

ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И НАГРУЗОК НА ЦЕЛИКИ ДЛЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РУДНИКА «БАДРАН»

*К.т.н. Барышников В.Д., к.т.н. Болтенгаген И.Л.
Институт горного дела СО РАН, Новосибирск, Россия*

АННОТАЦИЯ: Предложены приближенные алгебраические формулы для вычисления смещений земной поверхности, конвергенции кровли и почвы выработанного пространства и нагрузок на целики, основанные на аналитическом решении задачи теории упругости о смещениях вокруг плоского разреза с внутренним давлением. Выполнены расчеты напряжений в конструктивных элементах варианта камерно- целиковой системы разработки при различных порядках выемки рудных запасов. Приведены прогнозные оценки смещений земной поверхности.

Введение

Золоторудное месторождение «Бадран» разрабатывается с 1986г [1]. Рудный пласт мощностью 1.6-2.3 м расположен под склоном крутизной 15° и падает под углом около 28° вглубь горы. При добыче руды применялись различные варианты камерно-целиковой системы разработки с закладкой камер смерзающимися смесями [2,3]. В результате выемки рудных запасов создано заполненное льдопородой выработанное пространство шириной (по простиранию) около 170 м и длиной (по падению) около 380 м. В настоящее время горные работы достигли глубины 260 м, на которой температура вмещающих пород не обеспечивает смерзания закладочного материала. В дальнейшем планируется снижать ширину выработанного пространства со 170м на глубине 260м до 110 м на глубине 280м и до 70м на глубине от 300 до 340м. Увеличение глубины разработки сопровождается ростом напряжений в целиках до предельных значений, соответствующих прочности пород на сжатие. Дополнительным фактором, ухудшающим геомеханические условия разработки, является наличие в непосредственной кровле формируемого выработанного пространства пласта милонита, прочность которого более чем в два раза ниже прочности руды и пород основной кровли (песчаника и алевролита). В данных условиях необходимо усовершенствование технологии добычи руды. При отработке камер первой очереди между ними формируются целики, отрабатываемые во вторую очередь после заполнения первичных камер сыпучей закладкой. Отработка каждого из целиков сопровождается перераспределением горного давления и увеличением нагрузки на оставшиеся целики. Изменение последовательности отработки целиков существенно влияет на геомеханическую обстановку. Порядок выемки рудных запасов, оставленных в целиках, камерами второй очереди является эффективным способом управления горным давлением. Предложен новый метод для оперативной оценки напряжений в конструктивных элементах варианта системы разработки и сдвижения земной поверхности при сплошной отработке наклонных рудных залежей по камерно- целиковой схеме. Метод применен для исследования перераспределения давления в целиках при различных порядках их отработки. Сравнивались варианты отработки целиков от центра к флангам и от фланга к центру. Изучалась концентрация напряжений на фронте горных работ при различных пролетах сплошной разработки запасов блока двумя очистными фронтами от центра к флангам. Определены также параметры сдвижения земной поверхности вследствие ведения горных работ на руднике.

Расчет смещения дневной поверхности

Для оценки вертикальных смещений на поверхности при разработке пологой рудной залежи использовалось решение академика Л.И.Седова [4] задачи о смещениях в упругом

пространстве с горизонтальной щелью длиной L , равной $2a$, к берегам которой приложено нормальное давление σ :

$$V = \frac{\sigma}{E}(1+\nu)[2(1-\nu)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\sqrt{(x^2-y^2-a^2)^2+4x^2y^2}-(x^2-y^2-a^2)}-y\right)-\frac{xy}{\sqrt{2}}\frac{\sqrt{\sqrt{(x^2-y^2-a^2)^2+4x^2y^2}+(x^2-y^2-a^2)}}{\sqrt{(x^2-y^2-a^2)^2+4x^2y^2}}+y-\frac{y^2}{\sqrt{2}}\frac{\sqrt{\sqrt{(x^2-y^2-a^2)^2+4x^2y^2}-(x^2-y^2-a^2)}}{\sqrt{(x^2-y^2-a^2)^2+4x^2y^2}}]$$
 (1)

где x, y – горизонтальная и вертикальная координаты, отсчитываемые от центра щели; E, ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона. Смещение на дневной поверхности при отработке залежи на глубине H , превышающей ширину выработанного пространства L , можно оценить с помощью приведенной формулы, полагая y равным H и заменяя σ величиной γH , где γ – удельный вес налегающей толщи пород (наличие свободной поверхности в упругом пространстве учитывается коэффициентом 2 в соответствии с методом изображений [5]):

$$V = \frac{2\gamma H}{E}(1+\nu)[2(1-\nu)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\sqrt{(x^2-H^2-a^2)^2+4x^2H^2}-(x^2-H^2-a^2)}-H\right)-\frac{xH}{\sqrt{2}}\frac{\sqrt{\sqrt{(x^2-H^2-a^2)^2+4x^2H^2}+(x^2-H^2-a^2)}}{\sqrt{(x^2-H^2-a^2)^2+4x^2H^2}}+H-\frac{H^2}{\sqrt{2}}\frac{\sqrt{\sqrt{(x^2-H^2-a^2)^2+4x^2H^2}-(x^2-H^2-a^2)}}{\sqrt{(x^2-H^2-a^2)^2+4x^2H^2}}]$$
 (2)

