

## ПОВЫШЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Хоменко О.Е.<sup>1</sup>, Ляшенко В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», г. Днепр, Украина

<sup>2</sup> Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии», г. Желтые Воды, Украина

### Аннотация

**Постановка задачи (актуальность работы):** описаны основные научные и практические результаты исследований повышения геодинамической безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений на основе данных оперативного контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов. На примере сложноструктурных месторождений Украины проанализированы физические свойства горных пород и новые гипотезы о горном давлении с учетом увязки выемки руды и пород во времени и пространстве, определения параметров конструктивных элементов систем разработки. **Цель работы:** повышение геодинамической безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений на основе данных оперативного контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов. **Используемые методы:** применялся усовершенствованный метод шахтных, лабораторных и экспериментальных исследований, математического и физического моделирования, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам. **Новизна:** установлена параболическая зависимость коэффициента напряжений в стенках камер на флангах выработанного пространства ( $y$ ) от соотношения его длины к ширине ( $x$ ) вида  $y = ax^2 + bx$  ( $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от геомеханических свойств горного массива). **Результат:** приведена классификация напряженного состояния горного массива по степени удароопасности. Так, при  $\eta \leq 0,2$  участок месторождения относится к неудароопасным. При  $0,2 < \eta \leq 0,3$  устанавливается третья, при  $0,3 < \eta \leq 0,5$  – вторая, а при  $\eta > 0,5$  – первая категория удароопасности. **Практическая значимость:** получены исходные данные для проектирования подземной разработки сложноструктурных месторождений в зависимости от ориентации максимальных напряжений относительно выработки.

**Ключевые слова:** сложноструктурные месторождения, подземная разработка, геомеханическая безопасность, горное давление, категории удароопасности.

### Введение

Сложноструктурные месторождения обладают рядом общих особенностей генезиса, приуроченного к разломам, сложной морфологией рудных залежей, что позволяет сформулировать рекомендации по прогнозу и предотвращению проявления горного давления различных форм при их разработке. Увеличение глубины отработки, объемов пустот на вышележащих горизонтах существенно изменяют геодинамический режим геологической среды. Поэтому повышение геодинамической безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений на основе данных оперативного контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления, профилактики и предотвращения горных ударов на стадиях проектирования и разработки – вот те важные, имеющие

научное и практическое значение задачи, требующие неотлагательного решения [1-4].

### Теория и методы исследования

Авторами выполнены исследования в области повышения безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений на основе данных оперативного контроля и прогноза напряженного состояния горного массива с различными формами динамического проявления горного давления. Проанализированы физические свойства горных пород и новые гипотезы о горном давлении с учетом оценки степени устойчивости обнажений, выявления закономерностей их деформирования и разрушения, увязки выемки руды и пород во времени и пространстве, определения параметров конструктивных элементов систем разработки, способов крепления и соответствующих типов крепи, шахтные, лабораторные и экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирова-

© Хоменко О.Е., Ляшенко В.И., 2018

ние, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам [5].

### Обсуждение и оценка полученных результатов

Степень удароопасности участков месторождения определяется интенсивностью динамического проявления горного давления и подразделяется на три категории удароопасности.

**Первая.** Участок массива представляет опасность по проявлению собственно горных ударов и микроударов.

**Вторая.** Участок массива представляет опасность по проявлению микроударов, динамического заколообразования и стреляния пород.

**Третья.** Участок массива не представляет непосредственной опасности по проявлению горных ударов.

**К неопасным**, кроме естественно неопасных, относятся участки подверженных горным ударам пород (массивов), в которых в результате производства горных работ или специальных профилактических мероприятий возможность проявления горных ударов исключена.

