

15. Лесенко Г. Г., Таїрова Т. М. Кількісна оцінка ризику аварії на об'єкті підвищеної небезпеки. Проблеми охорони праці в Україні : зб. наук. праць. Київ : ННДІПБОП, 2007. Вип. 13. С. 43–50.

16. Таїрова Т. М., Ткачук К.Н. Математичне моделювання системи охорони праці. Вісник Криворізького національного університету: зб.наук. праць. – Кривий Ріг: КНУ, 2018. Вип. 46. С. 25–31.

Рукопис подано до редакції 19.03.2018

УДК 622.272

С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд. техн.наук, доц.  
Криворожский национальный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ОЧИСТНОГО БЛОКА В НЕУСТОЙЧИВЫХ РУДАХ КРИВОРОЖСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО БАССЕЙНА

**Цель.** Целью данной работы является повышение железа в добытой рудной массе за счет изменения формы очистной камеры и ее объема путем исследования устойчивых ее параметров при отработке железных руд Криворожского железорудного бассейна в неустойчивых рудах. Это связано с тем, что железные руды Криворожского железорудного бассейна на глубинах более 1350 м. традиционными системами разработки в сложных горно-геологических условиях приводит к повышенным потерям и засорению добытой рудной массы из-за неустойчивого массива железных руд.

**Методы исследования.** С целью повышения показателей извлечения, предложена идея, основанная на формировании очистной камеры квазипараболической формы, которая позволяет сохранить устойчивость очистной камеры на весь период отработки. Устойчивость очистной камеры обеспечивается оптимальным соотношением ее высоты к ширине и радиусов вертикального и горизонтального обнажений согласно гипотезе Слесарева В.Д. Для определения достоверности результатов исследований использовался метод конечных элементов и утвержденной методики для определения конструктивных элементов системы разработки.

**Научная новизна.** Установлено, что максимальное давление зависит от угла приложенной нагрузки к контуру очистной камеры и физико-механических свойств горных пород окружающих ее, который влияет на радиусы вертикального и горизонтального обнажений. Впервые установлены, зависимости ширины очистной камеры и ее высоты от радиуса вертикального обнажения, при которых очистная камера является устойчивой на весь период отработки блока.

**Практическая значимость.** Разработана методика по определению параметров очистной камеры квазипараболической формы, которая позволяет определить устойчивые параметры очистной камеры. Также определена величина максимального разрушающего давления на контуре очистной камеры квазипараболической формы.

**Результаты.** Установлено, что увеличить объем добытой чистой руды из блока на 20% возможно за счет применения очистной камеры квазипараболической формы при отработке неустойчивых железных руд.

**Ключевые слова:** руда, очистная камера, обнажение, устойчивость, радиус, нагрузка, рудная масса, свод.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-160-165

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В Криворожском железорудном бассейне сосредоточено значительное количество запасов природно-богатых и природно-бедных руд, которые в настоящее время разрабатываются открытым и подземным способами. Подземные горные работы в условиях отработки железных руд Криворожского бассейна приближаются к уровню предельной глубины подъема 1500-1700 м (первая ступень вскрытия), а открытые – к проектному контуру карьера. Для дальнейшего успешного функционирования горных предприятий с подземным способом разработки необходимо выполнить модернизацию и техническое переоснащение подъема, вентиляции, систем разработки и способов вскрытия.

С целью остаться на мировом рынке перед горнорудными предприятиями стоит вопрос о повышении содержания полезного компонента в добытой горной массе. В связи с этим, горнорудные предприятия увеличивают минимальное бортовое содержание железа в массиве с 46 до 52% при добыче подземным способом. Повышение минимального бортового содержания железа в массиве на 2-6% приведет к снижению балансовых запасов железных руд до 30-40% [1-3].

**Анализ исследований и публикаций.** За последние 20 лет почти в два раза снизились объемы добычи железной руды в Криворожском бассейне, на 10-15 млн т в год. Это связано с консервацией шахт в промышленном регионе, а также из-за ухудшения горно-геологических и горнотехнических условий. Все эти факторы способствуют к оставлению значительных запасов

железных руд в недрах Земли перспективных к отработке открыто-подземным и подземным способами.