Рис.1 позволяет сравнить вертикальные смещения на поверхности, полученные с помощью предложенной аналитической формулы (2) (сплошная линия), с результатами компьютерного моделирования методом конечных элементов (пунктирная линия) для горизонтальной залежи мощностью 2.5 м и пролетом отработки 70 м на глубине 300 м ($E=40$ ГПа, $\nu=0.25$ и $\gamma=27$ КН/м³) [2]. Моделирование выполнялось для начального гидростатического напряженного состояния (горизонтальная компонента исходного поля напряжений равна вертикальной компоненте, обусловленной весом налегающей толщи пород) в условиях обобщенной плоской деформации. Применялась дискретизация области на 1391 треугольный элемент с 763 узлами с минимальным размером элемента вблизи выработанного пространства около 60 см. Сравнение приведенных графиков показывает, что аналитическая формула (2) позволяет получать вполне удовлетворительные оценки вертикальных смещений на дневной поверхности с точностью около 15%.

Необходимо сделать ряд замечаний об области применения предложенной расчетной формулы (2). Увеличение высоты выработанного пространства за счет возможного расслоения пород кровли может привести к повышению величин вертикальных смещений подработанной толщи пород. В приведенных расчетах наличие закладки в выработанном пространстве не учитывалась по следующим причинам. Во-первых, сухая закладка препятствует вывалам вмещающих пород кровли в выработанное пространство, снижая размер зоны обрушения. Во-вторых, реакция закладочного массива на смещения кровли и почвы полости, сформированной в результате выемки запасов, обеспечивает дополнительное вертикальное давление на вмещающие породы, которое, с одной стороны, повышает устойчивость массива горных пород вокруг выработанного пространства, с другой, снижает величину вертикального смещения налегающей толщи пород. Следовательно, выполненные расчеты являются верхней оценкой величин возможных смещений. Основными факторами, которые могут привести к существенному увеличению смещений земной поверхности, являются блочное строение вмещающих пород всякого бока и геологические нарушения вокруг обрабатываемого пространства.

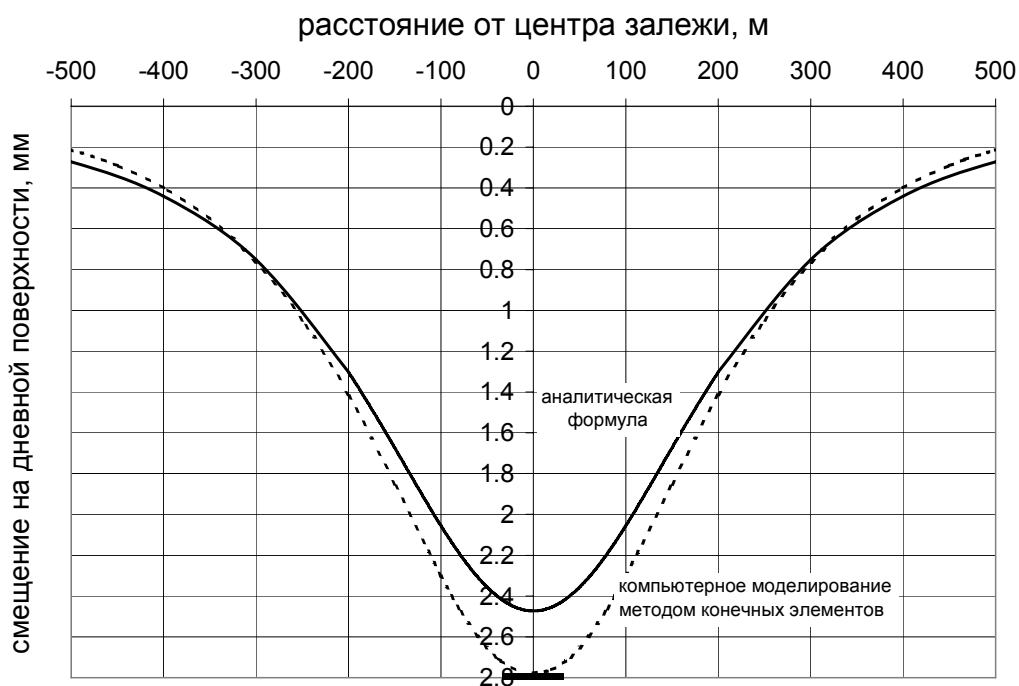


Рис.1. Сопоставление величин вертикальных смещений на дневной поверхности, полученных по аналитической формуле (2) (сплошная линия) и с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов (пунктирная линия), для горизонтального выработанного пространства высотой 2.5 м и шириной 70 м на глубине 300 м.

