

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.831.24.0010

О.Е. Хоменко, канд. тех. наук, доц.

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: HomenkoO@nmu.org.ua

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД

O.Ye. Khomenko, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: HomenkoO@nmu.org.ua

IMPLEMENTATION OF ENERGY METHOD IN STUDY OF ZONAL DISINTEGRATION OF ROCKS

Цель. Создание одного из синергетических методов исследования – энергетического, корректно описывающего феномен зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок при освоении запасов руд и оценки эффективности использования существующих технологий по их добыче.

Методика. Разработана аналитическая модель термодинамических процессов формирования зональной дезинтеграции массива вокруг подготовительных выработок. Смоделированы основные технические параметры: распределение радиальных и касательных напряжений, оставшихся после преобразования потенциальной энергии в зонах термодинамического равновесия, общее напряжение от действия факторов различной интенсивности: напряженность, температура, плотность, намагниченность, обводненность, газообильность), а также возникновение областей деформации массива в зонах термодинамического дисбаланса энергии.

Результаты. Обоснован выбор синергетического подхода при выполнении исследований. Составлена классификация методов исследования напряженно-деформированного состояния горных пород. Выполнен анализ широко применяемых теоретических методов моделирования и проанализированы их преимущества и недостатки. Раскрыта эффективность использования теорий феноменологической прочности для выявления областей массива, подвергающихся разрушению. Показаны основные этапы и взаимосвязи при моделировании зональной дезинтеграции пород с помощью энтропийного, термодинамического и энергетического методов исследования, смоделирована динамика формирования энергетических зон вокруг подготовительных выработок для рудных шахт Украины.

Научная новизна. Научная новизна предложенного в работе метода – адекватное описание феномена зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок, признанного мировой исследовательской общественностью одной из сложных научных проблем, которая не поддается описанию на базе современных представлений физики.

Практическая значимость. Создание энергетического метода исследования, который позволяет определять форму и размеры зон термодинамического баланса энергии, условия перехода энергетических зон в состояние дисбаланса и количество энергетических зон в предохранительной капсуле, которую формирует массив вокруг выработок.

Ключевые слова: добыча руд, зональная дезинтеграция пород, синергетические методы исследования

Постановка проблемы. Мировые запасы железа (20%), марганца (42%) и урана (4%) выводят Украину на соответствующие 1, 2 и 10 места в международном рейтинге обладателей рудных полезных ископаемых. В свою очередь, подобные значительные запасы стратегических полезных ископаемых определяют промышленный и энергетический суверенитет страны на далекую перспективу. Однако доли мирового объема добычи занимают более низкие позиции по железу (5%), марганцу (25%), урану (1%) и

определяют соответствующие 7, 1 и 10 места, которые непосредственно связаны с уровнем используемых технологий при подземной разработке урановых (100%), железо- и марганцеворудных (60%) месторождений Украины.

Выделение нерешенной проблемы. Современные научные и производственные представления, на которых базируется большинство украинских технологий разработки рудных месторождений, обеспечивают устойчивость горных выработок, исходя из двух основных принципов. Первый – противодействие крепи разрушению вмещающего массива за счет

изменения видов крепей, параметров установки и условий их эксплуатации. Второй – уравнивание устойчивости массива с параметрами горных выработок путем изменения их размеров, форм и трасс заложения. Усложнение горнотехнических условий, связанных с ростом добычи рудных полезных ископаемых, до настоящего времени вызывало адекватное изменение конструкций крепей и технологических параметров систем разработки лишь с целью минимизации затрат. Проблема использования энергии объемного сжатия пород, как основного ресурса в повышении эффективности эксплуатации горных выработок, качества их крепления и поддержания, остается открытой.

Разработкой ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых с исследованием свойств горных пород занималось большое число исследователей из научно-исследовательских, проектно-конструкторских и высших учебных заведений Украины и мира. Этим вопросам посвящены отечественные работы, выполненные в ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины А.Н. Зориным, В.Г. Колесниковым, В.В. Виноградовым; в НГУ – М.М. Протодяконовым, А.Н. Динником, С.Г. Борисенко, А.В. Савостьяновым, В.И. Бузило, В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевской, Ю.М. Халимендиком; в КНУ – Г.М. Малаховым, Ю.П. Капленко, В.Ф. Лавриненко, Б.С. Андреевим, Е.И. Логачевым; в ГП „НИГРИ“ И.Д. Ривкиным, В.В. Цариковским, В.И. Никонцом и другими, а также за рубежом: в Германии – Шульцом, В. Риттером, Ф. Энгессером, В. Тромпетером, Г. Манцелем; Австрии – О. Каммерелем, А. Леоном; Швейцарии – А. Геймом; Франции – Дж. Талобром, А. Фейодем; Англии – Н. Хастом; России – Ф. Левинсон-Лесингом, А. Зайцевым, Дж. Спелдингом, Р. Феннером, В.Д. Слесаревым, Р. Квапилом; Киргизии – С.Г. Авершиным и др. В подавляющем большинстве работ отечественные и зарубежные исследователи учитывали изменения напряженности горных пород по степени их влияния на технологические параметры крепей выработок и систем разработки. Однако отсутствие системного подхода в исследовании процессов преобразования энергии горных пород при их разработке не позволило как описать феномен зональной

дезинтеграции горных пород, так и использовать его в качестве нового критерия ресурсосбережения и значительного повышения уровня эффективности производства в сложных горнотехнических условиях разработки отечественных и зарубежных месторождений.

При этом разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий, основанных на комплексном использовании потенциала горного давления, повышает конкурентоспособность отечественного урано-, железо- и марганцеворудного сырья Украины на рынках Европы и Азии. Помимо этого, на пути к энергетическому суверенитету Украины, за счет указанного ресурса, открывается дополнительная возможность создания основополагающих элементов собственного ядерно-топливного цикла, в котором, на фоне недостаточного государственного финансирования, задача ресурсосбережения является не просто актуальной, а имеет стратегическое значение [1].