Рассматриваемые сложноструктурные месторождения ГП «ВостГОК» (Украина) отнесены к подверженным горным ударам. На этапе предварительного районирования площадь Ватутинского месторождений разделена на три структурно-обособленные зоны, отличающиеся удароопасным состоянием. **Первая** – участок повышенной удароопасности. **Вторая** – участок возможных проявлений горных ударов. **Третья** – неудароопасный участок. Вскрытием, подготовкой и очистной выемкой подтверждено предположение о локальности проявления динамических форм горного давления, включая первую зону. За период эксплуатации месторождения не произошло ни одного собственно горного удара. Учитывая, что инструментальные методы оценки категории удароопасности требуют много времени и, главное, измерения могут осуществляться только на вскрытых участках массива и поэтому недостаточно оперативны, а внешние отличительные признаки удароопасности определяются нечетко, представляется надежная возможность использования визуальных методов. Динамические формы проявления горного давления от шелушения и интенсивного заколообразования до горно-тектонических ударов по мере нарастания интенсивности и местоположению очага разрушения подразделяются на: шелушение; интенсивное (динамическое) заколообразование; стреляние; микроудар; собственно горный удар; толчок; горно-тектонический удар [6-11].

Районирование шахтных полей по степени удароопасности авторы осуществляли согласно формуле [12]

$$\eta = \frac{K\gamma H + \sigma_T}{R_{сж}}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – интенсивность проявления горного давления в зависимости от уровня напряжённого состояния массива;  $K$  – коэффициент концентрации напряжений (наведенный очистными работами, вне зоны их влияния равен 1,0, в зонах влияния в зависимости от положения относительно выработанного пространства изменяется от 0,3 в защищенных зонах и до 1,6 в зонах стационарного опорного давления);  $\gamma$  – плотность налегающих пород, т/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина контролируемого обнажения, м;  $R_{сж}$  – прочность пород на одноосное сжатие, т/м<sup>2</sup>;  $\sigma_T$  – интенсивность тектонических напряжений, определяемая непосредственно по местам локальных проявлений горных ударов. При отсутствии этих признаков  $\sigma_T = 0$ .

### Исследование максимальной компоненты поля напряжений

Выполняется двумя методами: по уровню напряжённого состояния массива; по данным строгих теоретических решений методом суперпозиций. Ориентация максимальной компоненты по обоим методам принимается по месту проявления горного давления. Согласно данным обследования можно констатировать, что максимальная компонента напряжений ориентирована горизонтально в направлении простирания залежи с отклонениями до 20°. В ортах области проявлений интенсивность от шелушения до отслоений по «живому» приурочены к кровле и симметричны относительно вертикальной оси. В выработках по простиранию нарушений кроме оконтуривания по трещинам естественной отдельности и отслоений в стенках (штрек расположен в зоне опорного давления вокруг камеры 464-2с Смолинской шахты ГП «ВостГОК», Украина) обследованием не выявлено. Исследование максимальной компоненты выполнено по выработкам, в которых проявления горного давления обусловлены наибольшим уровнем напряжённого состояния массива  $0,12 \leq \eta < 0,2$  и  $0,2 \leq \eta < 0,3$  для каждого конкретного случая  $\sigma_{max} = \eta R$  (здесь  $\eta$  – интенсивность проявления горного давления в зависимости от уровня напряжённого состояния массива, доли ед.;  $R$  – временное сопротивление сжатию, МПа, изменяется от 23 до 250 МПа). Принимая во внимание, что в первую очередь разрушаются более

слабые разности пород, к расчёту приняты меньшие значения их коэффициентов крепости. Связь прочности с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова  $f$  выражается зависимостью

$$f = \frac{R_o}{10^5 \cdot 300} + \sqrt{\frac{R_o}{10^5 \cdot 300}}, \quad (2)$$

$$\text{откуда } R = 3000(f + 5 - \sqrt{10f + 25}). \quad (3)$$

**Пример 1. Исходные данные.** Коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова  $f = 14$ .

**Решение.** Согласно формуле (3)  $R = 18464 \text{ т/м}^2$  – орт 34 оси гор. 460 м; при  $f = 10$ ;  $R = 11458 \text{ т/м}^2$  – орты-заезды 48 – 7,5 м и 48 + 10 м, гор.550 м. Горное давление обусловлено наибольшим уровнем напряжённого состояния массива согласно формуле  $\sigma_{\max} = \eta R$  по – орту 34 оси гор. 460 м составляет  $\sigma_{\max} = 0,2 \times 18464 = 3692 \text{ т/м}^2$ , а по ортам – заездам 48 – 7,5 м и 48 + 10 м, гор.550 м –  $3438 \text{ т/м}^2$ .

