

Повышение горнотехнической безопасности проведения подземных выработок



О.Е. Хоменко,
д-р техн. наук, проф.,
rudana.in.ua@gmail.com



В.И. Ляшенко,
канд. техн. наук,
ст. науч. сотрудник

НТУ «Днепро́вская
политехника», Днепр, Украина

ГП «УкрНИПИИ
промтехнологии», Желтые
Воды, Украина

Приведены основные научные и практические результаты исследований повышения горнотехнической безопасности проведения подземных выработок на основе процессов структурирования массива в условиях зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок с помощью моделирования на эквивалентных, оптико-поляризационных и электропроводных материалах. Установлено отношение вертикальных и горизонтальных полюсов зон в массиве и определена достоверность полученных результатов. Раскрыты возможности широко применяемых численных методов моделирования для исследования показателей явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок.

Ключевые слова: горнотехническая безопасность, горные породы, подземные выработки, методы моделирования, зональная дезинтеграция.

DOI: 10.24000/0409-2961-2019-4-43-51

Введение

Большинство рудных месторождений многих стран мира с развитыми отраслями горнодобывающей промышленности характеризуется сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями добычи. Эффективное управление энергетическим состоянием рудовмещающего массива в сложных условиях разработки может быть обеспечено раскрытием физической сущности явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок. Для этого необходима разработка требований к синергетическим методам исследования, заключающимся в возможности более точного определения числа, размеров и формы зон, а также синусоидально затухающих напряжений и кольцевых областей деформаций массива. Поэтому повышение горнотехнической безопасности подземных выработок на основе обоснования принципов управления природными факторами и их использования в геоэнергетических технологиях разработки месторождений в условиях зональной дезинтеграции горных пород долгие годы оставалось нерешенной научно-практической проблемой [1].

В работе использован системный подход, включающий анализ результатов научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по видам проявления энергии горного давления, способам повышения устойчивости выработок, теориям горного давления вокруг выработок и энергетическим процессам в горных породах, а также физические и аналитические эксперименты. Лабораторные исследования выполнялись с помощью моделирования на

эквивалентных, оптико-поляризационных и электропроводных материалах, а теоретические опыты — с использованием методов конечных элементов и термодинамического. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждалась применением апробированных методов исследования, удовлетворительной достоверностью результатов физических (89 %) и аналитических (88 %) экспериментов и сходимостью лабораторных и теоретических (98 %) исследований [2].

Цель работы — повышение горнотехнической безопасности подземных выработок в условиях зональной дезинтеграции горных пород на основе моделирования на эквивалентных, оптико-поляризационных и электропроводных материалах в целях повышения эффективности и объемов добычи рудного сырья, что невозможно без раскрытия сущности зонального структурирования массива вокруг выработок и описания процессов и закономерностей этого феноменального явления, обоснования принципов управления природными факторами и их использования в геоэнергетических технологиях разработки месторождений [3].

Задачи исследований

При подготовке к проведению исследований ставились следующие задачи:

проанализировать проблему и дать оценку горнотехнической безопасности эксплуатации подземных выработок в условиях их зональной дезинтеграции; установить показатели зонального структурирования массива вокруг горных выработок с помощью промышленных, лабораторных и теоретических ме-

тодов исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород;

исследовать влияние энтропии на обмен энергией и развитие деформаций при формировании энергетических потоков в элементарном объеме горного массива, а также процессы в предохранительных капсулах, установленных вокруг горных выработок;

разработать геоэнергетические подходы к проектированию трасс подготовительных и нарезных выработок и обосновать параметры крепления в статических условиях формирования предохранительных капсул.

Оценка полученных результатов

Для решения поставленных задач авторы определяли физические свойства горных пород в условиях их естественного залегания на заданной глубине для установления соответствия условиям подобия в физических и теоретических моделях. Термодинамическая теория В.Ф. Лавриненко позволяет достаточно точно определить следующие характеристики ненарушенного массива горных пород с учетом коэффициента уплотнения минерального вещества K_y : объемную массу породы $\gamma_y = K_y \gamma_0$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,5 - (K_y - 1)(6K_y)^{-1}(1 - K_y^{-0,33})^{-1}$; модуль Юнга (модуль продольной упругости) $E_0 = \sigma_z[(1 - K_y)^{-0,33}]^{-1}$; модуль объемной упругости $K_0 = \sigma_z \Delta V^{-1}$; коэффициент сжимаемости $\beta = K_0^{-1}$; модуль сдвига $G = 3K_0(1 - 2\mu)[2(\mu + 1)]^{-1}$; скорость продольной упругой волны $V_p = [3K_0(1 - \mu)\gamma_y^{-1}(1 + \mu)^{-1}]^{0,5}$; скорость поперечной упругой волны $V_s = [1,5K_0(1 - 2\mu)\gamma_y^{-1}(1 + 2\mu)^{-1}]^{0,5}$; относительную объемную деформацию $\Delta V = (K_y - 1)K_y^{-1}$; относительную линейную деформацию $\varepsilon = 1 - K_y^{-0,33}$; температуру массива пород $T_M = \Delta V \omega^{-1}$; магнитную восприимчивость $\nu = CT^{-1}$ [3].