Анализ последних исследований. Анализ западного типа рациональности мышления показывает, что в течение последних 2,5 тыс. лет в рамках европейской культуры человеческий разум (мышление) трансформировался дважды. В античную эпоху сформировался „созерцающий разум“, в новое время он сменился „директивным разумом“. Со второй половины XX века происходит радикальная смена типов рациональности в мышлении. Буквально на наших глазах формируется „синергетический разум“ (табл. 1). Наиболее осязаем этот процесс в области методологии, где тот или иной тип мышления предстает как бы в рафинированном виде. Научный аппарат синергетики оказался весьма гибким и удобным для описания многих проблем, стоящих перед фундаментальными и прикладными науками. Синергетика разрушает многие привычные представления и поражает необычными подходами и моделями, которые раскрывают принципы и закономерности протекающих процессов нелинейного и самоорганизующегося роста. С использованием синергетического подхода в исследовании и развитии термодинамических, энтропийных и энергетических методов моделирования открывается возможность адекватного описания горных ударов, внезапных выбросов газа, прорывов воды и других процессов перехода вещества на новые энергетические уровни [2].

Таблица 1

Эволюция формирования синергетического мышления у исследователей

Эпоха (период)	Тип мышления исследователей	Уровень методологического поиска	Реализуемый методологический подход	Вид исследуемых систем
Античная (VIII в. до н.э.)	Интуитивный	Созерцающий	Прагматический	Явные
Новое время (середина XVII в.)	Одноуровневый	Директивный	Детерминированный	Равновесные
Современная (конец XX в.)	Многоуровневый	Синергетический	Эволюционирующий	Неравновесные

Парадоксальность явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок заключается в том, что оно противоречит представлени-

ям классической механики горных пород о состоянии массивов, согласно которым невозможно движение фронта предельного деформирования от контура

выработки вглубь массива с образованием зон упругого, упругопластического и пластического состояний. Это инициировало появление гипотез, отвергающих физическую реальность данного явления на протяжении 20 лет с момента открытия в 1972 г. В 80-х гг. активно предлагались гипотезы и математические модели на основе механики сыпучих, сплошных и дискретных сред. Принципиальным недостатком исследований этого периода было абстрагирование от истинной структуры вещества и отсутствие учета протекающих физических процессов. Для устранения этих недостатков, начиная с 90-х гг., активно разрабатывались модели, учитывающие структуру массива

методами мезомеханики а также гипотезы, основанные на закономерностях периодического горного давления, автоволновых процессов, кластеризации вещества на макро- и наноровнях, поверхностного натяжения жидкостей, образования фракталов, самоогласованного поля, градации „темной энергии“ в „темной материи“ и т.п. Безуспешные попытки описания физики этого явления как с использованием методов механики, так и новых методов горной науки, еще более повысили необходимость развития синергетических методов исследования, отвечающих современным представлениям о взаимодействии материи и энергии в природе (табл. 2).

Таблица 2

Классификация методов исследования напряженно-деформированного состояния горных пород

Класс	Группа	Вид
I Натурные (промышленные)	Визуальные	Наблюдения и замеры
	Маркшейдерские	Маркшейдерские съемки
	Механические (инструментальные)	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
	Численные	Граничных разностей, граничных элементов, конечных элементов
	Синергетические	Термодинамические, энтропийные, энергетические

Выделение нерешенной ранее части общей проблемы. Метод конечных элементов, который сегодня получил широкое распространение, изначально разрабатывался для определения прочности известных конструкций (жилые здания, промышленные сооружения, детали машин) с заданными свойствами материала (бетон, металл, железобетон). Моделирование напряженности горных пород является обратной задачей, в которой отсутствует достоверная информация об их свойствах, точных размерах выработок при непрерывном протекании процессов деформирования массива. При исследовании методами механики, на основных положениях которой базируются все численные методы, на контуре выработок получают равные нулю радиальные и максимальные тангенциальные напряжения. С удалением вглубь от обнажения массива радиальные напряжения увеличиваются, а тангенциальные уменьшаются. На расстоянии, в среднем, трех радиусов выработки напряжения становятся равными нетронутому массиву. Концентрации напряжений в зоне опорного давления, на расстоянии, большем трех

радиусов выработки, при моделировании методами механики не выявлено [3].

Помимо этого, результаты моделирования с помощью методов механики оцениваются по критерию прочности, выбор которого производят из множества теорий феноменологической прочности. Попытки комплексного учета количественных и качественных характеристик массива приводили к созданию новых программных модулей для решения задач в упругопластичной и объемной постановках, что влекло применение сверхмощных компьютеров. Невзирая на все доработки, существующие численные методы и дополняющие их критерии прочности не позволяют точно определить границы зон разряжения и концентрации напряжений, формирующиеся вокруг горных выработок, что, в свою очередь, ставит под сомнение достоверность результатов в целом [4].

Термодинамический метод имеет ряд преимуществ перед численными методами по причине его создания специально для моделирования технологических параметров разработки рудных месторожде-

ний. Он позволяет производить расчет начального напряженного состояния массива, физических свойств горных пород на заданной глубине, а не принимать среднестатистические значения в доверительных интервалах. Термодинамический метод показывает, что реально существующие радиальные и тангенциальные напряжения, по мере приближения к поверхности обнажения массива выработки, увеличиваются, и на ее контуре приобретают максимальные значения. Также отсутствует необходимость анализа, выбора и применения дополнительных критериев сравнения действующих напряжений с предельно допустимыми, что не приводит к искажению результатов моделирования. Главным недостатком метода является отсутствие возможности определения количественных и качественных показателей состояния массива за пределами зон разгрузки (разряджения напряжений). Исследование состояния массива в зонах концентрации напряжений, процессы перераспределения нагрузки от толщи подработанных пород, формирование картины уравнивания энергии и развитие зонального деформирования этим методом не предоставляется возможным [5].