Таким образом, изменения интенсивности горизонтальной компоненты с увеличением глубины не установлены. Постоянство её подтверждается и тем, что изменения интенсивности проявлений горного давления по глубине в исследуемом интервале также не наблюдается.

### Исследование горизонтальной компоненты на устойчивость

В формировании полей напряжений вокруг очистного пространства принимают участие три компоненты: вертикальная  $\sigma_{ov} = \gamma H$ , продольная  $\sigma_{пр}$  и поперечная  $\sigma_{п}$ . Максимальная из них согласно закону Гука [9] обуславливает величину бокового распора в перпендикулярном ей направлении и определяемого по формуле

$$\sigma_{пп} = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_{\max} \approx \frac{0,25}{1-0,25} \sigma_{\max} \approx 0,333 \sigma_{\max}. \quad (4)$$

На проектируемых глубинах работ  $\sigma_{пр} \approx 3\gamma H$ , следовательно,  $\sigma_{пп} \approx \gamma H$  коэффициенты концентрации напряжений вокруг выработанных пространств от действия одной компоненты [10]. Поскольку  $\sigma_{п}$  в три раза превосходит  $\gamma H$ , их значения утраиваются (**рис.1**).

Суммарные коэффициенты концентрации, изолинии концентраций  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ , касательных напряжений  $\tau_{\max}$ , траекторий  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  при соотношении сторон выемки 1:1, на контуре камер интенсивность напряжений, перпендикулярных обнажению, равна нулю по всему периметру. Относительно  $\sigma_{\max}$  горизонтальным участкам

соответствуют висячий и лежащий бока. Слева приведены изолинии  $\sigma_{\max}$ , справа –  $\sigma_{\min}$ . Вертикальные линии представляют стенки камеры. Концентрации нормальных напряжений в лежащем и висячем боках камеры, равные 4,5 МПа по середине обнажения, возрастают в углах до 11,4 МПа, где они работают в условиях объемного сжатия, препятствующего разрушению [11].

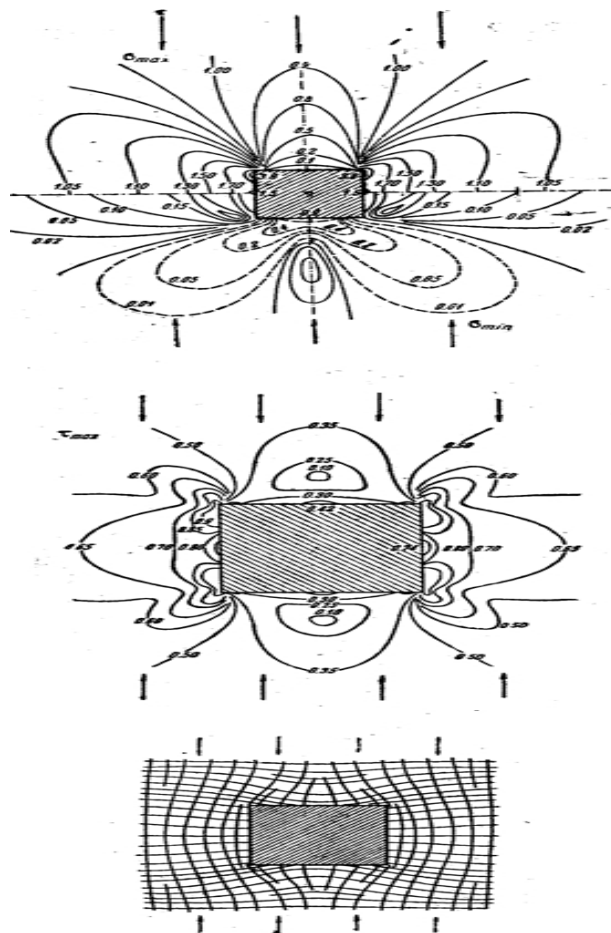


Рис. 1. Распределение главных нормальных, касательных напряжений и траектории нормальных напряжений вокруг очистного пространства от действия продольной компоненты