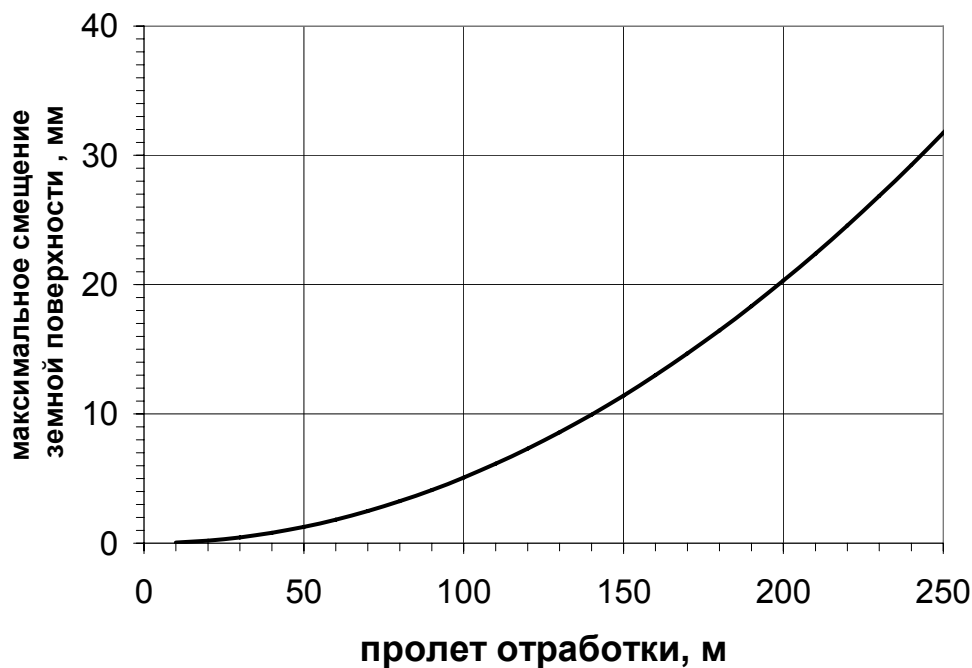


Рис.2. Предельные величины вертикальных смещений над центром залежи на дневной поверхности при различных пролетах отработки.

Величина максимального смещения над центром залежи ($x=0$) определяется с помощью уравнения [6]

$$V_m = \frac{\gamma H a}{E} \frac{2(1+\nu)}{\sqrt{1+H^2/a^2} + H/a} \left(2(1-\nu) + \frac{H/a}{\sqrt{1+H^2/a^2}} \right).$$

На глубине, значительно превышающей пролет разработки, существует предельное смещения V_{max} , которое получается из последней формулы при $H/a \gg 1$:

$$V_{max} = \frac{\gamma L^2 (1+\nu)(3-2\nu)}{4E}.$$

На рис.2 показаны предельные величины смещений дневной поверхности для различных пролетов отработки залежи L .

Расчет нагрузок на целики

Расчет нагрузок на целики выполнен в соответствии с подходом, изложенным в [7]. Решение Седова (1) применяется для оценки деформаций конструкций (целиков), расположенных на глубине H ($H \gg L$). Конвергенция кровли и почвы Δ горизонтального выработанного пространства высотой h и шириной L вычисляется по формуле

$$\Delta = \frac{2\sigma(1-\nu^2)}{E} L \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2} + \frac{2\sigma(1+\nu)}{E} L \cdot Q,$$

где E и ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона массива горных пород, x – расстояние от центра выработки, σ – вертикальное напряжение, действовавшее на контуре создаваемой выработки до ее формирования. Первое слагаемое уравнения соответствует конвергенции кровли и почвы плоского разреза, а второе характеризует дополнительную конвергенцию за счет вертикальной деформации стенок выработки. Величина Q зависит от коэффициента Пуассона, высоты и ширины разрабатываемого пространства и определяется уравнением

$$Q = 2(1-\nu) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{2L} \sqrt{1 + \frac{h^2}{4L^2} + \frac{h^2}{4L^2}} - \frac{h}{2L}} \right) + \frac{h}{2L} -$$

$$- \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\frac{h}{2L} \sqrt{1 + \frac{h^2}{4L^2} - \frac{h^2}{4L^2}}}}{\sqrt{1 + \frac{h^2}{4L^2}}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{h}{2L} \frac{\sqrt{\frac{h}{2L} \sqrt{1 + \frac{h^2}{4L^2} + \frac{h^2}{4L^2}}}}{\sqrt{1 + \frac{h^2}{4L^2}}}.$$

Отношение конвергенции кровли и почвы выработанного пространства к его высоте (вертикальная деформация конструкций) определяется следующим уравнением

$$\varepsilon = \frac{2\sigma(1-\nu^2)}{E} \frac{L}{h} \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2} + \frac{2\sigma(1+\nu)}{E} \frac{L}{h} \cdot Q, \quad (3)$$

Сопоставление результатов компьютерного моделирования методом конечных элементов с оценкой вертикальной деформации контура выработки прямоугольного поперечного сечения показало, что предлагаемая алгебраическая аппроксимация является вполне удовлетворительным приближением при средней погрешности около 15%. В сравнении с результатами компьютерного моделирования рассчитанные по предлагаемой формуле величины деформаций имеют завышенные значения (за исключением части выработки вблизи ее стенок). Моделировались прямоугольные выработки с отношениями ширины к высоте в пределах значений от 1 до 10.

