

## РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ РУД НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

ХОМЕНКО О. Е.<sup>1</sup>, ЛЯШЕНКО В. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»  
(Украина, г. Днепр, просп. Яворницкого, 19)

<sup>2</sup> Украинский научно-исследовательский и проектно-исследовательский институт  
промышленной технологии  
(Украина, г. Желтые воды, просп. Свободы, 37)

**Введение.** Подземная разработка рудных месторождений характеризуется ухудшением горно-геологических и горнотехнических условий, повышением требований к охране окружающей среды и недр, а также безопасности жизнедеятельности человека в зоне влияния объектов горно-рудного производства.

**Цель работы.** Создание и внедрение ресурсосберегающих технологий добычи руд на больших глубинах на основе результатов анализа проявления энергии горного давления вокруг подземных выработок путем раскрытия физической сущности феномена их зонального капсулирования.

**Методология.** Применялся усовершенствованный метод шахтных, лабораторных и экспериментальных исследований, метод математического и физического моделирования, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам.

**Новизна.** Усовершенствована существующая классификация методов исследования напряженно-деформированного состояния горных пород посредством использования признака «способ представления массива» по функциональному назначению: натурные (промышленные), физические (лабораторные) и аналитические (теоретические). Установлено, что относительное количество перенаправленной энергии горного давления на поддержание горных выработок описывается параболо-гиперболической зависимостью, на базе чего разработаны геоэнергетические технологии подземной разработки рудных месторождений.

**Результат.** Разработаны технологические подходы к проектированию трасс нарезных и подготовительных выработок и геоэнергетические виды крепления в статических условиях зонального капсулирования на базе предложенных методологических принципов управления энергией предохранительной капсулы: противодействие, уравнивание, содействие, устранение и перенесение.

**Практическая значимость.** Определены технологические параметры проведения буровзрывных и очистных работ в условиях динамического деформирования массива в границах энергетических зон предохранительных капсул путем разработки устойчивой формы выработок подсежки и отрезки для шахт ЧАО «ЗЖРК». Предложено изменение направлений бурения эксплуатационных скважин для шахт ЧАО «ЗЖРК», а также рациональные расстояния между скважинами для шахт ГП «ВостГОК». Определена экономическая эффективность технологических решений по усовершенствованию подготовительных, нарезных, буровзрывных и очистных работ для рудных шахт Украины по удельным показателям эффективности горных работ.

**Ключевые слова:** крепость пород; горное давление; состояние горных пород; капсула выработки; ресурсосберегающие технологии.

**Введение.** В настоящее время глубины разработки рудных месторождений достигли отметки 1500 м, что привело к значительному ухудшению геодинамических условий добычи рудного сырья. Так, например, упругая потенциальная энергия Украинского кристаллического щита начала проявляться не только в виде шелушений и заколообразований, но и в виде горных ударов, стреляний и землетрясений различной амплитуды. Это привело к потере горных выработок

и запасов полезных ископаемых, повреждению объектов, травмированию и гибели людей. Поэтому создание и внедрение ресурсосберегающих технологий добычи руд на больших глубинах на основе результатов анализа проявления энергии горного давления вокруг подземных выработок путем раскрытия физической сущности феномена их зонального капсулирования – важная научная, практическая и социальная задача [1, 2].

**Теория и методы исследования.** Авторами выполнены исследования в области создания и внедрения ресурсосберегающих технологий добычи руд на больших глубинах на основе результатов анализа проявления энергии горного давления вокруг подземных выработок путем раскрытия физической сущности феномена их зонального капсулирования. Проанализированы физические свойства горных пород и новые гипотезы о горном давлении с учетом оценки степени устойчивости обнажений, выявления закономерностей их деформирования и разрушения, увязки извлечения руд и пород во времени и пространстве, определения параметров конструктивных элементов систем разработки, способов крепления и соответствующих типов крепи, промышленные, лабораторные и теоретические исследования, а также анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и разработанным методикам [3].

**Обсуждение и оценка полученных результатов.** Разработкой технологий подземной добычи полезных ископаемых в напряженных породах активно занимались ученые Российской Федерации, Украины, Республики Казахстан, Республики Кыргызстан, Германии, Австрии, Швейцарии, Франции, Англии, США, Канады, ЮАР и других развитых горнодобывающих стран мира. Исследователи учитывали изменения напряженности массива по степени влияния на параметры крепей выработок и систем разработки. Прикладной формат большинства научных разработок, которые основывались на принципе противодействия возрастающей энергии горного давления, ставил целью только минимизировать затраты на добычу. Такой подход сделал невозможным раскрытие физической сущности явления зональной дезинтеграции горных пород, которое проявляется вокруг всех подземных выработок, что несколько приостановило развитие фундаментальных теорий о горном давлении. За несколько последних десятилетий это стало значительной преградой на пути создания новых гипотез, теорий или методов, описания и моделирования зонального структурирования массива вокруг горных выработок [4–10].