Ведущие научно-исследовательские и проектные институты активно ведут работы по технологическому прогнозированию особенностей добычи полезного ископаемого в горнорудных регионах, а также совершенствование технологии подземной разработки. Ими были разработаны высоко-производительные и эффективные системы разработки при отработке месторождений как природно-бедных так и природно-богатых руд в устойчивых и неустойчивых породах. Однако, показатели извлечения добытой чистой руды из блока не превышают 30-60%. Успехи, достигнутые в вопросах повышения качества железорудного сырья, позволили значительно улучшить эффективность обогащения железных руд в высоко градиентных магнитных полях, при этом увеличивается себестоимость добычи, а также отчуждение земельных угодий под хвосты.

При отработке запасов железных руд в устойчивых породах всякого бока и средней устойчивости руд, широкое применение нашла этажно-камерная система разработки с обрушением целиков. Данная система разработки позволяет извлекать камерный запас без дополнительного засорения руды. Для предотвращения засорения камерных запасов оставляют рудный "треугольник" (потолочину), поддерживающий породы всякого бока.

Достоинствами этажно-камерной системы являются: получение большого количества чистого полезного ископаемого (до 60%), и четкое разделение потока чистой руды из камеры и разубоженной руды из целиков, малый удельный объем нарезных работ. К недостаткам можно отнести следующее: двухстадийность выемки запасов, наличие большого объема незаполненных пустот, значительные потери и засорение руды при обрушении целиков, большие затраты на поддержание выработок в породах лежащего бока из-за длительного срока их службы, ограниченные условия применения [4-6]. С целью уменьшения засорения руды при отработке междуканнерных целиков и потолочин применяют поэтажно-камерную систему разработки которая позволяет снизить потери руды на 0,5-1,2% и засорение на 1,5-2,5%. При этом, увеличивается удельный объем подготовительно-нарезных работ с 1,9-3,0 до 2,5-4,5, а количество чистой неразубоженной руды не превышает 60%.

**Постановка задачи.** С целью увеличения количества чистой руды при обработке очистных блоков в неустойчивых породах необходимо увеличить объем очистной камеры за счет изменения ее формы и обоснования устойчивых ее конструктивных элементов.

**Изложение материала и результаты.** В условиях Криворожского железорудного бассейна повысить содержание полезного компонента в добытой рудной массе возможно, за счет, применения процессов обогащения на подземных горных работах, селективной выемки или увеличить объем очистной камеры.

Обогащение добытой рудной массы на обогатительных фабриках приводит к значительному повышению содержания железа в добытой рудной массе с 58 до 65%, при этом, увеличивается себестоимость добычи, а как следствие нарушение экологической ситуации в регионе. Селективная разработка при использовании существующих технологий снизит годовую производительность подземного рудника, из-за сортировки добытой рудной массы по качеству, а также выдачи ее по одному главному стволу. Для эффективной реализации селективной выемки необходимо строительство дополнительных главных стволов, что также приведет к увеличению себестоимости добычи в первые 5 лет и как следствие потеря мирового рынка сбыта. Увеличение объема очистной камеры на 20% согласно расчетов по методике НИГРИ вызовет необходимость увеличивать ширину междуканнерных целиков в 1,5-2,5 раза, что приведет к увеличению потерь руды.

Таким образом, увеличить объем очистной возможно за счет изменения ее формы с прямоугольной (традиционной) на квазипараболическую форму, рис. 1 [7-9].

Как видно с рис.1 кривая KLM представляет собой параболу и описывается следующим интегральным выражением

$$y = -c \int (x^{2k-1} dx) / \sqrt{(b^2 - x^2)^r}, \quad (1)$$

Координаты плавно огибающей кривой *MBL*, рис. 1, имеющей форму эллипса соответствующего параболическому своду определяют по формуле (1). При изменении значений  $x$  от 0 до  $b$  кривая функции убывает, а первая производная имеет вид [7]

$$y' = c \cdot x^{2k-1} / \sqrt{(b^2 - x^2)^r}, \quad k > 0,5; 0 < r < 2, \quad (2)$$

где  $c, k$  – действительные числа;  $r$  – наименьшее нечетное действительное число.