Формулирование цели работы. Непосредственные наблюдения и измерения параметров разрушения контуров выработок в шахтах и рудниках свидетельствуют о том, что породы вблизи обнажений массива испытывают воздействие значительных напряжений, в результате чего разрушаются, образуются свод в кровле, пучение в почве и вывалы в боках выработок. Результаты измерений напряжений различными методами не согласуются с известными положениями геомеханики. Наличие больших по абсолютному значению напряжений непосредственно у обнажений массива выработки показывает только термодинамика. Специалисты по геомеханике и термодинамике имеют противоположные точки зрения на одни и те же явления, что подтверждается оценкой напряженного состояния массива вокруг выработок обоими указанными методами. Выходом из сложившейся ситуации является разработка синергетических методов исследования, одним из которых является энергетический метод, который, корректно описывая явление зональной дезинтеграции пород, раскрывает реальную картину поведения массива вокруг горных выработок (рис. 1).



Рис. 1. Логическая схема реализации энтропийного, термодинамического и энергетического методов

Изложение основного материала. Сущность предложенного автором энергетического метода, который является логическим продолжением энтропийного и термодинамических методов, следующая. Согласно первому закону термодинамики, снижение количества потенциальной энергии в зоне разряджения равно приращению такого же количества энергии в зонах концентрации. Разряджение и концентрация напряжений описываются категориями конвергенции и дивергенции. Уравнивание процессов конвергенции и дивергенции, активно развивающихся вокруг горных выработок, формирует зоны термодинамического

баланса. Определяющими техническими параметрами этих зон являются параметры прилегающей к выработке зоны, которая, в свою очередь, зависит от параметров самой выработки, то есть размеров, формы, прочности пород, глубины заложения и т.д. Размеры и форма приконтурной зоны являются базовыми параметрами для дальнейшего развития процессов зональной дезинтеграции в прилегающем массиве горных пород. Внутри каждой из зон термодинамического баланса активно развиваются процессы дивергенции и конвергенции, которые концентрируют потенциальную энергию массива и уравнивают

термодинамические параметры нарушенного выработкой массива. Состояние горных пород в этих зонах характеризуется более высокими градиентами интенсивности напряжений, температур, плотности, намаг-

ничности по сравнению с нетронутым массивом. Условия, описывающие состояние массива в энергетических зонах, отражены в расчетной схеме и результатах моделирования, которые представлены на рис. 2.