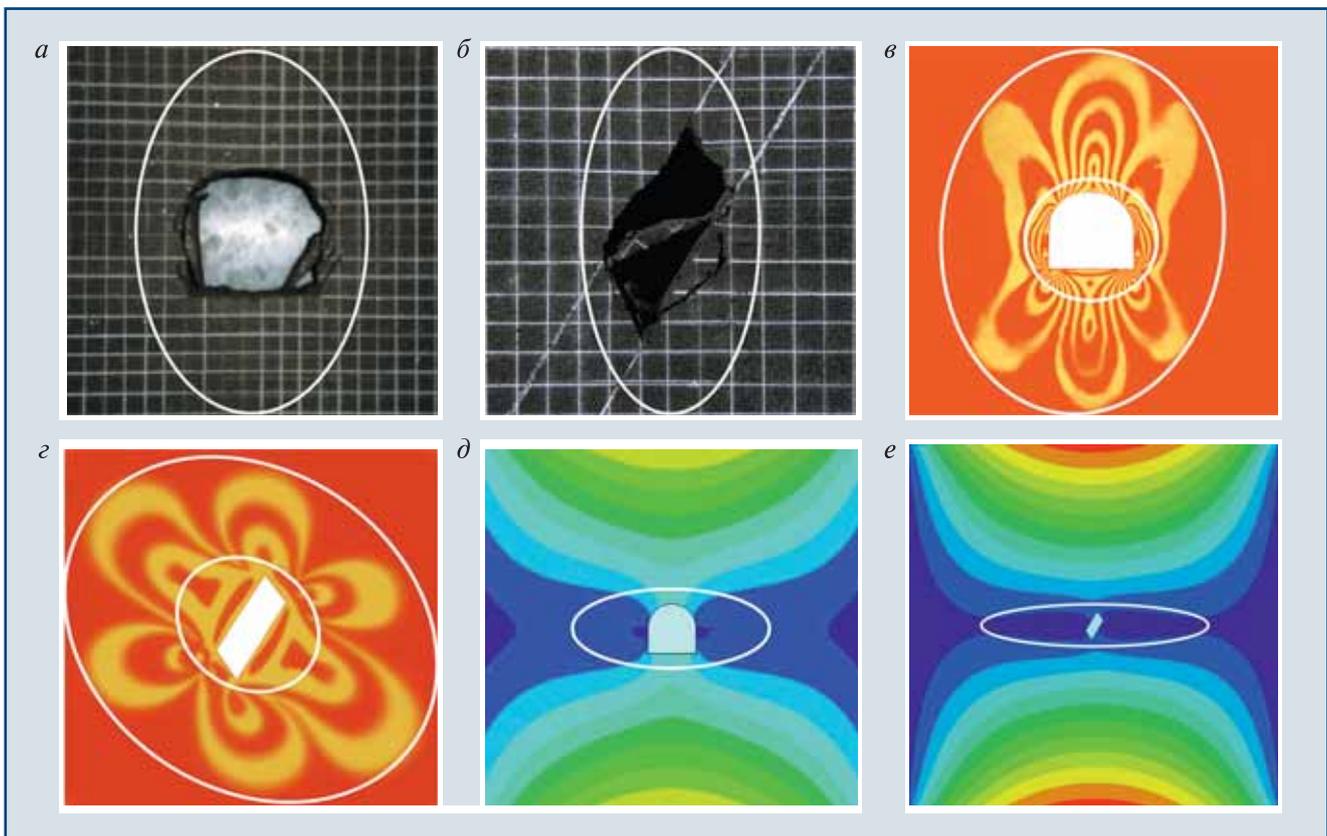
Физические свойства горных пород в условиях естественного залегания определяли до глубин 3 тыс. м — по данным геологического строения исследуемых участков шахтных полей. Результаты моделирования ненарушенного массива для расчетного вертикального профиля, расположенного на 92-й маркшейдерской оси в точке ее пересечения с линией среднего простирания +1214 м (смещение вправо от нулевой отметки вертикального профиля для месторождения Кривбасса) на глубине 1200 м шахты «Терновская» ПАО «Криворожский ЖРК», показали, что объемный вес руды возрос на 0,79 МН/м³, а вмещающих пород — на 0,22 МН/м³. В условиях объемного сжатия прочность руды увеличилась с 70 до 120,8 МПа, а вмещающих пород — с 180 до 350 МПа. Соответственно возросли и абсолютные значения модуля Юнга — с 0,843·10⁵ до 1,63·10⁵ МПа для пород и с 0,324·10⁵ до 0,593·10⁵ МПа для руд. Для формирования массива исходных данных (граничных значений данных) при моделировании поведения горных пород использовались следующие показатели: глубина горных работ $H = 0-3000$ м;

предел прочности пород на одноосное сжатие для гранитов, амфиболитов $\sigma_{сж} = 37-180$ МПа, базальтов $\sigma_{сж} = 30-200$ МПа; модуль Юнга породы E_0 , МПа; модули упругости для глинистых сланцев, галитов, гнейсов $1-3 \cdot 10^3$ МПа, базальтов, диабазов, дунитов $1-3 \cdot 10^5$ МПа; коэффициенты поперечных деформаций для сланцев, гнейсов $\nu = 0,01-0,08$, дунитов, амфиболитов $\nu = 0,4-0,46$; скорости продольных упругих волн в осадочных породах $1,5-4,5$ км/с, плотных известняках $6-7$ км/с; коэффициент поглощения энергии упругих колебаний в породах средней крепости и трещиноватости $\nu = 0,15-0,17$, крепких и монолитных $\nu = 0,1-0,12$ [4].

Физическое моделирование зональности на лабораторных моделях

Метод эквивалентных материалов. Для моделирования подготовительных и очистных выработок при проявлении в массиве зональной дезинтеграции применялся подбор эквивалентного материала путем определения предела прочности на сжатие, модуля упругости и коэффициента Пуассона по цилиндрическим образцам с помощью цифрового пресса. Состав эквивалентного материала подбирался по основным физическим свойствам в целях воспроизводства свойств горных пород Криворожского и других рудных месторождений Украины. Свойства эквивалентного материала регулировали соотношением кварцевого песка, молотого гранита, чугунной стружки, измельченной слюды и парафина. Модели нагружали на стенде для плоского моделирования горного давления. Для каждого варианта провели три испытания. С учетом отладки процесса моделирования и числа продублированных вариантов испытали более 30 моделей [5].