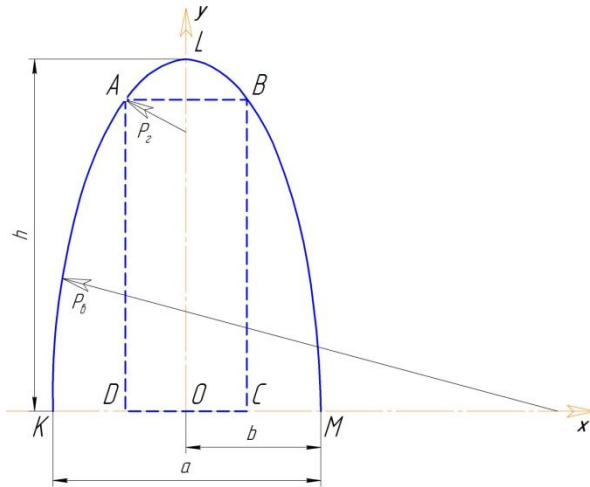


Рис. 1. Расчетная схема к определению очистной камеры параболической формы

Параметры очистной камеры параболической формы, исходя из параболического закона сводообразования, максимально приближены к предельно-допустимому контуру устойчивого равновесия и определяются [9]

$$\begin{cases} \epsilon^2 = 2 \cdot P_z \cdot h, \\ h^2 = 2 \cdot P_g \cdot \epsilon, \end{cases} \quad (3)$$

где  $h$  и  $b$  – вертикальная и горизонтальная полуоси кривой, м;  $P_z, P_g$  – радиусы максимально-допустимого устойчивого соответственно горизонтального и вертикального обнажений

очистной камеры параболической формы, м (согласно опытно-промышленным испытаниям для условий Криворожского железорудного бассейна составляют  $P_z = 1-6$  м,  $P_g = 30-90$  м).

После соответствующих преобразований формулы (4), задавая соотношением высоты к ширине очистной камеры радиус вертикального устойчивого обнажения определяется

$$\frac{h}{2b} = \frac{2 \cdot \sqrt[3]{P_z \cdot P_g^2}}{2 \cdot \sqrt[3]{P_z^2 \cdot P_g}} \Rightarrow \left(\frac{h}{a}\right)^3 = \frac{8 \cdot P_z \cdot P_g^2}{P_z^2 \cdot P_g}, \quad (4)$$

а выполнив соответствующие преобразования и выразив выражение (4) через радиус вертикального обнажения, получим окончательное выражение

$$h/a = \sqrt[3]{8 \cdot P_g / P_z}. \quad (5)$$

Выполнив расчеты по формуле (3), построены зависимости ширины и высоты очистной камеры квазипараболической формы от радиусов горизонтального и вертикального обнажений приближенных к максимально-допустимому устойчивому равновесию, рис.2, 3.

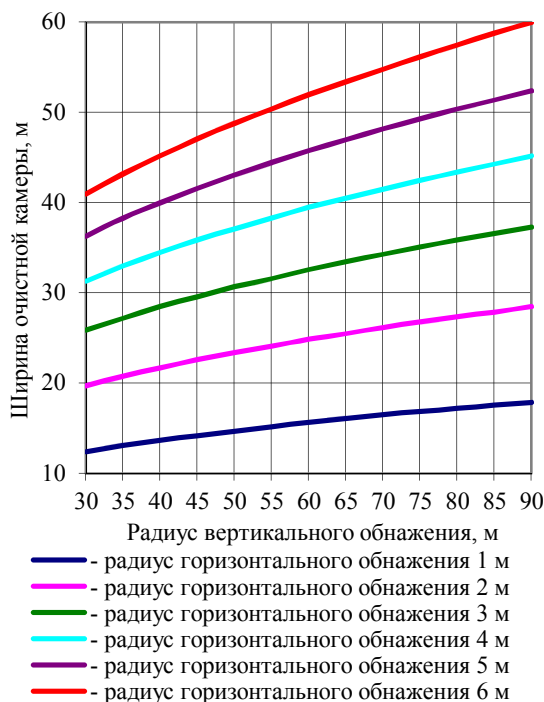


Рис. 2. Зависимости изменения ширины очистной камеры от радиуса вертикального обнажений