В стенках камер от действия  $\sigma_{п}$  концентрация напряжений равна –2,7 МПа растяжения. Суммарные концентрации от взаимодействия  $\sigma_{п}$  и  $\sigma_{пп}$ , имеющих противоположные знаки, меньше, чем при одноосном нагружении, и составляют в стенках –1,2 МПа растяжения, т.е. в 2,25 раза ниже, глубина области растяжений не превышает 0,12 длины стенки в плане. В лежащем и висячем боках концентрации 3,6 МПа. С увеличением длины выработанного пространства до соотношения 3:1. концентрации напряжений в висячем и лежащем боках снижаются до 3,07 МПа

сжатия. По середине стенок суммарные концентрации равны  $-0,25$  МПа – растяжение, переходящее в сжатие к углам. Глубина зоны растягивающих напряжений, способствующих вывалам, сокращается до  $0,8-0,9$  м и не охватывает более  $0,5$  её длины. При соотношении длины к ширине выработанного пространства  $5:1$  концентрации напряжений в лежачем и висячем боках составляют  $+2,3$  МПа сжатия. В стенках  $+0,1$  МПа область растягивающих напряжений отсутствует. Дальнейшее увеличение длины выработанного пространства до соотношения длины к ширине, равном  $18:1$  и более, не меняет тенденции формирования поля напряжений (рис. 2).

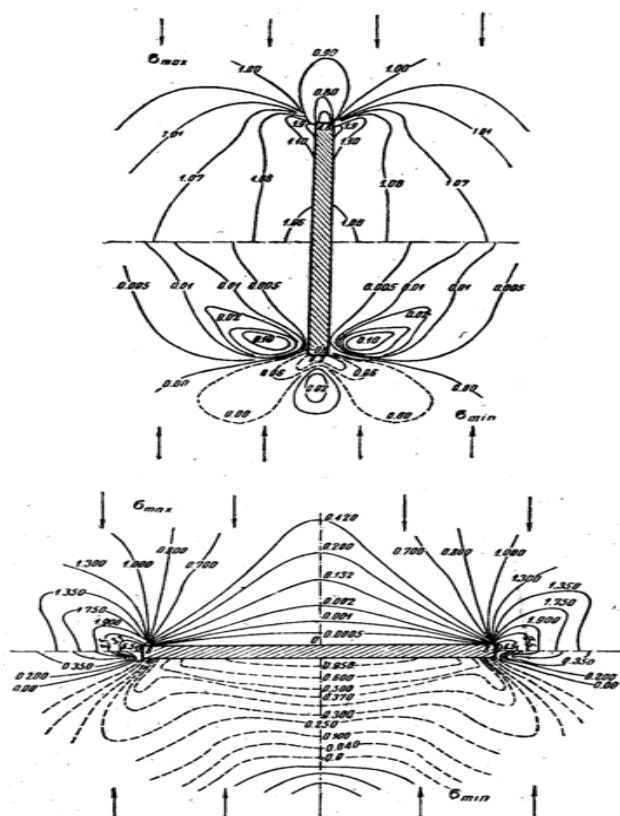


Рис. 2. Распределение нормальных горизонтальных напряжений вокруг очистного пространства от действия продольной и поперечной компонент (соотношение сторон  $18:1$ )

Распределение напряжений в висячем и лежачем боках при соотношениях длины к ширине  $18:1$  (см. рис. 2) составляют  $2,18$  МПа. В стенках  $5,6$  МПа. Данные расчеты не учитывают восприятия нормальной компоненты твердеющей закладкой, которая начинает воспринимать нагрузки от поперечной составляющей после развития горных работ по простиранию при соотношении от  $5:1$  и более [12].