При моделировании измеряли абсолютные смещения отдельных точек и степени деформаций элементов модели. К моделированию принимались: площадь поперечного сечения горно-подготовительной выработки $S_{пр} = 10,5$ м² (здесь высота сечения $h_b = 3$ м, а ширина $d_b = 3,5$ м); размеры очистной камеры: высота $h_k = 60$ м, длина $l_{пр} = 40$ м; глубина заложения выработок $H = 1000$ м; прочность вмещающих руд 80 МПа [6]. Результаты моделирования на эквивалентных материалах показали возможность визуализации зональной напряженности массива, эллипсоидную форму зон, их центрирование относительно выработок, симметричную форму зон в горизонтальной и вертикальной плоскостях и др. Возможности метода позволяли получить лишь качественную картину зональности в массиве, что подтверждалось растянутостью эллипсоидной формы зон в вертикальной плоскости и сжатостью в горизонтальной при неизменных нагрузке и составе эквивалентного материала, а также значительно различающихся размерах и формах зон для подготовительных и очистных выработок (рис. 1, здесь эллиптические линии вокруг выработок — границы зон, где напряжения приближаются к γH).



▲ Рис. 1. Результаты выявления энергетических зон при моделировании подготовительных (а, в, д) и очистных (б, г, е) выработок на эквивалентных (а, б), оптико-поляризационных (в, г) и электропроводных (д, е) материалах на глубине 1000 м
▲ Fig. 1. Results of energy zones identification at the simulation of development (a, в, д) and excavation (б, г, е) workings on the equivalent (a, б), optical polarization (в, г) and electrically conductive (д, е) materials at a depth of 1000 m

Отношения вертикальных и горизонтальных полуосей к полуразмерам выработок для зоны № 1 составляют для подготовительной выработки $a_n/(0,5h) = 1,71$ и $b_n/(0,5b) = 1,88$, а для очистной — 1,71 и 1,51 соответственно. Сходимость относительных размеров зон находится в пределах 88–100 %. При моделировании подготовительной выработки относительные разрушения массива в боках и кровле $(U + 0,5h)/(0,5h)$ составили 1,5, а для очистной камеры — 1,14 [7].

Оптико-поляризационный метод. Модели исследовали на стенде для оптико-поляризационного моделирования. Они изготавливались из полимеров на основе эпоксидной смолы типа ЭПД. Отверждение смолы достигалось с помощью малеинового ангидрида (отвердителя), который использовали в количестве 20–40 % от веса смолы.

Для приготовления моделей смолу и ангидрид нагревали соответственно до 70–80 и 50 °С, а затем тщательно смешивали и заливали в специальные формы, также подогретые до 60–70 °С. После этого формы переносили в термостаты для полимеризации при температуре 120–130 °С. Далее для снятия остаточных напряжений модели отжигали при температуре, которая устанавливалась на 5–10 °С выше максимальной температуры полимеризации [8]. Мо-

дуль упругости и коэффициент Пуассона материала определяли в результате измерения деформаций при помощи механического тензомера на образцах в виде растягиваемой полосы. Изменение модуля упругости (в 1–2 раза) достигалось при добавлении в первоначальную смесь дибутилфталата [9].

На рис. 1, в, г выделены зоны, где это условие для зон № 2 выполняется полностью, а для зон № 1 только частично — в отдельных точках (20–24 шт.) и сегментах (2–4 шт.) эллипсов. Невысокая точность моделирования зон влияет на достоверность и сходимость полученных результатов, по которым сделаны выводы о возможностях оптико-поляризационного метода моделирования зональной напряженности массива горных пород. Используемый метод позволил увидеть уже второй порядок зон, но при этом сама картина зональной напряженности оказалась более удаленной от истинной. Это проявляется в невыдержанности напряженности по площади зон, что позволяет обрисовать контуры (оконтуривание) однородно напряженного массива сугубо условно. Эллипсоиды имели несимметричную форму в горизонтальных и вертикальных плоскостях — нарушено их центрирование относительно выработок. Более точные результаты достигаются при моделировании областей концентрации напряжений, в отличие от

областей разряджения, при помощи которых и выявляется истинная зональность в массиве [10]. Отношения вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне № 1 составляют для подготовительной выработки $a_n/(0,5h) = 1,43$ и $b_n/(0,5b) = 1,56$, в зоне № 2 — соответственно 4,71 и 3,28; для очистной выработки в зоне № 1 $a_n/(0,5h) = 1,33$ и $b_n/(0,5b) = 1,71$, а в зоне № 2 — соответственно 3,12 и 4,57. Сходимость относительных размеров при моделировании составляет 91–93 % для зоны № 1 и 66–72 % для зоны № 2.

Метод электродинамических аналогий. Применялся для изучения стационарных физических процессов, которые описываются уравнениями эллиптического вида. Этот метод основан на математической аналогии между стационарными движениями электрического тока в проводящей среде и распространением тепла в твердых телах, диффузией газа и жидкости и др. В качестве электропроводящей среды применялась электропроводная бумага шириной 0,5 м, которая позволяет использовать для питания модели постоянный ток, обеспечивает низкую контактную разность потенциалов между бумагой и металлическими шинами и легко поддается механической обработке при изготовлении моделей горных выработок [11].

Изготовлению модели предшествовали определение геометрических форм исследуемой области и задание краевых условий на ее границах. Затем выбирали геометрический масштаб моделирования и наносили графические контуры выработок на лист электропроводной бумаги. После этого бумагу обрезали вдоль границ моделируемой области. Граничные условия на модели задавались в соответствии с теорией подобия. После изготовления модель подключали к установке, в результате чего на шины модели подавали разность потенциалов, условно принимаемую равной единице или 100 %. Методика проведения экспериментов сводится к определению геометрического местоположения точек с одинаковыми значениями приведенного электрического потенциала путем описанных измерений [12].