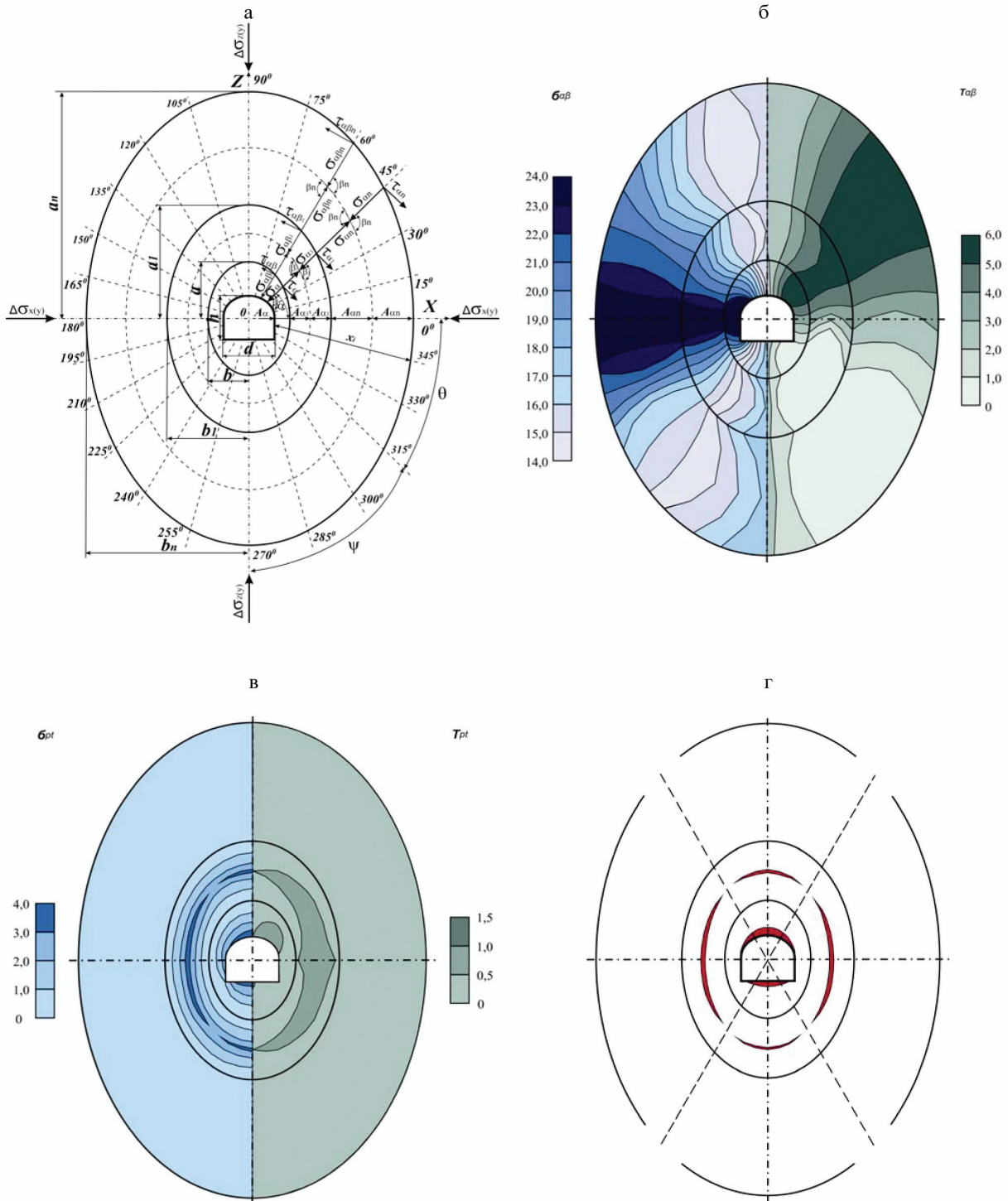


Рис. 2. Расчетная схема моделирования термодинамических процессов при формировании зональной дезинтеграции массива вокруг подготовительной выработки (а), распределение радиальных $\sigma_{r\theta}$ и тангенциальных $\tau_{\theta\theta}$ напряжений, сохранившихся после преобразования потенциальной энергии в зонах термодинамического баланса (б), распределение радиальных $\sigma_{r\theta}$ и тангенциальных $\tau_{\theta\theta}$ суммарных напряжений в зонах термодинамического баланса (в), формирование областей деформирования массива в зонах термодинамического дисбаланса (г), МПа

В расчетной схеме приняты следующие обозначения (рис. 2, а): h – высота подготовительной выработки (h_k – вертикальный пролет очистной камеры), м; d – ширина подготовительной выработки (l_{np} – горизонтальный пролет очистной камеры), м; 0 – центр выработки, начало системы координат XYZ ; a – вертикальная полуось приконтурной к выработке зоны термодинамического баланса, направленная вдоль оси OZ , м; a_1, a_n – вертикальные полуоси зон термодинамического баланса вдоль оси OZ , м; b – горизонтальная полуось приконтурной к выработке зоны термодинамического баланса, направленная вдоль оси OX , м; b_1, b_n – горизонтальные полуоси зон термодинамического баланса, направленные вдоль оси OX , м; $\Delta\sigma_{z(y)}$ и $\Delta\sigma_{x(y)}$ – вертикальные и горизонтальные потенциальные напряжения нетронутого массива пород, МПа; σ_α и τ_α – радиальные и тангенциальные напряжения нетронутого массива пород, МПа; $\sigma_{\alpha\beta}$ и $\tau_{\alpha\beta}$ – радиальные и тангенциальные остаточные потенциальные напряжения, МПа; α – угол между расчетной площадкой и осью OX , град; β – угол между направлением действия напряжений (σ_α и $\tau_\alpha, \sigma_{\alpha\beta}$ и $\tau_{\alpha\beta}$) и касательной в точке пересечения расчетной площадки с контуром выработки или границей зоны термодинамического баланса, град; x_i – текущая координата положения точки на расчетной площадке, м; $A_\alpha, A_{\alpha 1}, A_{\alpha n}$ – расстояния вдоль площадок от границы приконтурной зоны до контура выработки или границы зоны термодинамического баланса, м; θ – угол между главным нормальным напряжением и горизонтальной плоскостью, град; ψ – угол между главным нормальным напряжением и вертикальной плоскостью, град.

Принцип формирования энергетических зон вокруг выработок заключается в том, что величина напряжений, которые превышают предел прочности горных пород на сжатие (срез), переносятся на следующую зону, размеры и, соответственно, запас прочности которой значительно превышают зону, которая перешла в состояние термодинамического дисбаланса энергии. Помимо этого общее количество энергетических зон зависит от прочности массива пород и глубины горных работ. Деформирование пород в очередной зоне термодинамического дисбаланса приводит к образованию и перенесению упругой энергии на очередную зону термодинамического баланса. Формирование кольцевых областей деформированных пород в центре зон термодинамического дисбаланса происходит за счет активного развития радиально-направленных встречных процессов дивергенции и конвергенции. Формирование областей интенсивного деформирования начинается в вертикальной и горизонтальной плоскостях, где энергетические потоки формируют первоначальные линзообразные подобласти, которые далее преобразуются в кольцеобразные. Интенсивность формирования зон термодинамического баланса и переход их в состояние дисбаланса позволяет определить объем массива, вовлекаемого в формирование так называемой предохранительной капсулы, которую массив формирует

вокруг выработки, препятствуя разрушению значительного объема горных пород.

Определение параметров состояния пород вокруг подземной выработки, при дезинтеграции массива на зоны термодинамического баланса, производится по отношению вертикального $\Delta\sigma_{z(y)}$ и горизонтального $\Delta\sigma_{x(y)}$ потенциальных напряжений, которые определяют коэффициент формы зон $\lambda = \Delta\sigma_{z(y)} / \Delta\sigma_{x(y)}$ для глубины расположения точки O – начала системы координат ZXY . Массив горных пород, подвергающийся дезинтеграции вокруг подготовительных выработок, представляет собой эллиптический цилиндр, а для очистных камер и замкнутых выработанных пространств – эллипсоид вращения.

Размеры вертикальной и горизонтальной полуосей зон термодинамического баланса определяются по системам взаимосвязанных уравнений, в которых размеры приконтурной зоны термодинамического баланса a, b и c являются базовыми, м

$$\begin{cases} a_1 = 0,5 (b\lambda^{-1} + a) \\ a_2 = 0,5 (2b\lambda^{-1} + 2a) \\ a_3 = 0,5 (3b_2\lambda^{-1} + 3a) \\ \dots\dots\dots \\ a_n = 0,5 (n - 1b\lambda^{-1} + n - 1a) \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} b_1 = a\lambda \\ b_2 = 2a\lambda \\ b_3 = 3a\lambda \\ \dots\dots\dots \\ b_{n-1} = n - 1a\lambda \end{cases} ; \begin{cases} c_1 = b_1 \\ c_2 = b_2 \\ c_3 = b_3 \\ \dots\dots\dots \\ c_n = b_{n-1} \end{cases} ,$$

где $a_1, a_2, a_3, a_n; b_1, b_2, b_3, b_n$ и c_1, c_2, c_3, c_n – размеры вертикальных и горизонтальных полуосей зон термодинамического баланса, которые формируются во вмещающем выработку массиве.