### Результаты исследований

Исходя из выполненного опасность может представлять устойчивость стенок камер на флангах горных работ. До соотношения длины к ширине равном  $5:1$  угрозу могут представлять вывалы в стенках камер в области растягивающих напряжений [13]. С увеличением протяженности выработанного пространства сжимающие напряжения в стенках возрастают по параболической зависимости вида  $y=ax^2 + bx$  (здесь  $y$  – коэффициент напряжений в стенках камер на флангах выработанного пространства;  $x$  – величина соотношения длины выработанного пространства к его ширине;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от геомеханических свойств горного массива) при степени корреляции равной  $0,99$  (рис. 3). Приведенная крепость руд по Смолинской шахте по 22 блокам (коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протоdjяконова составляет  $f=16,55$ ), что соответствует кубиковой прочности, и согласно формуле (3)

$$R = 3000 x (f + 5 - \sqrt{10f + 25}) = 23243 \text{ т/м}^2.$$

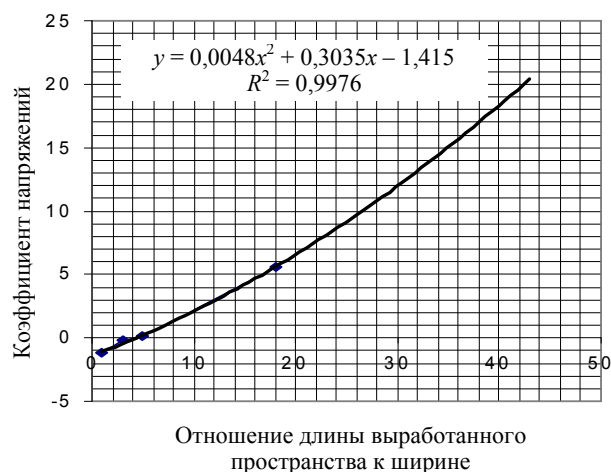


Рис. 3. Зависимость напряжений в стенках камер на флангах выработанного пространства от соотношения его длины к ширине

**Пример 2.** Исходные данные. Коэффициент структурного ослабления принимаем равным  $0,35$ , преобладающая прочность руд в массиве  $R_m = 8135 \text{ т/м}^2$ .

**Решение.** Согласно формуле  $R_m/\gamma H$ , допустимый коэффициент концентрации сжимающих напряжений не должен превышать  $R_m/\gamma H = 8135:(2,6 \times 550) = 5,67$ . Этому значению согласно зависимости соответствует соотношение длины выработанного пространства к ширине, равное  $18:1$ . Это заведомо выше соотношения, при котором закладка начинает воспринимать нагрузки

от бокового давления. По результатам оценки уровня напряжённого состояния массива и механизма проявления горного давления по визуальным признакам авторами разработана классификация напряженного состояния горного массива

и в зависимости от ориентации максимальных напряжений относительно выработки, что соответствует требованиям Правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых [14] (см. таблицу).