Определим величину «снимаемых» напряжений σ в случае частичной выемки запасов полезного ископаемого в разрабатываемом пространстве. Рис.3 иллюстрирует участок горных работ при выемке запасов залежи по камерно- целиковой схеме. Увеличение вертикальных напряжений σ_p в рудных целиках вследствие ведения горных работ с учетом нагружения ленточных целиков в условиях обобщенной плоской деформации определяется цепочкой равенств

$$\sigma_p = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon = 2\sigma \frac{L}{h} \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2} + 2\sigma \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} \cdot Q \quad (4)$$

Величину «снимаемых» напряжений σ на поверхности кровли и почвы разрабатываемого пространства с размещенными в нем конструкциями целиков оценивается следующим образом. Вертикальная сила F_0 , действовавшая на горизонте разработки, распределяется неравномерно по поверхности горизонта после создания выработанного пространства: часть нагрузки F_p принимают на себя целики, часть F_r – массив горных пород. Общая снимаемая нагрузка может быть оценена по формуле $F_0 = \sigma_0 S$, где S – площадь отработанного пространства, а σ_0 – величина начального вертикального напряжения $\sigma_0 = \gamma H$ (γ – удельный вес массива горных пород, H – глубина разработки). Нагрузка, распределенная в массиве горных пород, может быть оценена по формуле $F_r = \sigma S_0$, где S_0 – общая площадь отработки (с учетом оставленных целиков), а σ – неизвестная пока величина снимаемых вертикальных напряжений на общем контуре отрабатываемого пространства. Нагрузка, распределенная в целиках, может быть оценена следующим образом $F_p = \int \sigma_p dS_p$, т.е. интегрированием вертикальных напряжений σ_p в конструктивных элементах системы разработки (формула (4)) по площади поверхности, занятой целиками. Снимаемое напряжение может быть определено из уравнения силового баланса $F_0 = F_r + F_p$. Выполним анализ каждого из слагаемых последнего уравнения.

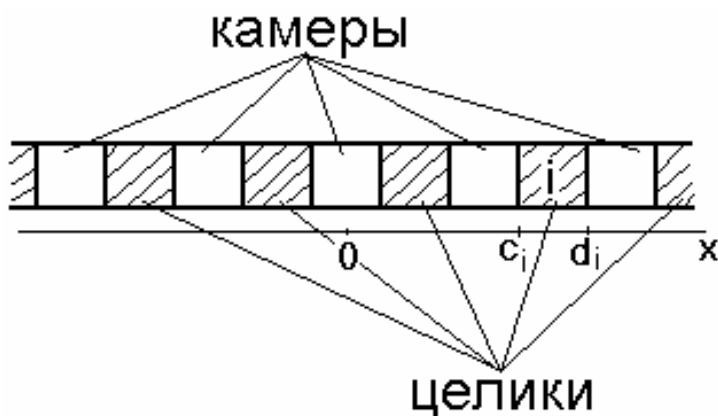


Рис.3. Формирование рудных целиков между первичными камерами.

Площадь отработанного пространства S может быть вычислена по формуле

$$S = L_c W ,$$

где L_c – суммарная ширина камер в выработанном пространстве, а W – его длина в направлении, перпендикулярном поперечному сечению, показанному на рис.3. Общая снимаемая нагрузка может быть вычислена по формуле

$$F_0 = \sigma_0 S = \sigma_0 L_c W . \quad (5)$$

Площадь отрабатываемого пространства $S_0 = LW$, а нагрузка, распределенная в массиве горных пород, определяется по формуле

$$F_r = \sigma S_0 = \sigma LW , \quad (6)$$

где σ – искомая величина «снимаемых» вертикальных напряжений.

Для определения величины силы, распределенной по поверхности целиков, необходимо выполнить более сложные математические выкладки. Сначала вычислим силу, распределенную в одном рудном целике i , ограниченном вертикальными линиями $x=c_i$ и $x=d_i$ (см. рис.3). С учетом (4) получаем

$$f_p^i = W \int_{c_i}^{d_i} \sigma_p(x) dx = W \int_{c_i}^{d_i} 2\sigma \frac{L}{h} \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2} dx + 2\sigma \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} W(d_i - c_i) \cdot Q =$$

$$= W 2\sigma \frac{L}{h} \int_{c_i}^{d_i} \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2} dx + 2\sigma \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} W(d_i - c_i) \cdot Q$$

Интеграл после замены переменной $\xi=2x/L$ приводится к следующей форме

$$I_i = \int_{2c_i/L}^{2d_i/L} \sqrt{1 - \xi^2} d\xi.$$

Учитывая, что [8]

$$\int (a^2 - \xi^2)^{1/2} d\xi = \frac{\xi}{2} (a^2 - \xi^2)^{1/2} + \frac{a^2}{2} \arcsin \frac{\xi}{a}.$$

имеем

$$I_i = \int_{2c_i/L}^{2d_i/L} \sqrt{1 - \xi^2} d\xi = \left(\frac{x}{L} \left(1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2\right)^{1/2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{2x}{L} \right) \Big|_{c_i}^{d_i}.$$

После подстановки пределов интегрирования получим

$$I_i = \frac{d_i}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{2d_i}{L}\right)^2} - \frac{c_i}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{2c_i}{L}\right)^2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{2d_i}{L} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{2c_i}{L}, \quad (7).$$