Результаты физического моделирования с помощью метода электродинамических аналогий показали возможность визуализации зональной напряженности массива только условно. Метод позволил выявить зоны первого порядка (№ 1), картина формирования которых практически не соответствует истинной из-за нарушения условия γH на границе зон. Это свидетельствует лишь о качественной стороне выявленной зональности в массиве — по причине несоответствия напряжений по поверхностям (площадям) зон и на их границах [13]. Отношение вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне № 1 составляет для подготовительной выработки $a_n/(0,5h) = 1,69$ и для очистной — $a_n/(0,5h) = 1,66$. Хотя эллипсоиды обладают симметричной формой и центрированы с выработками, их размеры в горизонтальной плоскости сильно завышены как для

подготовительной ($b_n/(0,5b) = 3,25$), так и для очистной ($b_n/(0,5b) = 13$) выработок. Достоверность относительных размеров зоны № 1 при моделировании вертикальных полуосей составляет 98 %, а горизонтальных — 66 % и меньше. Поэтому напрашивается мысль, что исследование как первичных, так и вторичных факторов интенсивности напряжений может сопровождаться значительными погрешностями. Это подтверждено результатами, полученными при моделировании зональности в массиве с помощью метода электропроводных материалов [3].

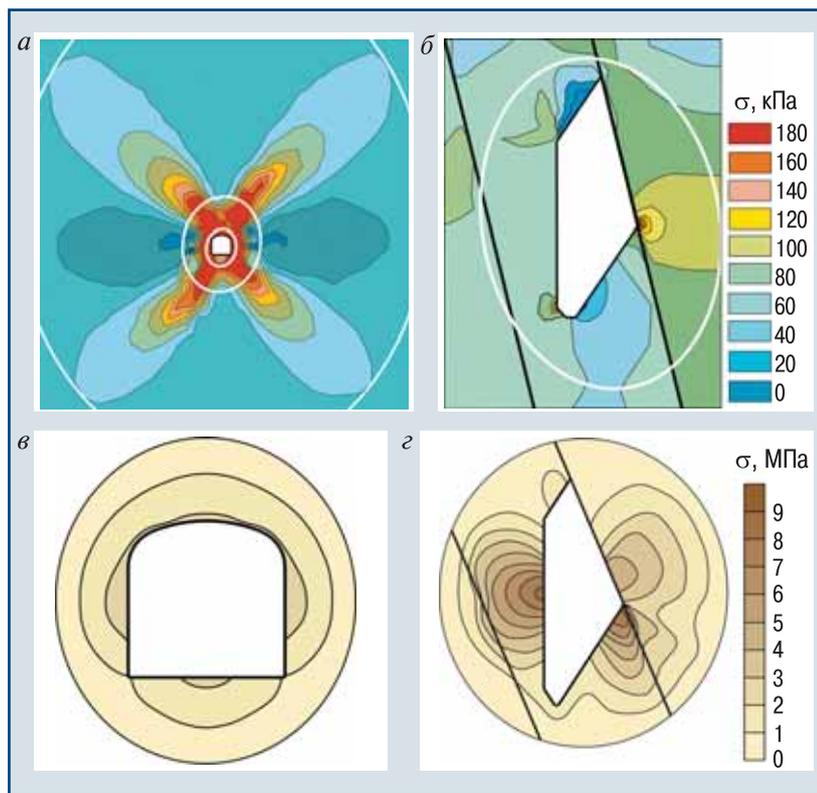
Теоретическое моделирование зональности. В соответствии с классификацией к теоретическим (аналитическим) методам исследования отнесены математические методы описания механики горных пород, которые основаны на положениях теории сплошной среды, теории упругости, пластичности и ползучести. Наиболее широко используемая группа математических методов — аналитические методы теории упругости. Основное их преимущество заключается в том, что они дают реальную основу для понимания только геомеханических процессов, вызываемых образованием выработки. Основной недостаток — высокая степень идеализации горных пород до однородного изотропного или анизотропного массива с простейшей геометрией подземной конструкции, вследствие чего утрачиваются некоторые существенные особенности конкретных породных массивов. В целях приближения модельных представлений к реальным условиям в механике горных пород используют аналитические методы теорий пластичности и ползучести. Это позволяет достичь определенных результатов, однако практический выход сильно затруднен вследствие чрезвычайной идеализации строения рудопородного массива и определения граничных условий. Усовершенствования существующих численных методов и дополняющих критериев прочности не позволяют точно определить границы зон разряджения и концентрации напряжений вокруг горных выработок, что ставит под сомнение достоверность полученных результатов в целом [14].

Помимо этого, применяются различные теории феноменологической прочности: теория наибольших нормальных напряжений (критерий У.Д. Ренкина); теория наибольших касательных напряжений; критерий Ш. Кулона — А. Навье; критерий О. Мора (с учетом усовершенствования Р. Гриффитса, Э. Хозкома, Г.Н. Кузнецова); интегральная оценка устойчивости пород Н.С. Бульчева и Н.Н. Фотиевой; критерий А. Гриффитса — У. Брейса; оценка интегральных характеристик массива, не зависящих от его локальных качеств (гидравлический радиус В.Д. Слесарева) и др. Адекватность выбора и применения критерия прочности ставит под сомнение результаты моделирования [15].

Метод конечных элементов. Относится к вариационным методам и представляет собой обобщение метода Релея — Ритца — Галеркина. Сущность метода

состоит в том, что искомую непрерывную величину аппроксимируют набором простейших функций, заданных над ограниченными конечными элементами. Таким образом, породный массив представляется в виде набора относительно больших конечных элементов, как правило, связанных между собой в отдельных узлах. Моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород является диаметрально противоположной задачей, в которой отсутствует достоверная информация об их свойствах и точных размерах выработок при непрерывном протекании процессов деформирования массива [16].

Моделирование состояния массива вокруг горно-подготовительных и очистных выработок выполнялось с помощью современных программных продуктов. При исследовании состояния массива с помощью метода конечных элементов на контуре выработок получали стремящиеся к нулю нормальные и максимальные касательные напряжения (рис. 2).