Начальные потенциальные напряжения сжатия от границы приконтурной и других зон термодинамического баланса (дисбаланса) к поверхности обнажения массива выработкой действуют вдоль расчетных площадок, составляющих с напряжением $\Delta\sigma_{x(y)}$ углы $0 < \alpha < 360^\circ$, определяют по зависимостям теории упругости (рис. 2, а). В результате высвобождения внутренней энергии массива возрастают радиальные σ_p и тангенциальные τ_p напряжения нетронутого массива для всех расчетных площадок, составляющих с направлением напряжения $\Delta\sigma_{z(y)}$ углы α , МПа

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= \sigma_{\alpha 1} = \sigma_{\alpha 2} = \sigma_{\alpha 3} = \sigma_{\alpha n} = \\ &= \Delta\sigma_{x(y)} \cos^2 \alpha + \Delta\sigma_{z(y)} \sin^2 \alpha, \\ \tau_\alpha &= \tau_{\alpha 1} = \tau_{\alpha 2} = \tau_{\alpha 3} = \tau_{\alpha n} = \\ &= 0,5 (\Delta\sigma_{x(y)} - \Delta\sigma_{z(y)}) \sin 2\alpha \end{aligned}$$

Значения остаточных потенциальных напряжений в окружающем выработку массиве, которые сохраняются после преобразования части потенциальной энергии, равны, МПа

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\alpha\beta} = (\sigma_{\alpha} \sin^2 \beta + \tau_{\alpha} \cos^2 \beta) \exp(-\nu x) \\ \sigma_{\alpha\beta 1} = (\sigma_{\alpha} \sin^2 \beta + \tau_{\alpha} \cos^2 \beta) \exp(-\nu x_1) \\ \sigma_{\alpha\beta 2} = (\sigma_{\alpha} \sin^2 \beta + \tau_{\alpha} \cos^2 \beta) \exp(-\nu x_2) \\ \sigma_{\alpha\beta 3} = (\sigma_{\alpha} \sin^2 \beta + \tau_{\alpha} \cos^2 \beta) \exp(-\nu x_3) \\ \dots \\ \sigma_{\alpha\beta n} = (\sigma_{\alpha} \sin^2 \beta + \tau_{\alpha} \cos^2 \beta) \exp(-\nu x_n) \end{array} \right\};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\alpha\beta} = (\sigma_{\alpha} \cos^2 \beta + \tau_{\alpha} \sin^2 \beta) \exp(-\nu x) \\ \tau_{\alpha\beta 1} = (\sigma_{\alpha} \cos^2 \beta + \tau_{\alpha} \sin^2 \beta) \exp(-\nu x_1) \\ \tau_{\alpha\beta 2} = (\sigma_{\alpha} \cos^2 \beta + \tau_{\alpha} \sin^2 \beta) \exp(-\nu x_2) \\ \tau_{\alpha\beta 3} = (\sigma_{\alpha} \cos^2 \beta + \tau_{\alpha} \sin^2 \beta) \exp(-\nu x_3) \\ \dots \\ \tau_{\alpha\beta n} = (\sigma_{\alpha} \cos^2 \beta + \tau_{\alpha} \sin^2 \beta) \exp(-\nu x_n) \end{array} \right\},$$

где x – текущая координата положения расчетной точки на площадке под углом α ($0 \leq x \leq A_x$), которая возрастает от границы приконтурной зоны к поверхности обнажения массива выработкой, а в зонах термодинамического баланса – от границ к их центрам. Приращение x принимается произвольным, но одинаковым для всех расчетных площадок в каждой зоне; ν – коэффициент поглощения упругих колебаний.

Далее с помощью программного продукта типа „Surfer“ или графических редакторов типа „Corel DPAW“, „Auto CAD“, „Компас“, „Adobe Photochop“ строят поперечное сечение выработки, контуры зон термодинамического баланса с полуосями a, a_1, a_2, a_3, a_n и b, b_1, b_2, b_3, b_n , согласно расчетной схемы, представленной на рис. 1, а. Из центра выработки проводят следы плоскостей, которые соответствуют углам $a \leq \alpha \leq 2\pi$ с направлением напряжения $\Delta\sigma_{x(y)}$ через $10 - 30^\circ$. Вдоль каждой из них, от границы последней зоны термодинамического баланса до контура выработки и последующей зоны, измеряют расстояния A_{α} и вносят в электронные таблицы „Microsoft Excel“ или программный продукт типа „Surfer“. Одновременно для каждой расчетной площадки определяют значения углов β , которые откладывают в точках пересечения касательных линий с контуром выработки или границами зон термодинамического баланса. По результатам расчетов строят поля остаточных потенциальных радиальных $\sigma_{\alpha\beta}$ и тангенциальных $\tau_{\alpha\beta}$ напряжений, сохранившихся после преобразования части потенциальной энергии в пределах зон термодинамического баланса (рис. 2, б).

С целью определения параметров влияния выработок на состояние вмещающего массива производили расчет для условий проведения одиночной подготовительной выработки. Исходными данными принималась площадь поперечного сечения подгото-

вительной выработки $S_{np}=10,5 \text{ м}^2$ ($h = 3 \text{ м}, d = 3,5 \text{ м}$), глубина ее заложения $H = 1200 \text{ м}$, прочность мартиновых руд 80 МПа . Размеры полуосей приконтурной и последующих зон термодинамического баланса, формирующиеся вокруг моделируемой выработки, имеют значения: $a = 3,98 \text{ м}; a_1 = 7,96 \text{ м}; a_2 = 11,93 \text{ м}; a_3 = 15,92 \text{ м}$ и $b = 2,81 \text{ м}; b_1 = 5,62 \text{ м}; b_2 = 8,43 \text{ м}; b_3 = 11,2 \text{ м}$ (рис. 2).