Сила, распределенная в одном рудном целике, вычисляется по формуле

$$f_p^i = \sigma \frac{L^2}{h} W I_i + 2\sigma \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} W(d_i - c_i) \cdot Q.$$

Полная сила, распределенная во всех целиках, вычисляется суммированием сил в каждом целике

$$F_p = \sum_{i=1, N} f_p^i = \sigma \frac{L^2}{h} W \sum_{i=1, N} I_i + 2\sigma \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} W \sum_{i=1, N} (d_i - c_i) = \sigma \frac{L^2}{h} W J + 2\sigma \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} W L_p, \quad (8)$$

где N – количество целиков, а

$$J = \sum_{i=1, N} I_i - \text{сумма интегралов (7)} \text{ и } L_p = \sum_{i=1, N} (d_i - c_i) - \text{суммарная ширина целиков}.$$

Уравнение силового баланса с учетом соотношений (5,6,8) приводит к следующим формулам

$$F_0 = F_r + F_p,$$

$$\sigma_0 L_c W = \sigma L W + \sigma \frac{L^2}{h} W J + 2\sigma \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} W L_p,$$

$$\sigma = \sigma_0 \frac{L_c}{L + \frac{L^2}{h} J + \frac{2}{1-\nu} \frac{L}{h} L_p \cdot Q}.$$

Увеличение напряжений в целиках вследствие ведения горных работ вычисляется по формуле (4)

$$\sigma_p = 2\sigma_0 \frac{L_c}{L + \frac{L^2}{h} J + \frac{2}{1-\nu} \frac{L}{h} L_p \cdot Q} \left[\frac{L}{h} \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L}\right)^2} + \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} \cdot Q \right].$$

Отношение напряжений в целиках к величине начального вертикального напряжения, обусловленного весом налегающей толщи пород, с учетом исходного вертикального сжатия целиков определяет коэффициент концентрации напряжений в целиках

$$k = 1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_0} = 1 + 2 \frac{L_c}{L + \frac{L^2}{h} J + \frac{2}{1-\nu} \frac{L}{h} L_p \cdot Q} \left[\frac{L}{h} \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2} + \frac{1}{1-\nu} \frac{L}{h} \cdot Q \right], \quad (9)$$

величина J зависит от технологических параметров и определяется следующим уравнением

$$J = \sum_{i=1, N} \frac{d_i}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{2d_i}{L} \right)^2} - \frac{c_i}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{2c_i}{L} \right)^2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{2d_i}{L} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{2c_i}{L}.$$

В последних уравнениях L – полная ширина разрабатываемого пространства (пролет отработки), L_p и L_c – суммарная ширина целиков и камер ($L = L_p + L_c$), h – высота камер и целиков (мощность залежи), ν – коэффициент Пуассона, x – расстояние от центра разрабатываемого пространства, N – количество целиков, d_i и c_i – x -координата вертикальных границ целика с номером i .

Уравнение (9) позволяет рассчитать нагрузки на конструктивные элементы камерно-целиковой системы разработки при различных технологических параметрах и порядках ведения горных работ. Рис.4 иллюстрирует изменение нагрузок на целики при последовательном их формировании от центра к флангам залежи (ширина целиков и камер принималась равной мощности рудного тела 2.5 м). По горизонтальной оси на всех графиках показано расстояние (м) от центра залежи, на вертикальной оси – коэффициент концентрации напряжений. Крайний левый верхний график иллюстрирует концентрацию напряжений 1.6 в бортах одиночной выработки квадратного поперечного сечения (2.5x2.5м). Последовательное формирование одного - трех целиков характеризуется увеличением концентрации напряжений в них до 2.5-2.6. Формирование четырех и более целиков сопровождается незначительным снижением концентрации напряжений в центральных целиках до 2.3. Данный уровень нагрузок на центральные целики сохраняется при дальнейшем увеличении ширины отрабатываемого пространства. В крайних целиках у фронта работ (границы разрабатываемого пространства) концентрация напряжений находится в пределах значений от 1.6 до 1.9. Последняя (правая, нижняя) картинка иллюстрирует нагрузки на целики при ширине разрабатываемого пространства 42.5м, когда сформированы 9 камер и 8 целиков. Рис.5,а иллюстрирует изменение нагрузок на целики при последовательном увеличении (сверху вниз) ширины разрабатываемого пространства от 12.5м (верхняя картинка; созданы 3 камеры и 2 целика) до 102.5м (нижняя картинка; созданы 21 камеры и сформированы 20 целиков). Средняя величина коэффициента концентрации напряжений в целиках удовлетворительно согласуется с результатом, полученным по формуле Шевякова: при равенстве ширины камеры и целика $k=2$ [9]. Иллюстрации на рис.5,б,в показывают изменение нагрузок на целики при различных порядках их отработки. На рис.5,б изображены концентрации напряжений при последовательной выемке целиков от флангов залежи к ее центру, а на рис.5,в – при их выемке от центра к флангам. Начальная горнотехническая ситуация для двух вариантов разработки целиков, сложившаяся после отработки камер, иллюстрируется нижней картинкой на рис.5,а. Верхние графики на рис.5,б,в показывают увеличение концентрации напряжений в целиках до 2.5 при выемке двух целиков, расположенных в центре и у флангов, соответственно. Сравнение приведенных на рис.5,б,в графиков показывает, что выемка целиков от флангов к центру сопряжена с более высоким уровнем опасности по критерию уровня напряжений в последних вынимаемых целиках на завершающей стадии разработки*.