Классификация напряженного состояния горного массива

Место проявления нарушения	Форма и интенсивность нарушения	Ориентация $\sigma_{\max}$	Уровень напряженного состояния массива $\eta$	Категория удароопасности	
Нарушений нет по всему периметру	Оконтуривание выработки по естественным поверхностям ослабления	Вертикально	$\eta \leq 0,12$	Неудароопасная	
	Шелушение в углублениях в вершинах сочленений трещин естественной отдельности		$0,12 < \eta \leq 0,2$		
	Локальные расслоения структурных блоков по «живому»		$0,2 < \eta \leq 0,3$		III
	Отслоения по «живому», «бочкование» выработок. Динамическое заколообразование, выпучивание неудароопасных пород		$0,3 < \eta \leq 0,5$		II
В пятах свода и стенках с обеих сторон	Горные удары	Вертикально	$\eta > 0,5$	I	
	Шелушение в углублениях в вершинах сочленений трещин естественной отдельности		$0,12 < \eta \leq 0,2$	Неудароопасная	
	Локальные расслоения структурных блоков по «живому»		$0,2 < \eta \leq 0,3$		III
	Отслоения по «живому», «бочкование» выработок. Динамическое заколообразование, выпучивание неудароопасных пород		$0,3 < \eta \leq 0,5$		II
Посередине свода	Горные удары	Горизонтально	$\eta > 0,5$		I
	Шелушение в углублениях в вершинах сочленений трещин естественной отдельности		$0,12 < \eta \leq 0,2$	Неудароопасная	
	Локальные расслоения структурных блоков по «живому»		$0,2 < \eta \leq 0,3$		III
	Отслоения по «живому», «бочкование» выработок. Динамическое заколообразование, выпучивание неудароопасных пород		$0,3 < \eta \leq 0,5$		II
Смещение очага нарушения от замка свода	Горные удары	По касательной к поверхности нарушения	$\eta > 0,5$		I
	Шелушение в углублениях в вершинах сочленений трещин естественной отдельности		$0,12 < \eta \leq 0,2$	Неудароопасная	
	Локальные расслоения структурных блоков по «живому»		$0,2 < \eta \leq 0,3$		III
	Отслоения по «живому», «бочкование» выработок. Динамическое заколообразование, выпучивание неудароопасных пород		$0,3 < \eta \leq 0,5$		II

Таким образом, геодинамическая безопасность разработки сложноструктурных месторождений достигается за счет ведения комплексных методов измерений напряженного состояния массива горных пород и геомеханического мониторинга, который осуществляется посредством звукометрических и маркшейдерских приборов, струнных тензометров, глубинных реперов, оптических приборов, электрических цепей, смонтированных в скважинах на контролируемом участке, визуальными и косвенными методами по признакам и критериям водоопасности и удельной минерализации шахтных вод, нашедших применение при подземной разработке, в частности, приповерхностных запасов подречного целика реки Ингул (Украина) Мичуринского сложноструктурного месторождения в интервале глубин от 40–50 до 150–200 м и др. [15, 16].

### Выводы

1. **Установлены** интенсивность и механизм проявления горного давления для Мичуринского сложноструктурного месторождения с трещинными блоками отдельности и отсутствием шелушения в вершинах углов. Интенсивность напряженного состояния горного массива составила  $\eta < 0,12$ . На контуре выработки, где местами представлены поверхности разрушения по «живому» с обособлением линзообразных пластин, независимо от сланцеватости и блочности, интенсивность напряженного состояния массива  $0,2 < \eta < 0,3$ .

2. **Предложена** классификация напряженного состояния горного массива по степени удароопасности. При  $0,2 < \eta \leq 0,3$  устанавливается третья, при  $0,3 < \eta \leq 0,5$  – вторая, а при  $\eta > 0,5$  – первая категория удароопасности.

3. **Получена** эмпирическая параболическая зависимость величины коэффициента напряжений в стенках камер на флангах выработанного пространства ( $y$ ) от соотношения его длины к ширине ( $x$ ) вида  $y = a \cdot x^2 + b \cdot x$  ( $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от геомеханических свойств горного массива).

### Список литературы

1. Khomenko, O.Ye. Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2012. No. 4. P. 44–54.

2. Potvin Y., Wesseloo J. Towards an understanding of dynamic demand on ground support // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013. Vol. 113. No. 12. P. 913–922.

3. Bucher R., Cala M., Zimmermann A., Balg C., Roth A. Large scale field tests of high tensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading, 7th Int. Symp. on Ground Support in Mining and Underground construction, Perth, Australia, 2013, 13–15 May, pp. 345–370.

4. Balg C., Roduner A. Geobrugg AG: ground support applications, Int. Ground Support Conf., AGH University, Lungern, Switzerland, 2013, 11–13 September, pp. 311–320.

5. Протодьяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч.1. Давление горных пород. 3-е изд. М.; Л.; Новосибирск: ГНТИ, 1933. 127 с.

6. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 532 с.

7. Борисов А.А. Механика горных пород. М.: Недра, 1980. 359 с.

8. Цыгалов М.Н. Подземная разработка с высокой полнотой извлечения руд. М.: Недра, 1985. 272 с.

9. Слепцов М.Н., Азимов Р.Ш., Мосинец В.Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов. М.: Недра, 1986. 206 с.

10. Палий В.Д., Смелянский Е.С., Кравченко В.Г. Определение нормативной прочности твердеющей закладки // *Горный журнал*. 1989. №3. С.25–28.

11. Добыча и переработка урановых руд: монография / под общ. ред. А.П. Чернова. Киев: «Адеф-Украина», 2001. 238 с.

12. Чистяков Е.П. Совершенствование способов поддержания подземных горных выработок шахт Криворожского бассейна // *Вісник Криворізького технічного університету*. 2006. №13. С. 16–20.

13. Ляшенко В.И., Ткаченко А.А., Чистяков Е.П. Научно-технические основы определения геомеханических характеристик породных массивов при подземной разработке урановых месторождений // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. №1. С. 85–89.

14. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 11 дек. 2013 г. №599. Сер. 03. Вып. 78. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. 276 с.

15. Ляшенко В.И. Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры // *Маркшейдерский вестник*. 2016. №1. С. 35–43.

16. Хоменко О.Е., Ляшенко В.И. Геоэнергетические основы подземной разработки рудных месторождений // *Изв. вузов. Горный журнал*. 2017. №8. С. 10–18.

Поступила 12.03.18

Принята в печать 16.04.18

## IMPROVED GEOMECHANICAL SAFETY IN THE UNDERGROUND MINING OF COMPLEX STRUCTURE DEPOSITS

**Oleg E. Khomenko** – DSc (Eng.), Professor

National Technical University «Dniprovskaya Politehnika», Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnieper, Ukraine. E-mail: rudana.in.ua@gmail.com

**Vasily I. Lyashenko** – PhD (Eng.), Senior researcher

Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

### Abstract

**Problem Statement (Relevance):** This paper describes the main scientific and practical results of a study into enhancement of the geodynamic safety in the underground mining of complex structure deposits achieved through the application of stress monitoring and forecasting data on the rock mass with various rock pressure dynamics, as well as through certain preventive measures, including the prevention of rock bumps. Using the example of complex structure deposits of Ukraine, the physical properties of rock were analyzed, as well as some new rock pressure hypotheses, taking into account the outcrop stability analysis, the deformation and failure patterns, the time and space correlation of ore and rock excavation, and the parameter definition in terms of the structural elements of the development systems. **Objectives:** This research aims to increase the geodynamic safety in the underground mining of complex structure deposits through the application of stress monitoring and forecasting data on the rock mass with various rock pressure dynamics, as well as through certain preventive measures, including the prevention of rock bumps. **Methods Applied:** Improved techniques of underground investigations, laboratory and experimental research and mathematical and physical modeling were applied, as well as established and novel methods of theoretical analysis and summarization. **Originality:** The original features of this research include an established parabolic dependence of the stress coefficient in the chamber walls on the sides of the stripped area ( $y$ ) on the ratio of its length to its width ( $x$ ):  $y = a \cdot x^2 + bx$  (where  $a$  and  $b$  are coefficients that depend on the geomechanical properties of the rock mass). **Findings:** The article gives a classification of the stress state of the rock mass according to its rock-bump hazard degree. Thus, an area with  $\eta \leq 0.2$  is considered safe;  $0.2 < \eta \leq 0.3$  refers to the third class of rock-bump hazard,  $0.3 < \eta \leq 0.5$  – to the second class, and  $\eta > 0.5$  – to the first class correspondingly. **Practical Relevance:** This research provided initial data for the design of underground development system applicable to complex structure deposits depending on the orientation of maximum stresses relative to the mine.