**Классификация методов исследования состояния горных пород.** Разработка месторождений в разнообразных условиях залегания при разных свойствах руд и пород характеризуется растрескиванием, расслаиванием, заколообразованием, обрушением, удароопасностью и другими формами проявления энергии горного давления. Анализ горнотехнических и геодинамических условий разработки рудных месторождений Украины показал, что динамические проявления горного давления указывают на высокую обеспеченность отечественных рудных месторождений упругой потенциальной энергией горных пород. Накопление напряжений в массиве и разрушение горных пород, возникающие в процессе отработки месторождений, изучаются разнообразными методами. В основу большинства применяемых методов исследований положен принцип зависимостей разных свойств горных пород от их напряженно-деформированного состояния под воздействием естественных и искусственных энергетических полей в массиве.

Несмотря на многообразие применяемых методов и средств диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массива, по функциональному назначению их можно объединить в три класса: натурные (промышленные), физические (лабораторные) и аналитические (теоретические). Классы подразде-

ляются на группы (визуальные, маркшейдерские, механические, геофизические и другие) и далее на виды. При помощи признака «способ представления массива» была усовершенствована существующая классификация (табл. 1) [11].

Создание аналитической модели, адекватно описывающей явление зонального капсулирования горных выработок как одного из непознанных феноменов

**Таблица 1. Классификация методов исследования напряженно-деформированного состояния горных пород**

**Table 1. Classification of rocks stress-strained state research methods**

Класс	Группа	Вид
I. Натурные (промышленные)	Визуальные	Наблюдения и оценки
	Маркшейдерские	Маркшейдерские съемки
	Механические	Разгрузки массива Компенсационной нагрузки Разности давлений Упругих включений Деформации скважин Глубинных реперов
	Геофизические	Акустические Ультразвуковые Радиометрические Электрометрические Геомагнитные
II. Физические (лабораторные)	Исследования свойств пород	Плотностные Механические
	Эквивалентные материалы	Моделирования на прессах Центробежного моделирования
	Оптико-поляризационные	Моделирования на прессах Центробежного моделирования Объемной фотоупругости
	Электродинамических аналогий	Электрических сеток Электропроводных материалов
III. Аналитические (теоретические)	Механики горных пород	Сплошной среды Упругости Пластичности Ползучести Граничных разностей Граничных элементов Конечных элементов
	Синергетические	Энтропийные Термодинамические Энергетические

физического мира, возможно при использовании синергетических методов исследования: энтропийных, термодинамических, энергетических. Термодинамический метод, созданный В. Ф. Лавриненко, апробирован и широко применяется при моделировании. Основы энтропийного метода в рамках термодинамической теории была доработаны и расширены для использования в качестве обособленного метода исследования. Далее на базе энтропийного метода, который определяет параметры ненарушенного массива, и термодинамического метода, который моделирует состояние массива в приконтурной зоне (зоне разгрузки), был разработан еще один синергетический метод, который является энергетическим. Он позволяет моделировать состояние массива в энергетических зонах, которые

формируют предохранительную капсулу, и описывать взаимодействие механической, термодинамической и других видов энергий [12].

**Определение размеров и формы энергетических зон в капсуле.** Формирование горной выработки является причиной нарушения энергетического баланса ненарушенного массива, что обуславливает возникновение и протекание в нем самоорганизующихся термодинамических процессов путем преобразования потенциальной энергии в работу деформации пород. В результате этих процессов в пределах вмещающего массива появляются энергетические поля, формирующие обособленные энергетические зоны. Градиент объемной плотности потенциальной энергии в контуре выработки и окружающем ее массиве предопределяет интенсивность протекания процесса деформирования минерального вещества в виде шелушения, отслоения, обрушения, стреляния или горного удара. Градиент температур рудничной атмосферы в выработке и породах, окружающих ее, определяет уровень фактических термических напряжений на поверхности обнажения [13].