* Высокие значения коэффициента концентрации напряжений в целиках являются следствием использования упругой модели деформирования целиков. Для расчета величины нагрузок на целики в условиях запредельного деформирования массива горных пород необходимо применение моделей пластичности и разрушения.

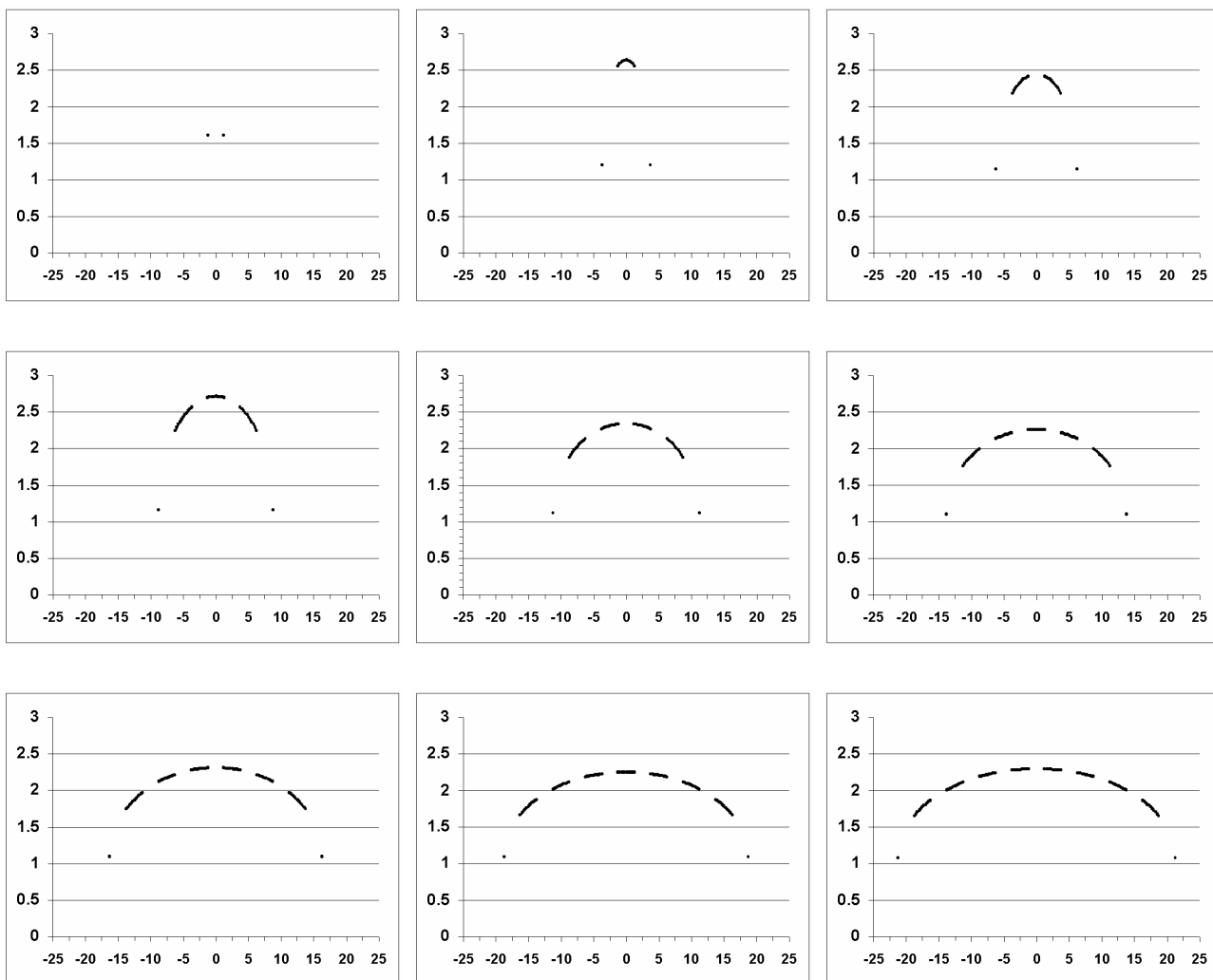


Рис.4. Концентрация напряжений в целиках при последовательной выемке запасов залежи от центра к флангам.