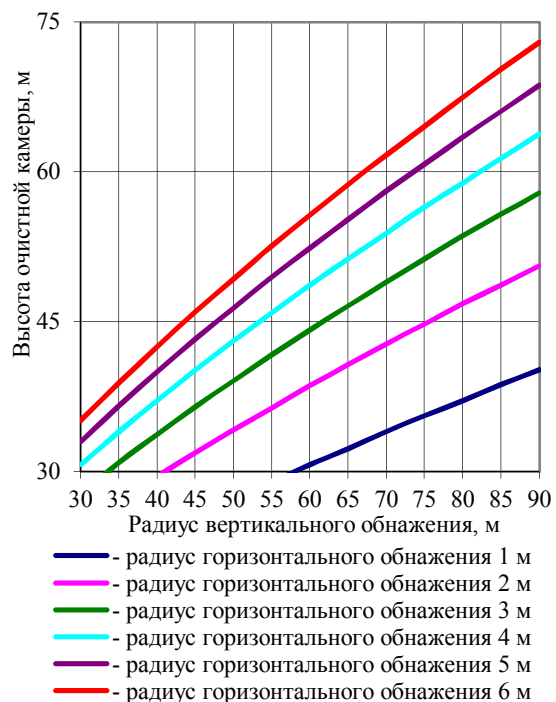


Рис. 3. Зависимости изменения высоты очистной камеры от радиуса вертикального и горизонтального обнажений

Из приведенных графиков видно, что ширина очистной камеры изменяется от 12,5 до 60 м, а высота камеры от 38 до 145 м с изменением горизонтального радиуса обнажения от 1 до 6 м и вертикального от 30 до 90 м. Объем очистной камеры квазипараболической формы зависит от кривой образующей ее. Подставляя входящие величины в выражение (4), текущие координаты кривой образующей очистную камеру определяются выражениями

Объем очистной камеры параболической формы  $KLM$  (см. рис. 1), в диапазоне  $-b < x < b$  из условия устойчивости определяется интегральным выражением [7-9]

$$V_{к.к} = \pm L_{к.к} \cdot \int_0^b \int_{-b}^b \left( 2 \cdot \sqrt[3]{P_z \cdot P_e^2} \right) \cdot \sqrt[4]{\left( 1 - x^2 dx / 4 \cdot \left( \sqrt[3]{P_z \cdot P_e^2} \right)^2 \right)^3} dy, \quad (6)$$

где  $V$  – объем компенсационной камеры параболической формы,  $m^3$ ;  $L$  – длина компенсационной камеры, м.

Однако, горный массив не является однородным, поэтому необходимо определить насколько будет подвержена очистная камера разрушению от места заложения ее в горной массиве.

Согласно выполненным исследованиям [10-13] было установлено, что разрушающее давление создаваемое на контуре очистной камеры зависит от угла приложенной нагрузки, физико-механических свойств горных пород окружающих ее и определяется по формуле

$$P_{к.в} = \pm \frac{r \cdot \tau_0 \cdot \sin \delta}{\sin 2\delta - r^2 \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \rho}, \quad (7)$$

где  $r$  – расстояние от центра выработки к элементарному объему, м;  $\tau_0$  – начальное сопротивление сдвигу,  $t/m^2$ ;  $\delta$  – угол, под которым действует нагрузка на контур выработки, град.;  $\beta$  – угол сдвига горных пород, град.;  $\rho$  – угол внутреннего трения пород, град.

Если разрушающее давление, определенное по формуле (7), больше нормальных напряжений создаваемых горными породами в массиве, то выработка будет устойчивой. Когда значения нормальных напряжений в массиве горных пород будет больше разрушающего давления, то выработка будет подвержена деформациям.

После преобразований формулы (7) радиусы вертикального и горизонтального криволинейных обнажений, которые обеспечивают камере квазипараболической форме устойчивость от действия главных вертикальных и горизонтальных напряжений на контуре выработки определяются по формуле

$$P_e = \sqrt{\frac{\sigma_3}{\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \rho}}, P_z = \frac{\sigma_3 \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \rho}{[\sigma_{сж}]}, \quad (4)$$

где  $[\sigma_{сж}]$  – предел прочности пород на сжатие,  $t/m^2$ .