▲ Рис. 2. Развитие напряженно-деформированного состояния и формирование зон разгрузки и концентрации напряжений вокруг подготовительной выработки (а, в) и очистной камеры (б, з) на глубине 1000 м, смоделированных методами конечных элементов (а, б) и термодинамическим (в, з)

▲ Fig. 2. Development of the stress-strain state and the formation of unloading zones and stress concentration around the development working (а, в) and shrink stope (б, з) at a depth of 1000 m modeled by the finite element methods (а, б) and thermodynamic ones (в, з)

Отношения вертикальных и горизонтальных полуосей составляют для подготовительной выработки в зоне № 1 1,75 и 1,5, в зоне № 2 — 5,2 и 4, в зоне № 3 — 23,75 и 20, а для очистной выработки в зоне № 1 —

1,3 и 3,25. Сходимость относительных размеров при моделировании зоны № 1 составляет 85,71 %, зоны № 2 — 76,92 % и зоны № 3 — 84,21 % [17].

Термодинамический метод. Базируясь на фундаментальных законах физики, термодинамический метод позволяет довольно точно установить оптимальные размеры и форму устойчивого обнажения массива на любой заданной глубине в конкретных горно-геологических условиях залегания рудных тел. Он основывается на том, что исследуемый массив горных пород рассматривается как термодинамическая система. В общем случае задача сводится к последовательному определению потенциальных напряжений в ненарушенном массиве, физических свойств пород в условиях их залегания, напряженного состояния пород вокруг выработок [4]. Для подготовительных выработок основные области концентрации напряжений — кровля, почва и бока выработки, а для очистных камер — породы висячего и лежачего боков, потолочина и днище.

В соответствии с изложенным исследовали величины напряжений с учетом изменения глубины горных работ (глубина заложения выработок), физических свойств горных пород (прочность, устойчивость, разрушаемость), технологических параметров выработок (размеры, форма, конструктивное исполнение). Затем должны исследоваться области возможного разрушения при моделировании глубины горных работ и физико-механические свойства выработок — в целях усовершенствования их технологических параметров.

В рассматриваемом методе заведомо заложен критерий по определению областей деформирования путем сравнения реальных напряжений с предельно допустимыми на растяжение и сдвиг (см. рис. 2, в, з) [3]. Главный же его недостаток заключается в отсутствии возможности определения количественных и качественных показателей состояния массива за пределами зон разгрузки (разряжения) напряжений. Отношения вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне № 1 составляют для подготовительной выработки 2,05 и 1,9, а для очистной — 1,78 и 3,45. Сходимость относительных размеров при моделировании для зоны № 1 составляет 92,68 %. Относительная глубина разрушения массива $(U_n + 0,5h)/(0,5h)$ в зоне разгрузки при моделировании термодинамическим методом для подготовительных и очистных выработок находится в пределах 0,01 и 35 [18].

Оценка полученных результатов

На основании исследований и экспериментов авторы разработали геоэнергетические подходы к проектированию трасс нарезных и подготовительных выработок и обосновали параметры крепления в статических условиях капсулирования на базе предложенных принципов управления энергией предохранительной капсулы для рудных месторождений Украины. Установлено, что относительное количество энергии горного давления, направленной на поддержание горных выработок, описывается параболо-гиперболической зависимостью, на базе чего разработаны геоэнергетические подходы к технологии подземной разработки рудных месторождений. Предложено временное крепление забоя подготовительных выработок для шахт ПАО «Марганецкий ГОК», что обеспечивает противодействие энергии массива. Определение рациональных мест закладки буровых штреков на шахтах ПАО «Криворожский ЖРК» сопровождается использованием до 35 % энергии массива. Рациональное размещение трасс закладки и выбор оптимальной формы поперечного сечения этажных и подэтажных полевых штреков на шахтах АО «Запорожский ЖРК» позволяют использовать до 35 % энергии массива. Комбинирование устойчивой формы сечения подготовительных выработок с саморегулируемым креплением для шахт ПАО «Криворожский ЖРК» позволяет использовать до 86 % энергии, которая ранее тратилась массивом на разрушение выработки.

Обоснованы технологические параметры проведения буровзрывных и очистных работ в условиях динамического деформирования массива в энергетических подзонах капсул путем разработки устойчивой формы выработок для шахт АО «Запорожский ЖРК». Для конструктивных элементов эксплуатационных блоков на шахтах ПАО «Криворожский ЖРК» предложена эллипсоидная форма, исключающая самообрушения руды, пород и предусматривающая закладки в очистное пространство по принципу уравновешивания. Предложены изменения направлений бурения эксплуатационных скважин для шахт АО «Запорожский ЖРК», а также рациональные расстояния между скважинами для шахт ГП «Восточный ГОК», рассчитанные с применением принципа содействия, что позволяет использовать до 10 % энергии массива [19–22].

Перспективы развития исследований

Исследования явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок, проведенные с помощью широко применяемых лабораторных и теоретических методов, позволили установить достаточно точное число энергетических зон, их размеры и форму. При этом выявить синусоидально затухающие напряжения и кольцевые области деформаций не представляется возможным. Усовершенствование существующего энтропийного метода как части термодинамической теории и создание

нового — энергетического — позволят исследовать указанные параметры, которые управляют феноменальным явлением зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок [23–27].

Заключение

Установлено, что физические исследования параметров энергетических зон на лабораторных моделях из эквивалентных материалов показали возможность визуализации зональной напряженности массива, эллипсоидную форму зон, их центрирование относительно выработок и симметричную форму в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Отношения полуосей зон к полуразмерам выработки составили для зоны № 1 для подготовительной выработки 1,71 и 1,88, а для очистной — 1,71 и 1,51 соответственно. Относительные разрушения массива в боках и кровле выработки составили 1,5, а для очистной камеры — 1,14.