Геомеханические рекомендации по ведению горных работ на руднике «Бадран»

В результате отработки камер центральные целики характеризуются более высоким уровнем давления в отличие от целиков, сформированных вблизи границы разрабатываемого пространства. Выемка запасов в целиках от флангов к центру обеспечивает более равномерную пригрузку целиков (в отличие от выемки целиков от центра к флангам). Выбор того или иного варианта отработки целиков в значительной степени зависит от механических свойств руды и вмещающих пород. В случае малопрочной пластичной руды в крепких нехрупких вмещающих породах вариант отработки целиков от флангов к центру может оказаться более предпочтительным, т.к. сопровождается постепенным разрушением центральных целиков. В случае хрупкого массива горных пород более предпочтителен вариант разработки от центра к флангам. Отношение прочности на сжатие к прочности на растяжение руд и пород на руднике «Бадран» равно 22-23 [2], что свидетельствует о хрупкости пород и о возможности динамического разрушения целиков после достижения предельных значений нагрузок. В качестве иллюстрации выполним анализ геомеханической ситуации для глубины около 300м ($\gamma H=8$ МПа). При прочности рудного массива 72 МПа критическая величина коэффициента концентрации напряжений равна 9. Этот уровень нагрузок в целиках достигается в горнотехнической ситуации вторичной разработки,

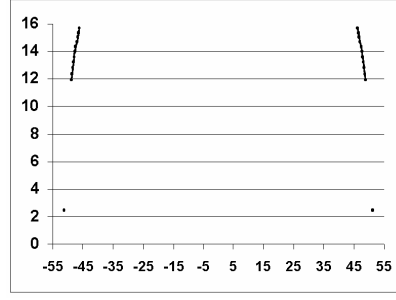
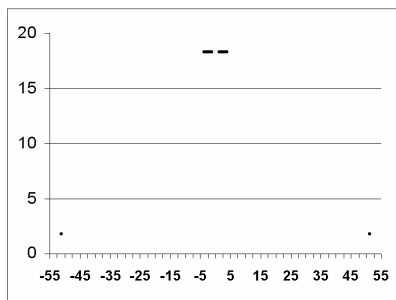
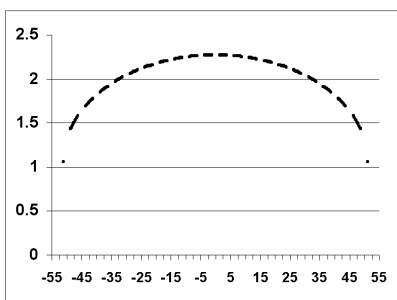
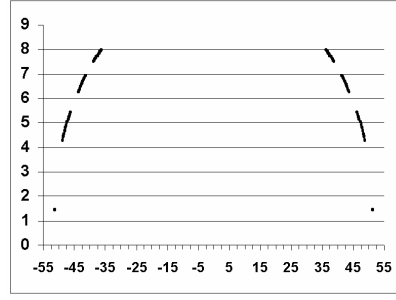
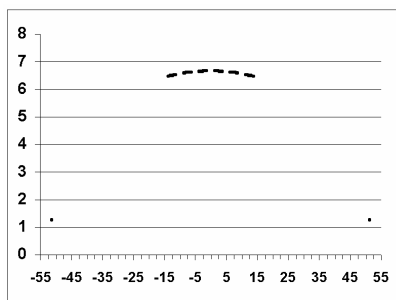
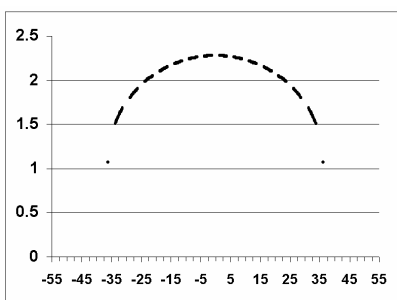
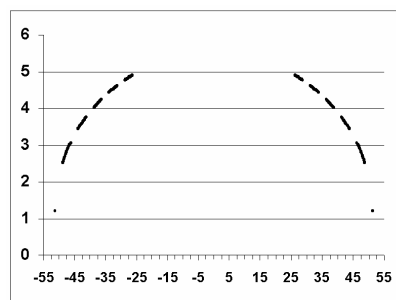
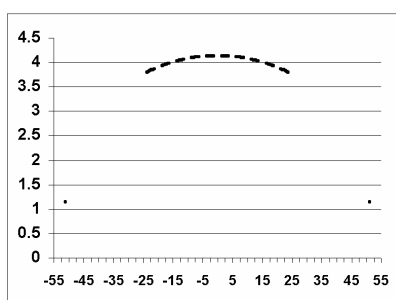
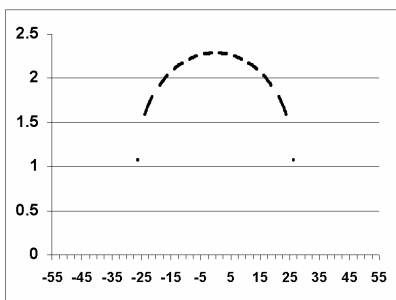
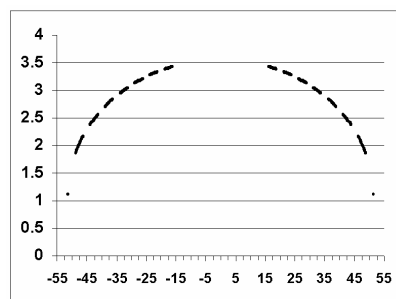
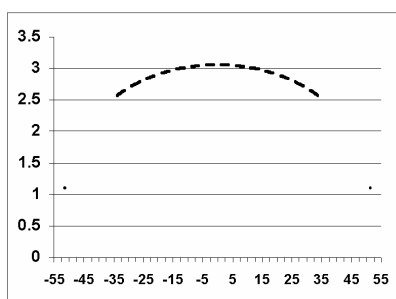
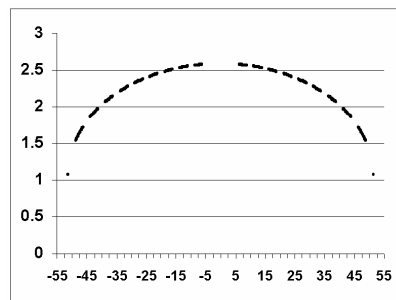
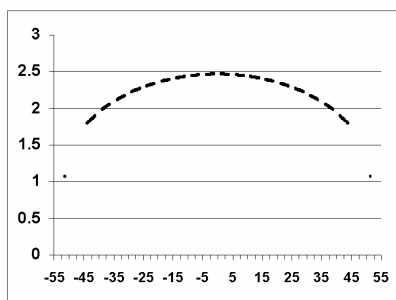
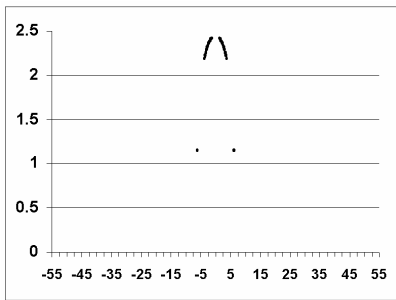