**Таблица 2. Компоненты потенциальных напряжений в ненарушенном массиве горных пород Украинского кристаллического щита**

**Table 2. The components of potential stresses within the unbroken rock massif of the Ukrainian Crystalline Shield**

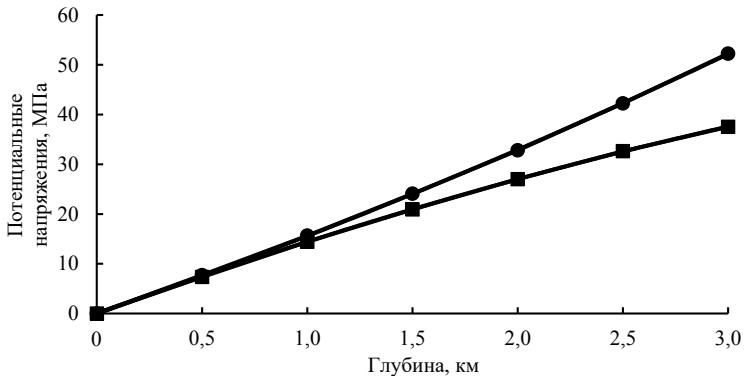
Глубина $H$ , м	Давление $\sigma_z$ , МПа	Фактические внешние напряжения, МПа		Радиус круга внутренних напряжений $R_{\text{в}}$ , м	Упругие потенциальные напряжения, МПа	
		вертикальные $\sigma_{z\text{ф}}$	горизонтальные $\sigma_{x\text{ф}}$		горизонтальные $\Delta\sigma_{x(y)} = \Delta\sigma_{y(y)}$	вертикальные $\Delta\sigma_{z(y)}$
500	15,0	7,72	15,0	7,72	7,72	7,35
1000	30,0	15,64	30,0	15,64	15,64	14,33
1500	45,0	24,08	45,0	24,08	24,08	20,92
2000	60,0	32,80	60,0	32,80	32,80	27,02
2500	76,0	42,24	76,0	42,24	42,24	32,64
3000	91,0	52,25	91,0	52,25	52,25	37,53

В результате нарушения механического и, как следствие, энергетического равновесия ненарушенного массива вокруг выработки образуется несколько зон, в которых протекают процессы преобразования потенциальной энергии в работу деформирования пород и перехода теплоты от нагретого массива к рудничной атмосфере. Энергетические зоны характеризуются более высокими параметрами интенсивности: напряжения, температуры, плотности, намагниченности – по сравнению с нетронутым массивом. В зависимости от условий проведения выработки (физические свойства пород, глубина заложения, форма сечения, габаритные размеры, виды крепления) будут варьироваться размеры и форма энергетических зон. Расчетные значения коэффициента формы энергетических зон  $\lambda$  для руд и пород прочностью 40–180 МПа, которые определяются согласно расчетным напряжениям, приведены в табл. 2 [14].

Связанные с деформациями упругие напряжения являются потенциальными, поскольку работа, которую они могут выполнить, зависит от величины обратной деформации, возникающей при частичном или полном снятии внешней нагрузки. В результате приращений потенциальной энергии в горных породах Украинского кристаллического щита только часть ее  $\Delta W_{\sigma}$  участвует в процессах деформирования. Возрастание вертикального давления до 91 МПа на глубине до 3000 м приводит к перераспределению потенциальной энергии в массиве, которая составляет для вертикальных упругих потенциальных напряжений 57 %, для

горизонтальных – 95 %. Полученные квадратичные зависимости потенциальных напряжений, действующих в ненарушенном массиве горных пород Украинского кристаллического щита, представлены на рис. 1 [14].

Для определения количества энергии при креплении и поддержании выработки необходимо найти разницу между вертикальным давлением массива на крепь и величиной отпора, создаваемой крепежной системой выработки. Для этого воспользуемся экспресс-методикой, основанной на учете изменения формы энергетических зон  $\lambda$  для различной прочности пород Кривбасса (рис. 2) [15]. Уменьшение коэффициента  $\lambda$  от 1 до 0 отображает возрастание горного давления пород на крепь выработки, величина которого на  $1 \text{ м}^2$  крепи со стороны кровли определяется как объем массива, заключенного в приконтурной энергетической зоне, и находится как разность между вертикальной полуосью приконтурной зоны  $a$  и половиной высоты подготовительной  $0,5h$  или очистной  $0,5l_{np}$  выработки:  $P_m = \gamma(a - 0,5h)$ , МПа.