Обоснованы результаты физического исследования на оптико-поляризационных материалах, что позволило смоделировать уже второй порядок зон, в которых эллипсоиды имели несимметричную форму и не центрировались с выработками. Отношения вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне № 1 составили для подготовительной выработки 1,43 и 1,56, в зоне № 2 — соответственно 4,71 и 3,28; для очистной выработки в зоне № 1 — 1,33 и 1,71, а в зоне № 2 — соответственно 3,12 и 4,57.

Определены данные физического моделирования с помощью метода электродинамических аналогий, что позволило исследовать только приконтурные зоны, в которых при симметричной форме эллипсоидов и центрировании с выработками отношения вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне № 1 составляют для подготовительной выработки 1,69 и для очистной — 1,66. При этом размеры зоны в горизонтальной плоскости сильно завышены как для подготовительной (3,25), так и для очистной (13) выработок.

Моделирование напряженности массива теоретическими методами, основным из которых является метод конечных элементов, показало, что на контуре выработок нормальные напряжения приближаются к нулю, а касательные имеют максимальные значения, которые без установления адекватного критерия прочности не могут показать области возможного разрушения. Выявленные отношения вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне № 1 составляют для подготовительной выработки 1,75 и 1,5; в зоне № 2 — 5,2 и 4; в зоне № 3 — 23,75 и 20, а для очистной выработки в зоне № 1 — 1,3 и 3,25.

Список литературы

1. *Принципи використання енергії гірського тиску при підземній розробці родовищ*/ О.Е. Хоменко, А.К. Судак, З.Р. Маланчук, Е.З. Маланчук// Науковий вісник Національного гірничого університету. — 2017. — № 2. — С. 34–43.

2. *Ляшенко В.И., Дядечкин Н.И.* Определение параметров технологии подземной разработки урановых месторождений// Горный журнал. — 2009. — № 10. — С. 55–58.
3. *Kononenko M., Khomenko O.* Technology of support of workings near to extraction chambers// *New Techniques And Technologies In Mining*. — London: Francis Group, 2010. — P. 193–197.
4. *Лавриненко В.Ф., Лысак В.И.* Термодинамический метод расчета начальных напряжений в массивах пород и его использование при решении практических задач// Напряженно-деформированное состояние и устойчивость скальных склонов и бортов карьеров: науч.-техн. сб. — Фрунзе: Илим, 1979. — С. 204–212.
5. *Analytical Research of the Stress-Deformed State in the Rock Massif Around Faulting/ V. Lozynskiy, P. Saik, M. Petlovyani et al.*// *International Journal of Engineering Research in Africa*. — 2018. — № 35. — P. 77–88.
6. *Method of simulating rock mass stability in laboratory conditions using equivalent materials/ M. Stupnik, V. Kalinichenko, S. Pysmennyi et al.*// *Mining of Mineral Deposits*. — 2016. — Vol. 10. — Iss. 3. — P. 46–51.
7. *Numerical modelling of massif zonal structuring around underground working/ M. Kononenko, O. Khomenko, A. Sudakov et al.*// *Mining of Mineral Deposits*. — 2016. — Vol. 10. — Iss. 3. — P. 101–106.
8. *An overview of surface rock support for deformable ground conditions/ V. Louchnikov, M.P. Sandy, O. Watson et al.*// *12th Underground Operators' Conference*. — Adelaide, 2014. — 173 p.
9. *Large scale field tests of hightensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading/ R. Bucher, M. Cala, A. Zimmermann et al.*// *7th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground construction*. — Perth, 2013. — P. 345–370.
10. *Shashenko O.M., Sdvyzhkova O.O., Babets D.V.* Method of argument group account in geomechanical calculation// *12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010*. — Prague, 2010. — P. 488–493.
11. *Balg C., Roduner A., Geobrugg A.G.* Ground Support applications// *International Ground Support Conference*. — Lungern, 2013. — P. 311–320.
12. *An overview of surface rock support for deformable ground conditions/ V. Louchnikov, M.P. Sandy, O. Watson et al.*// *12th Underground Operators' Conference*. — Adelaide, 2014. — 173 p.
13. *Modeling of stopes in soft ores during ore mining/ N. Stupnik, V. Kalinichenko, V. Kolosov et al.*// *Metallurgical and mining industry*. — 2014. — № 3. — P. 32–36.
14. *Khomenko O., Kononenko M., Danylchenko M.* Modeling of bearing massif condition during chamber mining of ore deposits// *Mining of Mineral Deposits*. — 2016. — Vol. 10. — № 2. — P. 40–47.
15. *Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems/ D.V. Babets, O.O. Sdvyzhkova, M.H. Larionov, R.M. Tereshchuk*// *Scientific Bulletin of National Mining University*. — 2017. — № 2. — P. 58–64.
16. *Hrinjv V., Khorolskiy A.* Improving the of coal extraktion based on the parameter optimization of mining equipment// *E3S Web of Conferences*. — 2018. — № 60.
17. *Numerical modelling of massif zonal structuring around underground working/ M. Kononenko, O. Khomenko, A. Sudakov et al.*// *Mining of mineral deposits*. — 2016. — Vol. 10. — № 3. — P. 101–106.
18. *Khomenko O.* Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks// *Scientific Bulletin of National Mining University*. — 2012. — № 4. — P. 44–54.
19. *Study of rock geomechanical processes while mining two-level interchamber pillars/ V. Russkikh, A. Yavorsky, S. Zubko, E. Chistyakov*// *Mining of mineral deposits*. — London: Taylor & Francis Group, 2013. — P. 149–152.
20. *Estimation of frictional sparking effect on firedamp inflammation during fragmentation of gas-saturated rock massif/ V.I. Golinko, A.V. Yavorskiy, Ya.Ya. Lebedev, Ye.A. Yavorskaya*// *Scientific Bulletin of National Mining University*. — 2014. — № 6. — P. 31–37.
21. *Modeling of heat transport in an aquifer during accumulation and extraction of thermal energy/ D.V. Rudakov, I.A. Sado-venko, A.V. Inkin, Z.N. Yakubovskaya*// *Scientific Bulletin of National Mining University*. — 2012. — № 1. — P. 40–45.
22. *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.
23. *Increasing ecological safety during underground mining of iron-ore deposits/ O. Khomenko, M. Kononenko, I. Myronova, A. Sudakov*// *Scientific Bulletin of National Mining University*. — 2018. — № 2. — P. 29–38.
24. *Khomenko O., Kononenko M., Bilegsaikhan J.* Classification of Theories about Rock Pressure// *Solid State Phenomena*. — 2018. — № 277. — P. 157–167.
25. *Khomenko O., Barna T.* Zonal-and-Wave Structure of Open Systems on Micro, Mega- and Macrolevels of the Universe// *Philosophy And Cosmology*. — 2019. — № 22. — P. 24–32.
26. *Self-regulating roof-bolting with the rock pressure energy use/ O. Khomenko, M. Kononenko, I. Kovalenko, D. Astafiev*// *E3S Web of Conferences*. — 2018. — № 60. — P. 1–10.
27. *О.Е. Хоменко, М.Н. Кононенко, В.И. Ляшенко.* Безопасная добыча гранитов на марганцеворудных месторождениях Украины// *Безопасность труда в промышленности*. — 2019. — № 1. — С. 53–61.