Установлено, что размеры зон термодинамического баланса, относительно приконтурной зоны или каждой последующей зоны относительно предыдущей, имеют фиксированные параметры для любой горной выработки независимо от ее формы, глубины заложения, физико-механических свойств массива. Для проверки выявленной закономерности был выполнен расчет условий заложения подготовительных и очистных выработок на глубинах от 0 до 3000 м при прочности руд и пород от 40 до 200 МПа, результаты которых подтвердили устойчивые верификационные зависимости, м

$$a = a_2 - a_1 = a_3 - a_2 = a_{n+1} - a_n; \quad (1)$$

$$b = b_2 - b_1 = b_3 - b_2 = b_{n+1} - b_n; \quad (2)$$

$$c = c_2 - c_1 = c_3 - c_2 = c_{n+1} - c_n. \quad (3)$$

На границах зон термодинамического баланса, за счет интенсивного развития процессов растяжения, формируются области с минимальным потенциалом энергии массива, соответствующие значениям γH . По центру зон термодинамического баланса формируются области с повышенным энергетическим потенциалом за счет развития процессов сжатия массива. Эти процессы протекают во взаимно противоположных радиальных направлениях и реализуются под воздействием процессов конвергенции и дивергенции, формируя картину реальных напряжений в массиве. В первом случае их векторы разнонаправлены, а во втором – направлены встречно. Значения реальных радиальных σ_p и тангенциальных τ_p напряжений, которые действуют в массиве вокруг горных выработок в результате преобразования потенциальной энергии, определяются как разница между потенциальными напряжениями, характерными для ненарушенного массива, и остаточными потенциальными напряжениями в точках с координатой x_i вдоль каждой расчетной площадки соответственно, МПа

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_p = \sigma_{\alpha} - \sigma_{\alpha\beta} \\ \sigma_{p1} = \sigma_{\alpha 1} - \sigma_{\alpha\beta 1} \\ \sigma_{p2} = \sigma_{\alpha 2} - \sigma_{\alpha\beta 2} \\ \sigma_{p3} = \sigma_{\alpha 3} - \sigma_{\alpha\beta 3} \\ \dots \\ \sigma_{pn} = \sigma_{\alpha n} - \sigma_{\alpha\beta n} \end{array} \right\}; \quad \left\{ \begin{array}{l} \tau_p = \tau_{\alpha} - \tau_{\alpha\beta} \\ \tau_{p1} = \tau_{\alpha 1} - \tau_{\alpha\beta 1} \\ \tau_{p2} = \tau_{\alpha 2} - \tau_{\alpha\beta 2} \\ \tau_{p3} = \tau_{\alpha 3} - \tau_{\alpha\beta 3} \\ \dots \\ \tau_{pn} = \tau_{\alpha n} - \tau_{\alpha\beta n} \end{array} \right\}.$$

По значениям σ_p и τ_p устанавливают величины упругих радиальных ϵ_{σ} и тангенциальных ϵ_{τ} деформаций породы в пределах всех зон термодинамического баланса, МПа

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{\sigma} = \sigma_p / E \\ \varepsilon_{\sigma 1} = \sigma_{p1} / E \\ \varepsilon_{\sigma 2} = \sigma_{p2} / E \\ \varepsilon_{\sigma 3} = \sigma_{p3} / E \\ \dots \\ \varepsilon_{\sigma n} = \sigma_{pn} / E \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{\tau} = \tau_p / E \\ \varepsilon_{\tau 1} = \tau_{p1} / E \\ \varepsilon_{\tau 2} = \tau_{p2} / E \\ \varepsilon_{\tau 3} = \tau_{p3} / E \\ \dots \\ \varepsilon_{\tau n} = \tau_{pn} / E \end{array} \right.$$

где ε_{σ} – деформация растяжения; ε_{τ} – деформация сжатия.

Суммарные значения механических (σ_p и τ_p), температурных (σ_i и τ_i) напряжений, а также других факторов интенсивности – плотности, намагниченности, водообильности, газообильности (σ_i и τ_i) на всех расчетных площадках и заданных точках x_i соответственно, МПа

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{pt} = \sigma_p + \sigma_i + \sigma_{i1} \\ \sigma_{pt1} = \sigma_{p1} + \sigma_{i1} + \sigma_{i1} \\ \sigma_{pt2} = \sigma_{p2} + \sigma_{i2} + \sigma_{i2} \\ \sigma_{pt3} = \sigma_{p3} + \sigma_{i3} + \sigma_{i3} \\ \dots \\ \sigma_{ptn} = \sigma_{pn} + \sigma_{in} + \sigma_{in} \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} \tau_{pt} = \tau_p + \tau_i + \tau_i \\ \tau_{pt1} = \tau_{p1} + \tau_{i1} + \tau_{i1} \\ \tau_{pt2} = \tau_{p2} + \tau_{i2} + \tau_{i2} \\ \tau_{pt3} = \tau_{p3} + \tau_{i3} + \tau_{i3} \\ \dots \\ \tau_{ptn} = \tau_{pn} + \tau_{in} + \tau_{in} \end{array} \right.$$

По результатам расчетов строят поля напряжений σ_{pt} и τ_{pt} в пределах зон термодинамического баланса σ_{pm} и τ_{pm} (рис. 2, в). Механические напряжения от давления налегающей толщи для подготовительных выработок составляют 1,5–5,0% σ_{pt} , а для очистных и выработанных пространств больших размеров стремятся к пределу прочности пород. Количество зон термодинамического баланса зависит от прочности пород и глубины горных работ, которые влияют на уровень концентрации напряжений, температур, плотности и других факторов интенсивности. При достижении предела прочности пород в массиве зоны термодинамического баланса, она перестает воспринимать полную нагрузку от объемного сжатия вмещающих пород и переходит в состояние дисбаланса энергии. По этой причине вокруг потерявшей жесткость зоны термодинамического дисбаланса массив формирует зону баланса энергии, но уже с увеличенными размерами, согласно зависимостям (1–3). Деформирование массива происходит в областях, где реальные напряжения, действующие в массиве зоны термодинамического дисбаланса, превышают предельно допустимые на растяжение или сдвиг. Разницу между ними отображает коэффициент запаса прочности n . Деформирование массива определяется по пределам прочности горной породы на растяжение σ_g и сдвиг τ_g , МПа

$$\sigma_{pg} = \sigma_{pg1} = \sigma_{pg2} = \sigma_{pg3} = \sigma_{pgn} = 0,13K_{co}\sigma_{сж};$$

$$\tau_g = \tau_{g1} = \tau_{g2} = \tau_{g3} = \tau_{gn} = 0,15K_{co}\sigma_{сж},$$

где K_{co} – коэффициент структурного ослабления массива, зависящий от степени трещиноватости горных пород (0,2–0,33 по В.В. Ржевскому).