С помощью программного комплекса ANSYS были выполнены исследования распределения эквивалентных напряжений вокруг выработок прямоугольной и параболической форм с целью определения их устойчивости, рис. 4.

Исходными данными для расчетов были следующие: удельный вес пород  $2800 \text{ кг} / m^3$ ; предел прочности на сжатие  $60 \text{ МПа}$ ; предел прочности на растяжение  $9 \text{ МПа}$ ; модуль Юнга  $50000 \text{ МПа}$ ; коэффициент Пуассона  $0,23$ ; площадь поперечного пересечения камеры  $1970 \text{ м}^2$ ; глубина разработки  $1200 \text{ м}$ . Параметры для очистной камеры прямоугольной формы принимались следующие: ширина  $33 \text{ м}$ , высота  $60 \text{ м}$ ; для камеры параболической формы: радиус вертикального обнажения  $77,5 \text{ м}$ , а горизонтального  $3 \text{ м}$ .

Устойчивые параметры очистной камеры определялись по методике [14] согласно заданных горно-геологических условий месторождения из выражения

Фактические значения между эквивалентными пролетами обнажений в камере и их размерами для горизонтального обнажения рудного массива в камере определялись по формуле

$$m_z = \frac{a \times M_z}{\sqrt{a^2 + M_z^2}}. \quad (5)$$

Анализируя расчетные данные (рис. 4) установлено, что на контуре очистной камеры в средней части действуют сжимающие напряжения, которые отличаются не более чем на  $3,45\%$ . Следует заметить, что в верхней части очистной камеры прямоугольной формы действуют растягивающие напряжения, а при формировании выработки квазипараболической формы сжимающие.

Таким образом, на основании выполненных исследований установлено, что увеличить объем чистой руды с блока на  $20\%$  при отработке неустойчивых рудных залежей системами с массовым обрушением руды и налегающих пород без увеличения потерь руды в целиках, возмож-

но за счет применения очистной камеры квазипараболической формы.

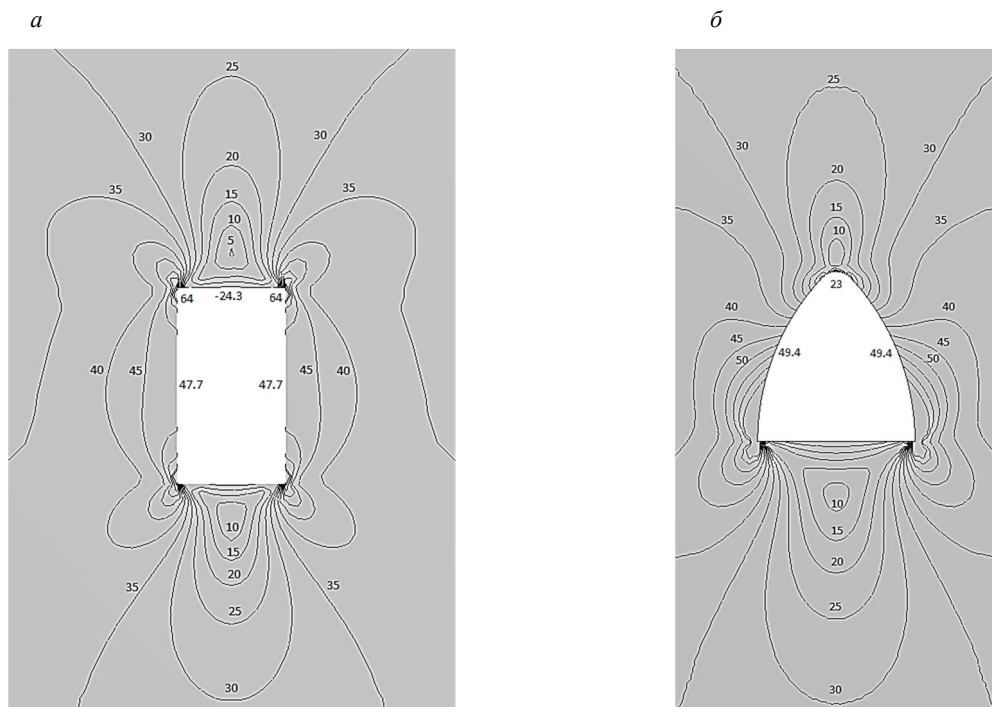


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений вокруг очистной камеры:  
а – прямоугольной формы; б – квазипараболической формы

