. рис. 2, рис. 4). Тем самым, подтверждается недостаточная эффективность применяемого способа снижения удароопасности.

Результаты математического моделирования удовлетворительно подтверждаются данными натурных измерений геомеханическим методом [9]. В вертикальных скважинах, пробуренных в межполублочном целике блока ба-1110 между 11 и 18 слоями, почти на всем их протяжении отмечалось интенсивное

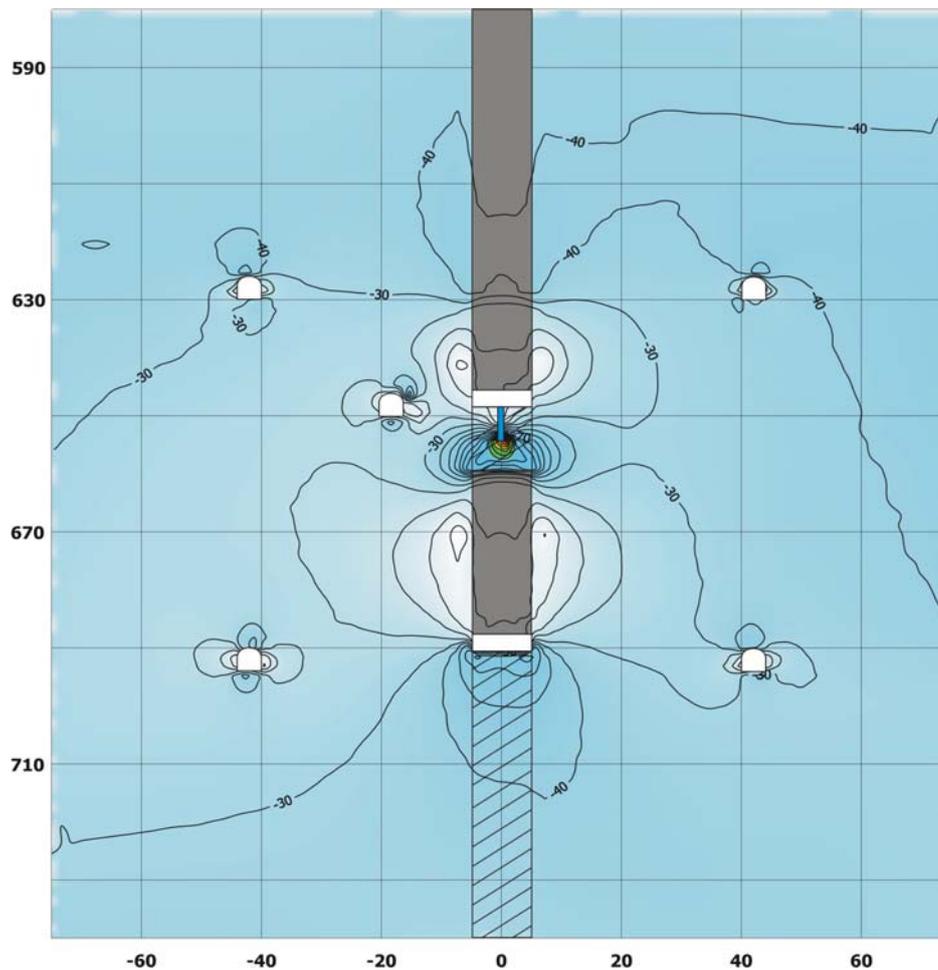


Рис. 4. Распределение σ_{cp} в массиве горных пород после создания вертикальной разгрузочной щели длиной 6 м

дискообразование керна. Наличие по глубине скважины нескольких участков дискования керна, свидетельствует о высоком уровне действующих напряжений, обусловленных их концентрацией в уменьшающемся целике и влиянием тектонической структуры массива. Последнее особенно отчетливо проявляется в участке массива, приуроченного к месту «перизжима» рудоконтролирующего тектонического шва, где ранее неоднократно отмеча-

лись динамические проявления горного давления.

В процессе выбора и геомеханическом обосновании способов снижения удароопасности в числе прочих было выполнено моделирование варианта целевой разгрузки, при котором щель (длиной 8,5 м) создается не в самом целике, а во вмещающем породном массиве под углом 45° к рудному телу (рис. 5).

При таком расположении щели, напряжения концентрируются только в ее призабойной части за пределами мест ве-