rudana.in.ua@gmail.com

Материал поступил в редакцию 20 марта 2019 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2019, № 4, pp. 43–51.
DOI: 10.24000/0409-2961-2019-4-43-51

Improvement of the Mine Technical Safety for the Underground Workings

O.E. Khomenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof.,
rudana.in.ua@gmail.com

National Technical University «Dneprovskaya Politehnika»,
Dnepr, Ukraine

V.I. Lyashenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Assistant,
vilyashenko2017@gmail.com

GP «UkrNIPII promtehnologii», Zheltuye Vody, Ukraine

Abstract

The main scientific and practical results of studies related to mine technical safety improvement for the underground workings based on the processes of structuring the massif under the conditions of rocks zonal disintegration around the underground workings using the methods of equivalent, optical polarization and electrically conductive materials are presented in the article. The boundaries of the zones were determined based on conformity of stresses to the value of γH . The results of studies of the parameters of zones on the physical models showed the possibility of visualizing the massif zonal stress, the ellipsoid shape of zones and their centering in relation to the workings. The relations of vertical and horizontal semi-axes of zones for development workings and shrink stopings are established, and the convergence of the obtained values is determined. Theoretical studies of the zonal disintegration of rocks around the underground workings were carried out by the finite element method and by the thermodynamic method. As a result, the sizes were modeled, and the number of zones formed around the development and excavation workings was identified. The ratio of vertical and horizontal semi-axes of zones in the massif is established, and the reliability of the obtained results is determined. The possibilities are revealed concerning widely used numerical modeling methods for study of phenomenon indicators of the zonal disintegration of rocks around the underground workings. As a result of modeling of zones sizes and shapes formed in the massif around the underground workings, the requirements for synergetic research methods were developed, consisting in the possibility of determining, in addition to quantity, the sizes and shapes of zones, as well as sinusoidally damped stresses and annular areas of massif deformations.

Key words: mine technical safety, rocks, underground workings, modeling methods, zonal disintegration.

References

1. Khomenko O.E., Sudakov A.K., Malanchuk Z.R., Malanchuk E.Z. Principles of use of rock pressure energy during deposits underground mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu = Scientific Bulletin of the National Mining University*. 2017. № 2. pp. 34–43. (In Ukr.).
2. Lyashenko V.I., Dyadchkin N.I. Determination of the parameters of the technology for underground mining of uranium deposits. *Gornyy zhurnal = Mining Journal*. 2009. № 10. pp. 55–58. (In Russ.).
3. Kononenko M., Khomenko O. Technology of support of workings near to extraction chambers. *New Techniques And Technologies In Mining*. London: Francis Group, 2010. pp. 193–197.
4. Lavrinenko V.F., Lysak V.I. Thermodynamic method of the calculation of initial stresses in the rock massifs and its use in solving practical problems. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i ustoychivost skalnykh sklonov i bortov karerov: nauch.-tekhn. sb.* (Stress-strain state and stability of rocky slopes and edge of the open-pit mine: scientific-technical collected works). Frunze: Ilim, 1979. pp. 204–212. (In Russ.).
5. Lozynskiy V., Saik P., Petlovanyi M., Sai K., Malanchuk Ye. Analytical Research of the Stress-Deformed State in the Rock Massif Around Faulting. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. № 35. pp. 77–88.
6. Stupnik M., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Kalinichenko O., Fedko M. Method of simulating rock mass stability in laboratory conditions using equivalent materials. *Mining of Mineral Deposits*. 2016. Vol. 10. Iss. 3. pp. 46–51.
7. Kononenko M., Khomenko O., Sudakov A., Drobot S., Lkhagva Ts. Numerical modelling of massif zonal structuring around underground working. *Mining of Mineral Deposits*. 2016. Vol. 10. Iss. 3. pp. 101–106.
8. Louchnikov V., Sandy M.P., Watson O., Eremenko V., Orunesu M. An overview of surface rock support for deformable ground conditions. *12th Underground Operators' Conference*. Adelaide, 2014. 173 p.
9. Bucher R., Cala M., Zimmermann A., Balg C., Roth A. Large scale field tests of hightensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading. *7th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground construction*. Perth, 2013. pp. 345–370.
10. Shashenko O.M., Sdvyzhkova O.O., Babets D.V. Method of argument group account in geomechanical calculation. *12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010*. Prague, 2010. pp. 488–493.
11. Balg C., Roduner A., Geobruigg A.G. Ground Support applications. *International Ground Support Conference*. Lungen, 2013. pp. 311–320.
12. Louchnikov V., Sandy M.P., Watson O., Eremenko V., Orunesu M. An overview of surface rock support for deformable ground conditions. *12th Underground Operators' Conference*. Adelaide, 2014. 173 p.
13. Stupnik N., Kalinichenko V., Kolosov V., Pismennyi S., Shepel A. Modeling of stopes in soft ores during ore mining. *Metallurgical and mining industry*. 2014. № 3. pp. 32–36.
14. Khomenko O., Kononenko M., Danylchenko M. Modeling of bearing massif condition during chamber mining of ore deposits. *Mining of Mineral Deposits*. 2016. Vol. 10. № 2. pp. 40–47.
15. Babets D.V., Sdvyzhkova O.O., Larionov M.H., Tereshchuk R.M. Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017. № 2. pp. 58–64.
16. Hrinjv V., Khorolskiy A. Improving the of coal extraction based on the parameter optimization of mining equipment. *E3S Web of Conferences*. 2018. № 60.
17. Kononenko M., Khomenko O., Sudakov A., Drobot S., Lkhagva Ts. Numerical modelling of massif zonal structuring around underground working. *Mining of mineral deposits*. 2016. Vol.10. № 3. pp. 101–106.
18. Khomenko O. Implementation of energy method in study of zonal disintegration of rocks. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2012. № 4. pp. 44–54.
19. Russkikh V., Yavorskiy A., Zubko S., Chistyakov E. Study of rock geomechanical processes while mining two-level inter-chamber pillars. *Mining of mineral deposits*. London: Taylor & Francis Group, 2013. pp. 149–152.
20. Golinko V.I., Yavorskiy A.V., Lebedev Ya.Ya., Yavorskaya Ye.A. Estimation of frictional sparking effect on firedamp inflammation during fragmentation of gas-saturated rock massif. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2014. № 6. pp. 31–37.