Для выявления областей деформирования массива на всех расчетных площадках определяют точки, в которых $n_p = 1$ и $n_{\tau} = 1$. Эти точки оконтуривают области массива у контура подготовительных выработок, очистных камер и выработанных пространств, а также кольцевые области внутри всех зон термодинамического дисбаланса (рис. 2, з). Деформирование пород в очередной зоне термодинамического дисбаланса приводит к формированию и перенесению нагрузки на новую зону термодинамического баланса и т.д. То есть для определения общего количества энергетических зон во вмещающем массиве необходимо мониторинг всех точек на расчетных площадках энергетических зон по условию противодействия массива растяжению и сдвигу, которые, соответственно, при $n_p \leq 1$ и $n_{\tau} \leq 1$ способствуют формированию новых зон, раз

$$\left\{ \begin{array}{l} n_p = \sigma_{pg} / \sigma_{pt} \leq 1 \\ n_{p1} = \sigma_{pg} / \sigma_{pt1} \leq 1 \\ n_{p2} = \sigma_{pg} / \sigma_{pt2} \leq 1 \\ n_{p3} = \sigma_{pg} / \sigma_{pt3} \leq 1 \\ \dots \\ n_{pn} = \sigma_{pg} / \sigma_{ptn} \leq 1 \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} n_{\tau} = \tau_g / \tau_{pt} \leq 1 \\ n_{\tau 1} = \tau_g / \tau_{pt1} \leq 1 \\ n_{\tau 2} = \tau_g / \tau_{pt2} \leq 1 \\ n_{\tau 3} = \tau_g / \tau_{pt3} \leq 1 \\ \dots \\ n_{\tau n} = \tau_g / \tau_{ptn} \leq 1 \end{array} \right.$$

Общее количество энергетических зон принимается как большее из двух значений, шт

$$N_1 = N_p + 1; N_2 = N_{\tau} + 1,$$

где N_p и N_{τ} порядковые номера зон, в которых не выполняется условие прочности на растяжение n_{pn} или сдвиг $n_{\tau n}$ соответственно.

Радиальное расширение и сжатие горной породы в направлении геометрического центра выработки реализуется в зонах термодинамического дисбаланса энергии, по центру которых происходит интенсивное деформирование с образованием постепенно замыкающихся концентрических областей. Формирование областей деформации массива приводят к потере жесткости зоны в целом, что провоцирует образование очередной зоны термодинамического баланса, имеющей увеличенную жесткость и несущую способность. В приконтурной зоне нет возможности достижения кольцевой жесткости по причине ее односторонности за счет наличия самой выработки. Это приводит к термодинамическому дисбалансу энергии (обрушение, вывалы, пучение). Перераспределение напряжений вокруг выработки прекращается после достижения прочности, при которой несущая способность вновь образованной зоны будет достаточной для изоляции внутри себя всех зон дисбаланса энергии и самой выработки от ее влияния на вмещающий массив пород. Процесс перераспределения энергии останавливается и образуется устойчивая, изолированная система, состоящая из зон термодинамического дисбаланса и баланса, которая называется предохранительной (изолирующей) капсулой.

Значения напряжений в замыкающей зоне термодинамического баланса определяются как разница между максимальными напряжениями, действующими в последней зоне термодинамического дисбаланса, и пределом прочности пород на растяжение и сдвиг. Количество энергии в виде суммарных напряжений, которое при потере жесткости переносится из одной зоны в другую, формируя при этом общий баланс жесткости напряжений капсулы составляет, МПа

$$\sigma_{pn} = \sigma_{pg} - \sigma_{pnn} > 0; \tau_{tn} = \tau_g - \tau_{pnn} > 0.$$

В соответствии с предложенным автором принципом формирования энергетических зон, то есть зон термодинамического баланса и дисбаланса энергии, научную ценность представляют обнаруженные закономерности динамики образования предохра-

тельных капсул в условиях проведения подготовительных выработок на шахтах Криворожского бассейна. Вместе с рудными районами Запорожской, Кировоградской и Полтавской областей Кривбасс составляет большую железорудную провинцию – Большой Кривой Рог.

Благодаря этому результаты моделирования применимы для большинства рудных шахт Украины, а обнаруженные зависимости позволяют прогнозировать поведение пород при проведении подготовительных выработок на глубинах до 3000 м. Оценить динамику перехода вмещающего массива горных пород на новые энергетические уровни, при изолировании полости выработок, возможно по количеству энергетических зон, которые формируются в пределах предохранительных капсул (табл. 3).