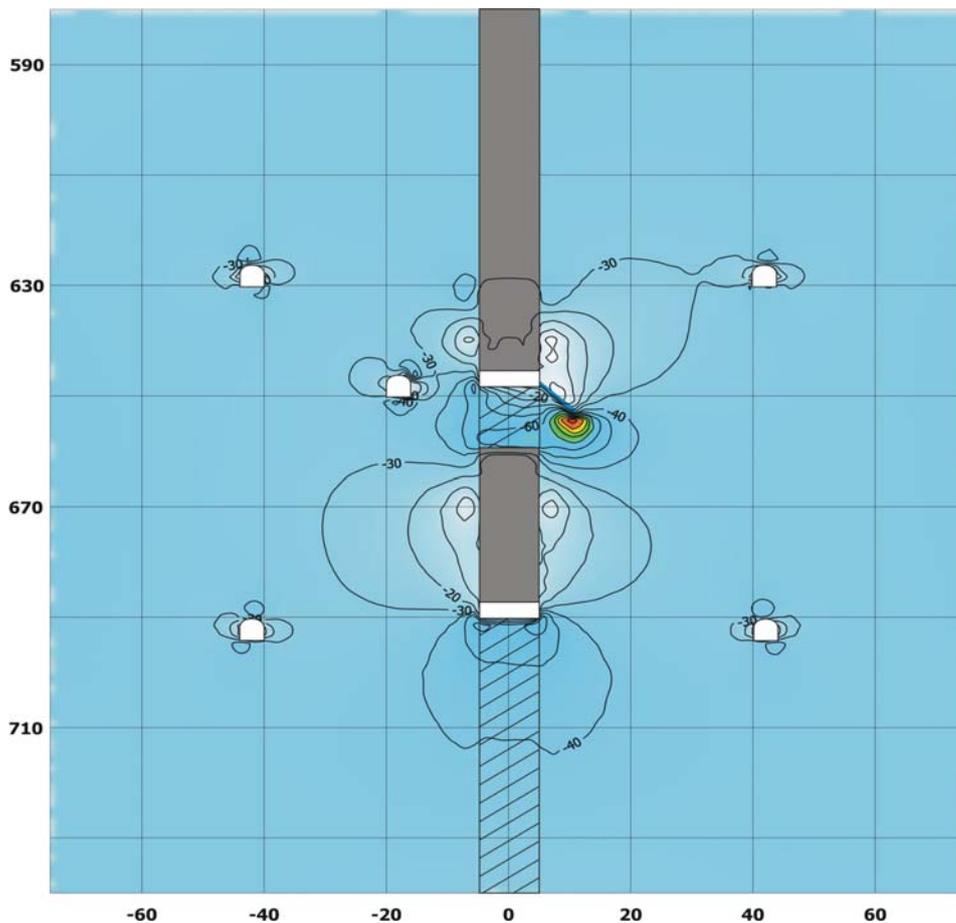


Рис. 5. Распределение σ_{cp} в массиве горных пород после создания наклонной разгрузочной щели длиной 8,5 м

дения горных работ. В самом же целике напряжения снижаются и лишь незначительно (в 1,1-1,3 раза) превышают первоначальный уровень. Выявленные особенности распределения техногенных напряжений в элементах системы разработки дают основания рассматривать такой способ снижения удароопасности как достаточно эффективный. Кроме того, при его реализации существенно улучшаются условия проходки и поддержания горных выработок при доработке блока.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Применяемые на месторождении «Антей» технология и порядок отработки запасов, предусматривающие деление участка рудной залежи на два полублока с последующей разработкой нисходящими горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства, приводят к значительному перераспределению напряжений в зоне влияния очистной выемки и их опасной концентрации в отдельных участках массива горных пород. При этом наиболее высокая концентрация напряжений отмечена в формирующемся межполублочном целике, где среднее давление превышает

первоначальный уровень в 1,8–2 раза, а интенсивность касательных — в 2 раза, что указывает на потенциальную удароопасность этого участка массива.

2. Принятая на предприятии схема разгрузки массива путем камуфлетного взрывания вертикальных скважинных зарядов, не в полной мере обеспечивает снижение удароопасности, так как при этом происходит перераспределение и опасная концентрация напряжений или в нижней части блока (при разделке сквозной щели) или (при создании щели не на всю высоту целика) в нижней части целика, что создает высокую вероят-

ность динамических проявлений горного давления при ведении горных работ на этих участках.

3. Для предотвращения динамических проявлений горного давления при отработке межполублочных целиков может быть рекомендован предлагаемый вариант щелевой разгрузки с расположением щели длиной 8,5 м во вмещающем породном массиве под углом 45° к рудному телу, обеспечивающий снижение напряжений в горном массиве и создание благоприятных условий проходки и поддержания горных выработок при доработке блоковых запасов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассказов И.Ю., Курсакин Г.А. Оценка и контроль удароопасности массива горных пород на рудниках. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 167 с.

2. Повышение эффективности подземной разработки рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока / А.М. Фрейдин, В.А. Шалауров, А.А. Еременко и др. Новосибирск: Наука, СИФ, 1992. – 177 с.

3. Поляков А.Н. Прогноз удароопасности горнотехнических ситуаций на перспективные глубины разработки // Горный журнал. 1993. № 4. С. 51-56.

4. Особенности динамических проявлений горного давления на месторождении «Антей» / И.Ю. Рассказов, Б.Г. Саксин, П.А. Аникин, Г.П. Потапчук, Б.А. Просекин, О.А. Исьянов // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2007. № 0В9. С. 167-177.

5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике, М.: Недра, 1987.

6. Рассказов И.Ю., Чернышов О.И., Марач В.М. Влияние условий разработки на характер формирования техногенных полей напряжений в удароопасном массиве горных пород // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 8. – С. 50-55.

7. Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.

8. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: Справочное пособие / И.М. Петухов, А.М. Линьков, В.С. Сидоров и др. – М.: Недра, 1992.

9. Инструкция по безопасному ведению горных пород на рудниках и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склоновых и опасных по горным ударам (РД 06-329-99) / Колл. авторов. — М.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – 66 с. **ПДАБ**

Коротко об авторах

Рассказов И.Ю. – доктор технических наук, директор,

Потапчук Г.М. – младший научный сотрудник,

Мирошников В.И. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

Рассказова М.И. – младший научный сотрудник,

Института горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2008».

Рецензент д-р техн. наук, проф. С.А. Гончаров.