Напряжения: ● – горизонтальные,  $\Delta\sigma_{x(y)} = \Delta\sigma_{y(y)}$ ; ■ – вертикальные,  $\Delta\sigma_{z(y)}$

Рис. 1. Изменение потенциальных напряжений, действующих в ненарушенном массиве горных пород

Fig. 1. Dependences of potential stresses acting within an unbroken rock massif

Граничным значением является устойчивость контура выработки, при котором минимальное значение  $\lambda$  принимают равным 0,5, что соответствует использованию принципов уравнивания, содействия и устранения. Если значение  $\lambda$  приближается к 0,5, то давление пород на крепь существенно возрастает и предопределяет применение при разработке крепежных и поддерживающих систем принципов перенесения и противодействия.

Расчеты показали, что, например, для подготовительной выработки, проводимой в породах прочностью 80 МПа, значения  $\lambda = 0,9 - a = 0,44$  м, при  $0,8 - a = 0,68$  м, при  $0,7 - a = 1,0$  м, при  $0,6 - a = 1,42$  м, при  $0,5 - a = 2,0$  м и при  $0,1 - a = 16$  м. Для очистных выработок эти значения в среднем в 2 раза выше. Помимо этого, относительное количество используемой энергии находится в эквивалентном отношении к давлению массива на контуре выработки [16].

**Исследование и оценка этажно-камерной системы разработки с отбойкой руды из подэтажных штреков.** Исследование состояния горных пород вокруг очистных камер выполнялось для базового и предлагаемого вариантов заложения подэтажных буровых штреков на примере очистного блока в маркшейдерских осях 110–118 по залежи Основная карьера 2 шахты «Терновская» ПАО «Криворожский ЖРК» гор. 1200 м. Теоретические исследования по определению размеров и форм областей возможного разрушения массива производили с помощью энергетического метода. Распределение областей возможного разрушения в

окрестности очистных камер представлено на рис. 3, а. Из рисунка видно, что буровые штреки попадают в области интенсивного разрушения пород. Лабораторные исследования проводили на эквивалентных материалах на стенде физического моделирования, установленном в лаборатории кафедры строительства, геомеханики и геотехники (Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина).

При моделировании базового варианта заложения буровых штреков расстояние от камеры принималось эквивалентным 5 м (рис. 3, б, в). Факт неустойчивости пород подтверждается экспериментами, проведенными на эквивалентных материалах, с высокой степенью достоверности. Промышленные исследования были реализованы с помощью инструментальных методов с использованием электронных приборов (тахометр, лазерная рулетка) по определению фактических размеров очистных камер (рис. 3, г).

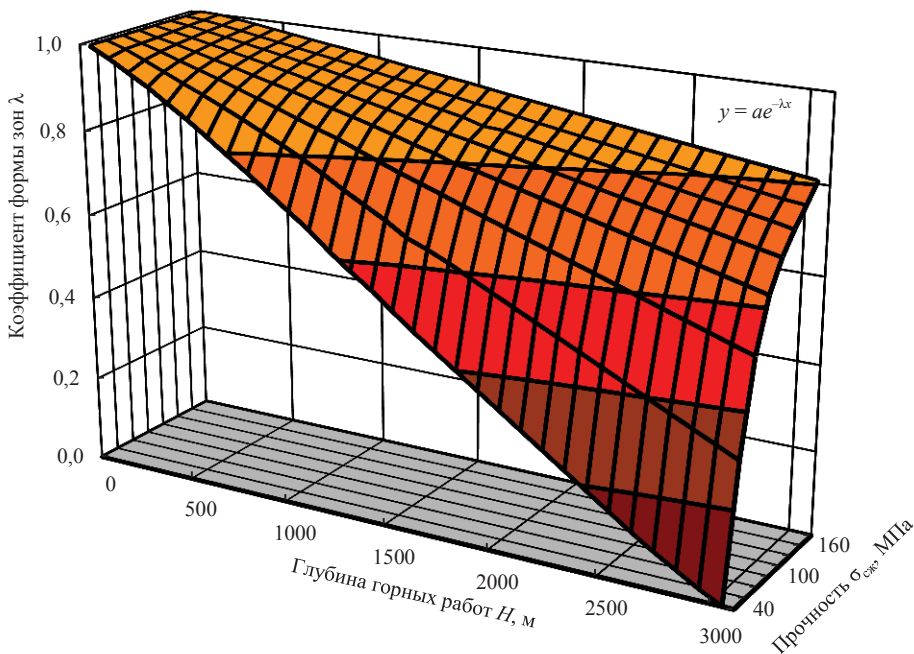


Рис. 2. Значения  $\lambda$  для различной прочности пород  
Fig. 2. The values of  $\lambda$  for various rock strength

Полученные результаты исследований энергетического состояния горных пород в окрестности очистных камер дали возможность разработать методику по выбору рациональных мест заложения буровых выработок или выбора их рационального крепления.