**Keywords:** Complex structure deposits, underground development, geomechanical safety, rock pressure, rock-bump hazard.

### References

1. Khomenko O.Ye. Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks // *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2012, no. 4, pp. 44–54.
2. Potvin Y., Wesseloo J. Towards an understanding of dynamic demand on ground support, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2013, vol. 113, no. 12, pp. 913–922.
3. Bucher R., Cala M., Zimmermann A., Balg C., Roth A. Large scale field tests of high-tensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading, 7th Int. Symp. on Ground Support in Mining and Underground construction, Perth, Australia, 2013, 13–15 May, pp. 345–370.
4. Balg C., Roduner A. Geobruag AG: ground support applications, Int. Ground Support Conf., AGH University, Lungern, Switzerland, 2013, 11–13 September, pp. 311–320.
5. Protodyakonov M.M. Davlenie gornykh porod i rudnichnoe kreplenie. Ch.1. Davlenie gornykh porod. 3-e izd. M.-L. [Rock pressure and ground support. Part 1. Rock pressure. 3rd ed. Moscow, Leningrad, Novosibirsk: GNTI, 1933, 127 p. (In Russ.)
6. Muskhelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1966, 532 p. (In Russ.)
7. Borisov A.A. *Mekhanika gornykh porod* [Rocks mechanics]. Moscow: Nedra, 1980, 359 p. (In Russ.)
8. Tsygalov M.N. *Podzemnaya razrabotka s vysokoy polnotoy izvlecheniya rud* [Underground mining with high ore recovery]. Moscow: Nedra, 1985, 272 p. (In Russ.)
9. Sleptsov M.N., Azimov R.Sh., Mosinets V.N. *Podzemnaya razrabotka mestorozhdeniy tsvetnykh i redkikh metallov* [Underground mining of non-ferrous and rare metal deposits]. Moscow: Nedra, 1986, 206 p. (In Russ.)
10. Paliy V.D., Smelyansky E.S., Kravchenko V.G. Identifying the standard strength of the solid stowing. *Gornyi zhurnal* [Mining journal], 1989, no. 3, pp. 25–28. (In Russ.)
11. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud*. Monografiya. Pod obshchey redaktsiyey A.P. Chernova [Mining and processing of uranium ores. Monograph. Ed. by A.P. Chernov]. Kiev: Adef-Ukraine, 2001, 238 p.
12. Chistyakov E.P. Improving the ground support techniques at the underground mines of the Krivoy Rog basin. *Вісник Криворізького технічного університету* [Bulletin of the Krivoy Rog Technical University], 2006, no. 13, pp. 16–20.

13. Lyashenko V.I., Tkachenko A.A., Chistyakov E.P. The scientific and technical basis for determining the geomechanical characteristics of rock masses in the underground mining of uranium deposits. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 2006, no. 1, pp. 85–89. (In Russ.)
14. Mining safety: Federal HSE norms and regulations: Ratified by the Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia no. 599 dated 11 December 2013, Series 03, Issue 78. Moscow: Science and Technology Centre Industrial Safety, 2014. 276 p. (In Russ.)
15. Lyashenko V.I. Development of geomechanical monitoring of the properties and the state of a rock mass in the underground mining of complex structure deposits. *Markshreysdersky vestnik* [Surveyor bulletin], 2016, no. 1, pp. 35–43. (In Russ.)
16. Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Geoenergy in the underground mining of ore. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [Proceedings of Russian universities. Mining journal], 2017, no. 8, pp. 10–18. (In Russ.)

Received 12/03/18

Accepted 16/04/18

---

**Образец для цитирования**

Хоменко О.Е., Ляшенко В.И. Повышение геомеханической безопасности подземной разработки сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №2. С. 14–21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-14-21>

**For citation**

Khomenko O.E., Lyashenko V.I. Improved geomechanical safety in the underground mining of complex structure deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 2, pp. 14–21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-2-14-21>

---