21. Rudakov D.V., Sadovenko I.A., Inkin A.V., Yakubovskaya Z.N. Modeling of heat transport in an aquifer during accumulation and extraction of thermal energy. Scientific Bulletin of National Mining University. 2012. № 1. pp. 40–45.

22. Lyashenko V.I. Development of geomechanical monitoring of the properties and state of the rock massif during underground mining of complex structure deposits. *Marksheyderskiy vestnik = Surveying Bulletin*. 2016. № 1. pp. 35–43. (In Russ.).

23. Khomenko O., Kononenko M., Myronova I., Sudakov A. Increasing ecological safety during underground mining of iron-ore deposits. Scientific Bulletin of National Mining University. 2018. № 2. pp. 29–38.

24. Khomenko O., Kononenko M., Bilegsaikhan J. Classification of Theories about Rock Pressure. Solid State Phenomena. 2018. № 277. pp. 157–167.

25. Khomenko O., Barna T. Zonal-and-Wave Structure of Open Systems on Micro, Mega- and Macrolevels of the Universe. Philosophy And Cosmology. 2019. № 22. pp. 24–32.

26. Khomenko O., Kononenko M., Kovalenko I., Astafiev D. Self-regulating roof-bolting with the rock pressure energy use. E3S Web of Conferences. 2018. № 60. pp. 1–10.

27. Khomenko O.E., Kononenko M.N., Lyashenko V.I. Safe Mining of Granites at the Manganese Ore Deposits of Ukraine. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2019. № 1. pp. 53–61.

Received March 20, 2019

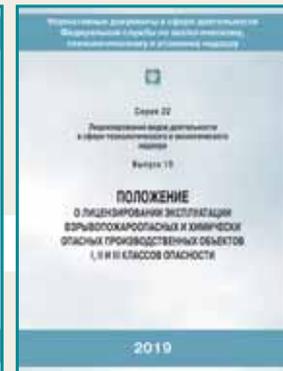


Нормативные документы и периодические издания Ростехнадзора можно заказать по интернету.

Интернет-магазин shop.safety.ru

Будем рады сотрудничеству!

По всем вопросам обращайтесь:
тел/факс: **(495) 620-47-53**.
E-mail: **shop@safety.ru**



Реклама



СУРКОВ
Александр Васильевич

8 апреля 2019 г. на 85-м году ушел из жизни после продолжительной болезни старейший работник Госгортехнадзора СССР, доктор технических наук, действительный член-корреспондент Академии горных наук, начальник Кузнецкого управления Госгортехнадзора России в отставке Александр Васильевич Сурков.

Александр Васильевич родился 11 ноября 1934 г. в с. Бобровка Сузунского р-на Новосибирской обл. Получив высшее техническое образование, в 1957 г. начал трудовой путь заместителем начальника участка вентиляции на шахте «Южная» (г. Березовский Кемеровской обл.), затем был директором этой шахты. С 1975 по 1979 г. трудился председателем исполнительного комитета Березовского городского совета народных депутатов, с 1979 по 1987 г. — первый секретарь Березовского горкома КПСС, с 1987 по 2001 г. возглавлял Кузнецкое управление Госгортехнадзора России. С 2001 г. после выхода в отставку трудился генеральным директором в экспертном центре по промышленной безопасности.

Александр Васильевич — автор 8 изобретений, более 60 научных работ, в том числе 12 монографий и брошюр, посвященных вопросам геомеханики горных пород, предупреждению взрывов метана и угольной пыли, внезапных выбросов угля и газа, рациональному выбору способов крепления горных выработок.

Высокий профессионализм, требовательность, целеустремленность, ответственное отношение к делу снискали ему авторитет и заслуженное уважение коллег, руководителей подконтрольных предприятий и органов исполнительной власти.

За многолетний добросовестный труд А.В. Сурков награжден знаками «Шахтерская слава» трех степеней, медалями «За особый вклад в развитие Кузбасса» трех степеней, почетным знаком имени В.Н. Татищева «За пользу Отечеству», знаками «Заслуженный шахтер» и «Почетный работник топливно-энергетического комплекса».

Работники и ветераны Сибирского управления Ростехнадзора выражают искренние соболезнования родным и близким Александра Васильевича. Светлая память о нем надолго сохранится в наших сердцах.