Принцип уравнивания учитывает баланс между факторами энергии массива, с одной стороны, и размерами и формой выработок, с другой, и позволяет находить между ними баланс и практически не использовать энергию для крепления и поддержания выработок (0–10 %). Принципы содействия и устранения близки по уровню используемой энергии массива (10–35 %). Разница в том, что принцип содействия применяют для очистных выработок при производстве добычных работ, а принцип устранения – при сохранении устойчивости подготовительных выработок. Самым эффективным методологическим принципом является принцип перенесения, который позволяет использовать до 86 % энергии массива посредством саморегулируемого анкерного крепления, которое нейтра-

лизует конвергенцию массива за счет энергии дивергенции. Экономическая эффективность предлагаемого подхода составляет 1,5 грн/т, что при производственной мощности шахты в 1,5 млн т/год составит 2,25 млн грн. Для удобства сравнения показатели сгруппированы по виду выполняемых горных работ – подготовительные и очистные [17]. Удельная эффективность подготовительных работ описывается параболо-гиперболической зависимостью от используемой энергии массива (рис. 4).

Полученные результаты позволили обосновать новые технологии вскрытия, подготовки и разработки рудных месторождений на Украине и за рубежом, которые позволяют использовать до 86 % энергии горного давления с экономией ресурсов до 37 % [18].

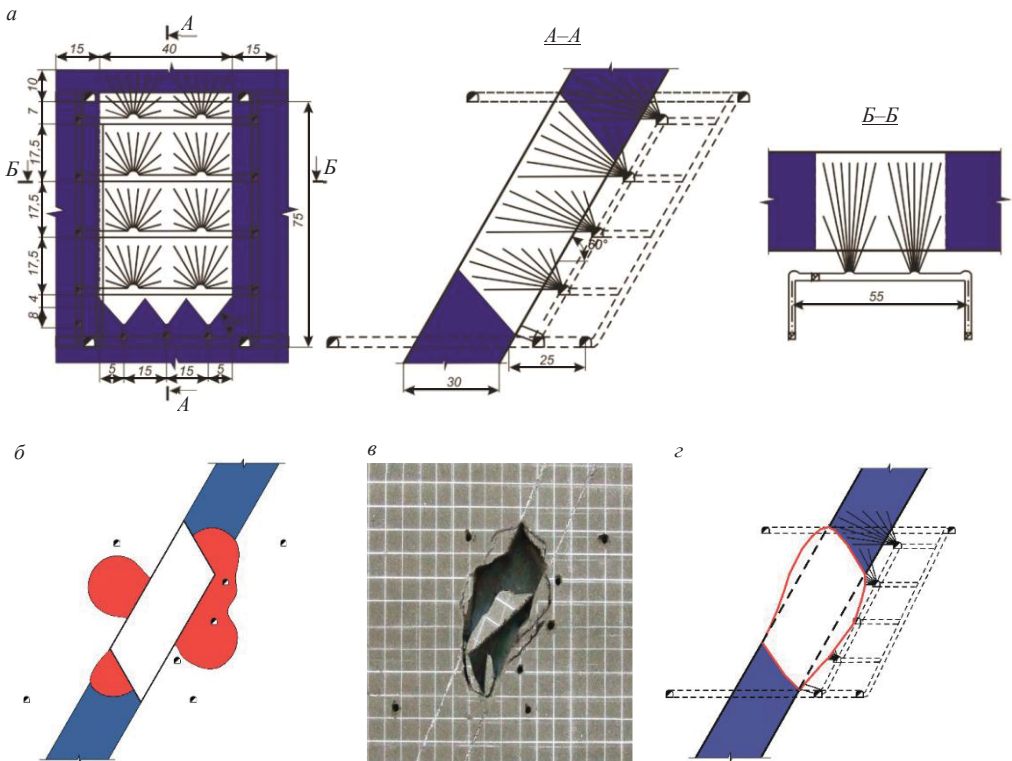


Рис. 3. Этажно-камерная система разработки с отбойкой руды из подэтажных буровых штреков, пройденных по породе – а; результаты теоретических – б, лабораторных – в и промышленных – г исследований предлагаемого способа нарезки очистных блоков на шахтах Кривбасса  
 Fig. 3. Horizon-chamber mining with ore breaking from sublevel drilling rock galleries – а; the results of theoretical – б, laboratory – в, and industrial – г research of the suggested method of cutting stopping blocks at the mines of Kryvbas