Рис.5,а. Отработка камер.

Рис.5,б. Отработка целиков от флангов к центру.

Рис.5,в. Отработка целиков от центра к флангам.

при которой остаются нетронутыми запасы руды в 4 целиках. В варианте разработки от центра к флангам концентрация напряжений во всех 4 целиках, расположенных в центре разрабатываемого пространства превышает критические значения. В варианте отработки от центра к флангам критические значения достигаются в двух из 4 оставшихся целиков; в остальных двух, примыкающих к краевым камерам, напряжения не достигают критических значений. Отметим также и меньшую концентрацию напряжений (12-16) в последних двух оставшихся целиках у краевых камер в варианте разработки от центра к флангам в сравнении с последними двумя целиками в центре, оставшимися после разработки от флангов к центру (18) (см. нижние графики на рис.5,б,в).

В условиях рудника «Бадран» на глубинах около 300м возможны динамические проявления горного давления при разрушении целиков. В этих условиях целесообразным является переход на сплошную систему разработки запасов с заполнением выработанного пространства сухой закладкой. Из формулы (9) можно получить уравнение для концентрации напряжений на очистном фронте (границе выработанного пространства) при сплошной системе разработки ($L_p=0$, $L_c=L$, $x=L/2$, $J=0$):

$$k_f = 1 + \frac{2}{1-\nu} \frac{L}{h} \cdot Q .$$

При мощности пласта 2.5м предельные величины концентрации напряжений на фронте горных работ, равные 9, достигаются при ширине выработанного пространства около 100м.

Заключение

Выполненный геомеханический анализ горнотехнических условий рудника «Бадран» позволяет сделать следующие выводы.

1. Величины возможных дополнительных вертикальных смещений земной поверхности, вызванных выемкой запасов залежи на глубине 300-340 м при пролете отработки 70 м, не превысят 3 мм. При пролете отработки 110 м ожидаемые максимальные вертикальные смещения не превысят 7 мм.

2. Вариант отработки рудных запасов в целиках от центра к флангам является более предпочтительным в сравнении с вариантом ведения горных работ от флангов к центру.

3. На глубинах более 300м целесообразен переход с камерно-целиковой схемы выемки запасов на сплошную систему разработки с закладкой выработанного пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Изаксон В.Ю., Гринев В.Г., Самохин А.В., Небутов Г.И., Шкулев С.И.** Оценка геомеханического состояния массива при отработке месторождений в криолитозоне // ФТПРПИ. - №3. -1993.
2. **Небутов Г.П., Гринев В.Г.** Разработка рудных месторождений с использованием замораживаемой закладки в условиях многолетней мерзлоты.- Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1997. С.30.
3. **Мамонов А.Ф.** Взаимодействие вмещающих пород с закладочным массивом на россыпных шахтах севера. –Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН, 1999. С.58-114.
4. **Седов Л.И.** Механика сплошной среды, т.2. –М.: Наука, 1973. С. 529-530.
5. **Бребиа К., Уокер С.** Метод граничных элементов в технике. –М.: Мир, 1982. С.126-136.
6. **Барышников В.Д., Болтенгаген И.Л., Коврижных А.М.** Определение напряжений методом целевой разгрузки // Труды международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» 6-9 октября 2003. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004. С.126-131.
7. **Болтенгаген И.Л.** Геомеханический анализ камерно- целиковой системы разработки // Доклад на международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» 2-4 ноября 2005, Новосибирск.
8. **Двайт Г.Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы. –М.: Наука, 1978. С.67-68. Интеграл 350.01.
9. **Борисенко С.Г.** Технология подземной разработки рудных месторождений. –Киев: «Вища школа», 1987.