#### Список литературы

1. Пути совершенствования качества металлургического сырья на шахтах Кривбасса / **В.С.Грин, Н.К.Кравцов, В.А.Витряк** // Разраб. рудн. месторожд. – Кривой Рог: КТУ. – 2000. – Вып. 70. – С. 10-13.
2. SWOT-анализ ОАО "КЖРК" – залог успешной работы железорудных шахт Кривбасса в условиях глобального рынка / **Письменный С.В., Б.Н.Андреев, Бровко Д.В., Кривошеин С.В., Петрик Н.Н.** // Форум гірників 2010: Матеріали між. конф. (21-23 жовтня 2010 р.). – Дніпропетровськ: НГУ, 2010. – С.189-193.
3. Перспективы поддержания производственных мощностей шахт и карьеров Кривбасса/ **Б.Н.Андреев, С.В.Письменный, Д.В.Бровко**// Минск. – 2013. – С.115-120.
4. **Сторчак С.А., Письменный С.В., Сбитнев В.А.** Повышение качества рудной массы при подэтажном обрушении, за счет технологических факторов // Качество минерального сырья. Сборник научных трудов. – Кривой Рог, 2002. – С. 70-74.
5. **Золотарев И.И., Стариков Н.И., Фаустов Г.Т.** Отработка параллельных залежей в условиях Криворожского бассейна // Горный журнал. – 1962. - №6. – С. 19-23.
6. **Абашин П. А., Пикалов А. И., Фаустов Г. Т., Шкробко Г. С, Говоров А.В.** Исследование устойчивости целиков при отработке параллельных залежей // Горный журнал. – 1974. - №5. – С. 57-59.
7. Пат. 48832А, UA, E21C41/16. Спосіб розробки кругоспадних рудних родовищ, що містять включення пустих порід / **Сторчак С.О., Щелканов В.О., Хівренко О.Я., Чердніченко О.Є., Караманіч Ф.І., Саснко В.К., Хівренко В.О., Сбітнев В.О., Письменний С.В.** № 2001128777; Заявлено 18.12.2001; Опубл. 15.08.2002 р., Бюл. № 8.
8. **Письменный С.В., Хивренко В.О., Сбитнев В.А., Полухина Н.В.** Определение параметров компенсационной камеры сводчатой формы // Разраб. рудн. месторождений. – Кривой Рог: КТУ. – 2002. – Вып. 79. – С. 48-52.
9. **Ступник Н.И., Письменный С.В.** Физическое моделирование формы компенсационных камер при отработке блоков на больших глубинах // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг. – 2012. – Вип. 31. – С. 3-7.
10. Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды / **Н.И.Ступник, С.В.Письменный** // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 30. – С. 3-7.
11. **Ступник Н.И., Андреев Б.Н., Письменный С.В.** Исследование формы поперечного сечения подземных выработок при комбинированной отработке месторождений // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг. – 2012. – Вип. 32. – С. 3-6.
12. **Письменный С.В.** Исследования устойчивости целиков от формы очистной камеры при отработке магнетитовых кварцитов в полях действующих шахт подземным способом// Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг. – 2014 – Вип. 36. – С. 9-13.
13. **Ступник Н.И., Письменный С.В.** Повышение качества горной массы при отработке сложноструктурных залежей Криворожского бассейна подземным способом // Качество минерального сырья. Сборник научных трудов. – Кривой Рог, 2014. – С. 19-26.
14. **Цариковский В.В., Сакович В.В., Недзвецкий А.В.** Определение и контроль допустимых размеров конструктивных элементов систем разработки на рудниках Кривбасса // Кривой Рог: НИГРИ. 1987. 35 с.

Рукопись поступила в редакцию 19.04.2018