**Перспективы развития исследований.** Пределом развития волновых процессов вокруг горных выработок является установление энергетического равновесия в предохранительной капсуле и приравнивание ее прочности к ненарушенному массиву. Развитие геоэнергетических методологических основ оптимизации технологии горных работ должно привести к созданию соответствующей подсистемы автоматизации проектирования и планирования горных работ, повышению экологической безопасности окружающей среды и улучшению показателей здоровья населения, проживающего в горнодобывающем и перерабатывающих регионах.

**Выводы.** Установлен классификационный признак «состояние исследуемого массива», позволяющий разделить научные теории о горном давлении на подзем-

ные выработки на три основных класса: сил, деформаций и состояний массива. Теории сил содержат группы гипотез состояния свода, балок и плит. Теории деформаций содержат группы гипотез разрушения, релаксации, ползучести нарушенного массива. Третий класс – состояние массива согласно термодинамической и энергетической теориям зонального капсулирования подземных выработок.

**Показано**, что существующие теории не позволяют установить размеры, форму, количество зон и образуемых в них областей деформаций и, главное, открыть физическую сущность явления, которое приводит к зональному структурированию массива вокруг выработок. Результатом этих исследований стало признание данного феноменального явления одной из сложнейших проблем горной науки, не поддающихся решению на базе современных представлений физики. С использованием синергетического методологического поиска раскрыта физическая сущность такого исследуемого феномена, как зональное капсулирование выработки системой кольцевых энергетических зон, и описаны физические процессы, протекающие в предохранительной капсуле выработки.

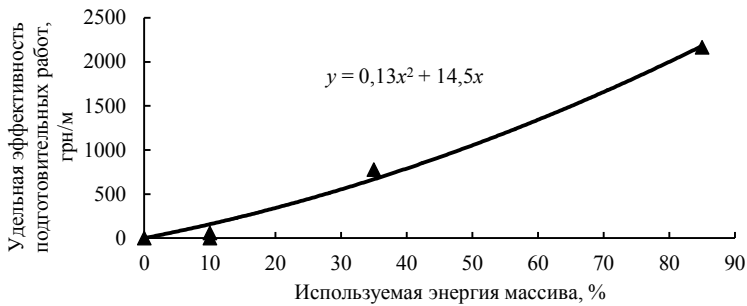


Рис. 4. Изменение удельной себестоимости подготовительных работ (в ценах 2013 г.) с увеличением энергии массива  
Fig. 4. Regularity of preparatory operations unit cost (prices for 2013)

**Разработаны** технологические подходы к проектированию трасс нарезных и подготовительных выработок и геоэнергетические виды крепления в статических условиях зонального капсулирования на базе предложенных методологических принципов управления энергией предохранительной капсулы: противодействие, уравнивание, содействие, устранение и перенесение. Установлено, что относительное количество перенаправленной энергии горного давления на поддержание горных выработок описывается параболо-гиперболической зависимостью, на базе чего разработаны геоэнергетические технологии подземной разработки рудных месторождений.

**Обоснованы** технологические параметры проведения буровзрывных и очистных работ в условиях динамического деформирования массива в границах энергетических зон предохранительных капсул путем разработки устойчивой формы выработок подсечки и отрезки для шахт ЧАО «ЗЖРК». Для конструктивных элементов блоков на шахтах ПАО «КЖРК» предложена эллипсоидная форма, которая исключает самообрушение руды, пород и закладки в очистное пространство с нулевым балансом между использованием и затратами энергии по принципу уравнивания. Предложено изменение направлений бурения эксплуатационных скважин для шахт ЧАО «ЗЖРК», а также рациональные расстояния между скважинами для шахт ГП «ВостГОК».

**Оценена** экономическая эффективность разработанных геоэнергетических технологий и реализовано промышленное внедрение в технические и организационные проекты разработки отечественных и зарубежных рудных месторожде-



ний путем разработки методики и создания программного продукта, выполнения расчетов и их анализа. Определена экономическая эффективность технологических решений по усовершенствованию подготовительных, нарезных, буровзрывных и очистных работ для рудных шахт Украины по удельным показателям эффективности горных работ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ляшенко В. И., Голик В. И., Колоколов О. В. Создание и внедрение природо- и ресурсосберегающих технологий подземной разработки месторождений сложной структуры // Известия вузов. Горный журнал. 1994. № 4. С. 31–37.
2. Хоменко О. Е., Ляшенко В. И. Геоэнергетические основы подземной разработки рудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 8. С. 10–18.
3. Khomenko O., Kononenko M. Phenomenon of underground working encapsulation: identification, modeling & appliance // Collection of Research Papers of NMU. 2017. No. 52. P. 166–177.
4. Спелдинг Дж. Управление горным давлением. Теория и практика // Горное давление. М.: Изд-во лит. по горному делу, 1961. С. 242–274.
5. Феннер Р. Исследования горного давления // Горное давление. М.: Изд-во лит. по горному делу, 1961. С. 5–68.
6. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах // Горное давление. М.: Изд-во лит. по горному делу, 1961. С. 59–164.
7. Руппнейт К. В., Либерман Ю. М. Введение в механику горных пород. М.: Госгортехиздат, 1960. 356 с.
8. Либерман Ю. М. Давление на крепь капитальных выработок. М.: Наука, 1969. 118 с.
9. Авершин С. Г. Горные удары. М.: Углетехиздат, 1955. 235 с.
10. Kvapil R. Zur Theorie der Gtsteinszenstörung, Intern. Gebirgsdrucktagung, Zeipzig, Akademieverlag, Berlin, 1958.
11. Hast N. The measuriment of rock pressure in mines. Sveriges Geologiska Undersökning. Ser. C. 1958. No. 560. Arsbok 52. No. 3. P. 183.
12. 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.
13. Лавриненко В. Ф. Преобразование энергии и формирование полей напряжений в массиве вокруг выработки // Известия вузов. Горный журнал. 1986. № 4. С. 5–11.
14. Хоменко О. Е., Ляшенко В. И. Развитие методологии геоэнергетического мониторинга при подземной разработке рудных месторождений // Маркшейдерия и недропользование. 2017. № 5. С. 33–40.
15. Khomenko O. Ye. Geoenergetics of underground mining of ore deposits: monograph. D.: NMU, 2016. 242 p.
16. Хоменко О. Е., Ляшенко В. И. Повышение безопасности добычи руд на основе использования геоэнергии // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 7. С. 18–24.
17. Khomenko O. Ye., Sudakov A. K., Malanchuk Z. R., Malanchuk Ye. Z. Principles of rock pressure energy usage during underground mining of deposits // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2017. No. 2. P. 35–43.
18. Khomenko O., Kononenko M., Astafiev D. Effectiveness of Geo-Energy Usage during Underground Mining of Deposits // Advanced Engineering Forum. 2017. Vol. 22. P. 100–106.

Поступила в редакцию 6 марта 2018 года

**Для цитирования:** Хоменко О. Е., Ляшенко В. И. Ресурсосберегающие технологии добычи руд на больших глубинах // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 8. С. 23–33.

#### Сведения об авторах:

**Хоменко Олег Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального технического университета «Днепровская политехника». E-mail: rudana.in.ua@gmail.com

**Ляшенко Василий Иванович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела ГП «Украинский научно-исследовательский и проектно-исследовательский институт промышленной технологии». E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

#### RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR ORE EXTRACTION AT GREAT DEPTHS

**Khomenko O. E.<sup>1</sup>, Liashenko V. I.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> National TU Dnipro Polytechnic, Dnepr, Ukraine.

<sup>2</sup> State Enterprise “Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology”, Zhovti Vody, Ukraine.

**Introduction.** Underground mining of ore deposits is characterized by deterioration of mining and geological and mining conditions, increased requirements for environmental protection and subsurface resources protection, as well as human life safety in the zone of mining facilities influence.

**Research aims** at the creation and implementation of resource-saving ore mining technologies at great depths on the basis of the analysis results of the rock pressure energy manifestation around underground excavations by revealing the physical essence of their zonal encapsulation phenomenon.

**Methodology.** An advanced method of mine, laboratory and experimental studies, mathematical and physical modeling, as well as theoretical analysis and generalization of research results using standard and new techniques has been applied.

**Novelty.** The existent classification of methods for studying the stress-strain state of rocks using the "method of representing the array" function has been improved to its elements: functional (industrial), physical (laboratory), and analytical (theoretical). It has been established that the relative amount of redirected energy of the rock pressure aimed to maintain the mine workings is described by a parabolic-hyperbolic dependence, on the basis of which geoenergetic technologies for ore deposits underground mining have been developed.

**Result.** Technological approaches have been developed to the design of face and development headings runways, and geoenergetic types of fixing in static conditions of zonal encapsulation on the basis of the proposed methodological principles of protective capsule energy management: counteraction, counterbalancing, assistance, elimination, and transfer.

**Practical significance** consists in technological parameters of drilling and blasting operations and stoping in conditions of dynamic deformation of a massif within safety capsules energy zones by developing a stable form of undercutting and cuttings for PJSC ZZHRK mines. A change in production wells drilling directions for PJSC ZZHRK mines has been suggested, as well as rational distances between the wells for the mines of the State Enterprise VostGOK. Economic efficiency of technological solutions over the improvement of preparatory, rifling, drilling and blasting, and cleaning works for Ukrainian ore mines has been determined according to specific indicators of mining efficiency.

**Key words:** rock strength; rock pressure; classification of theories; production capsule; resource-saving technologies.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-8-23-33

#### REFERENCES

- Liashenko V. I., Golik V. I., Kolokolov O. V. [Development and introduction of nature and resource saving technologies of complex structured deposits underground exploitation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1994, no. 4, pp. 31–37. (In Russ.)
- Khomenko O. E., Liashenko V. I. [Geoenergetic fundamentals of ore deposits underground mining]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 8, pp. 10–18. (In Russ.)
- Khomenko O., Kononenko M. Phenomenon of underground working encapsulation: identification, modeling and appliance. *Collection of Research Papers of NMU*, 2017, no. 52, pp. 166–177.
- Spalding J. [Rock pressure management. Theory and Practice]. Rock Pressure. Moscow, Izd-vo lit. po gornomu delu Publ., 1961, pp. 242–274. (In Russ.)
- Fenner R. [Rock pressure research]. Rock Pressure. Moscow, Izd-vo lit. po gornomu delu Publ., 1961, pp. 5–68. (In Russ.)
- Labass A. [Rock pressure in coal mines]. Rock Pressure. Moscow, Izd-vo lit. po gornomu delu Publ., 1961, pp. 59–164. (In Russ.)
- Ruppeneit K. V., Liberman Iu. M. [Introduction to rock mechanics]. Moscow, Gosgortekhzizdat Publ., 356 p.
- Liberman Iu. M. [Pressure on the supports of permanent mine workings]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 118 p.
- Avershin S. G. [Rock bumps]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1955. 235 c.
- Kvapil R. Zur Theorie der Gtsteinszenstörung, Intern. Gebirgsdrucktagung, Zeipzig, Akademieverlag, Berlin, 1958.
- Hast N. The measurement of rock pressure in mines. *Sveriges Geologiska Undersökning. Ser. C*, 1958, no. 560, Arsbok 52, no. 3, 183 p.
- Khomenko O. E. [Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2012, Issue 4, pp. 44–54.
- Lavrinenko V. F. [Energy conversion and the formation of stress fields in a massif around the mine working]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1986, no. 4, pp. 5–11. (In Russ.)
- Khomenko O. E., Liashenko V. I. [The development of the methodology of geoenergetic monitoring during the underground development of ore deposits]. *Marksheideriia i nedropol'zovanie – Mine Surveying and Subsurface Use*, 2017, no. 5, pp. 33–40. (In Russ.)
- Khomenko O. E. [Geoenergetics of underground mining of ore deposits: monograph]. Donetsk, NMU Publ., 2016. 242 p.
- Khomenko O. E., Liashenko V. I. [Increase in safety of ores extraction on the basis of geoenergy use]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry*, 2017, no. 7, pp. 18–24. (In Russ.)

17. Khomenko O. E. [Principles of rock pressure energy usage during underground mining of deposits]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2017, no. 2, pp. 35–43.
18. Khomenko O., Kononenko M., Astafiev D. *Effectiveness of Geo-Energy Usage during Underground Mining of Deposits. Advanced Engineering Forum*, 2017, vol. 22, pp. 100–106.

**Information about authors:**

**Khomenko Oleg Evgen'evich** – Doctor of Engineering Science, professor of the Department of Underground Mining, National TU Dnipro Polytechnic. E-mail: rudana.in.ua@gmail.com

**Liashenko Vasilii Ivanovich** – Candidate of Engineering Science, senior researcher, Head of the Scientific Research Department of State Enterprise “Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology”. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

---