Таблица 3

Динамика формирования энергетических зон вокруг подготовительных выработок на рудных шахтах Украины

H, м	Прочность пород на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа										N, шт.	
	200	180	160	140	120	100	80	60	40			
Глубина заложения подготовительной выработки	400	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
	500	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	
	600	1	1	1	1	1	1	1	1	3	4	
	700	1	1	1	1	1	1	1	1	3		
	800	1	1	1	1	1	1	1	2	3		
	900	1	1	1	1	1	1	1	3	3		
	1000	1	1	1	1	1	1	1	3	3		
	1100	1	1	1	1	1	1	2	3	3		
	1200	1	1	1	1	1	1	3	3	4		
	1300	1	1	1	1	1	2	3	3	4		
	1400	1	1	1	1	1	2	3	3	4		
	1500	1	1	1	1	1	3	3	3	4		
	1600	1	1	1	1	2	3	3	3	4		
	1700	1	1	1	1	2	3	3	3	4		
	1800	1	1	1	1	3	3	3	4	4		
	1900	1	1	1	2	3	3	3	4	4		
	2000	1	1	1	2	3	3	3	4	4		
	2100	1	1	2	3	3	3	3	4	4		
	2200	1	1	2	3	3	3	3	4	4		
	2300	1	1	3	3	3	3	3	4	4		
2400	1	2	3	3	3	3	4	4	4			
2500	1	2	3	3	3	3	4	4	4			
2600	1	3	3	3	3	3	4	4	4			
2700	2	3	3	3	3	3	4	4	4			
2800	2	3	3	3	3	3	4	4	4			
2900	3	3	3	3	3	3	4	4	4			
3000	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5		

Общее количество энергетических зон

Выводы и перспективы развития направления. Полученные результаты исследования являются базовыми для разработки инновационных технологий использования энергии горного давления при производстве подготовительных, нарезных, буровзрывных и очистных работ на рудных шахтах Украины. Помимо этого, сформулированные автором

принципы и закономерности феноменального явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок позволяют использовать их в методических подходах при подготовке персонала для освоения тех же инновационных технологий, а также раскрыть перспективные направления методологических и научных исследований в будущем.

Список литературы / References

1. Хоменко О.Е. Управление энергией горных пород при подземной разработке руд [Текст] / Хоменко О.Е. // Горный журнал. Черные металлы. – 2010. – Специальный выпуск. – С. 41–43.

Khomenko, O.Ye. (2010), “Control of the energy of rocks in underground ore mining”, *Mining Journal. Ferrous metals*, Special Issue, pp. 41–43.

2. Синергетический подход в исследовании производственных процессов при добыче руд подземным способом [Текст] / [О.Е. Хоменко, В.В. Русских, М.В. Нетеча и др.], // Научный вестник НГУ. – Днепропетровск, 2004 – №7. – С. 3–5.

Khomenko, O.Ye. Russkikh, V.V., Netecha, M.V., Koponenko, M.N. and Dolgiy, A.A. (2004), “Synergetic approach in study of production processes in underground ore extraction”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.7, pp. 3–5.

3. Хоменко О.Е. Синергетика в управлении состоянием массива горных пород / О.Е. Хоменко, А.Б. Владыко // „Форум гірників“ Міжн. наук.-техн. конф. м. Дніпропетровськ: РВК НГУ. – 2007. – С. 67–71.

Khomenko, O.Ye. and Vladyko, A.B. (2007), “Synergetics in the management of rock mass state”, *Proc. of the International scientific conference “Forum of Mining Engineers”*, National Mining University, Dnipropetrovsk, pp. 67–71.

4. Хоменко О.Е. Синергетический подход к оценке прочностных свойств горных пород [Текст] / Хоменко О.Е. // Научный вестник НГУ. – Днепропетровск, 2007. – №7. – С. 29–31.

Khomenko, O.Ye. (2007), “Synergetic approach in assessment of rock strength properties”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no. 7, pp. 29–31.

5. Лавриненко В.Ф. Преобразование энергии и формирование полей напряжений в массиве вокруг выработок [Текст] / Лавриненко В.Ф. // Изв. вузов. Горный журнал – 1986. – № 4. – С. 5 – 11.

Lavrinenko, V.F. (1986), “Energy transformation and formation of stress fields in rocks around excavations”, *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, no. 4, pp. 5–11.

Мета. Створити один із синергетичних методів дослідження – енергетичний, що коректно описує феномен зональної дезінтеграції гірських порід навколо підземних виробок під час освоєння запасів руд і оцінки ефективності застосування існуючих технологій їх видобування.

Методика. Розроблено аналітичну модель термодинамічних процесів формування зональної дезінтеграції масиву навколо підготовчих виробок. Змодельовано основні технічні параметри: розподіл радіальних і дотичних напружень, що залишилися після перетворення потенційної енергії в зонах термодинамічної рівноваги, загальна напруга від дії різних факторів інтенсивності (щільність, намагніченість, обводненість, вміст газів), а також виникнення областей деформації масиву в зонах термодинамічного дисбалансу енергії.

Результати. Обґрунтовано вибір синергетичного підходу при виконанні досліджень. Складено класифікацію методів дослідження напружено-деформованого

стану гірських порід. Виконано аналіз широко застосовуваних теоретичних методів моделювання та проаналізовано їх переваги та недоліки. Розкрито ефективність використання теорій феноменологічної міцності для виявлення областей масиву, що піддаються руйнуванню. Показано основні етапи та взаємозв'язки при моделюванні зональної дезінтеграції порід за допомогою ентропійного, термодинамічного та енергетичного методів дослідження, і змодельовано динаміку формування енергетичних зон навколо підготовчих виробок для рудних шахт України.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в розробці методу, що адекватно описує феномен зональної дезінтеграції гірських порід навколо підземних виробок, визнаний світовою дослідницькою спільнотою однією з найскладніших наукових проблем, що не піддається опису на базі сучасних уявлень фізики.

Практична значимість. Створення енергетичного методу дослідження, що здатен визначити форму і розміри зон термодинамічного балансу, умови переходу енергетичних зон до стану дисбалансу та кількість таких зон у запобіжній капсулі, яку формує масив навколо виробок.

Ключові слова: видобування руд, зональна дезінтеграція порід, синергетичні методи дослідження

Purpose. To develop one of synergetic research methods, so called ‘energy method’ which describes correctly the phenomenon of rock zonal disintegration around underground excavations for ore reserves mining and to estimate the effectiveness of existing ore extraction technologies.

Methodology. Analytical model for simulation of thermodynamic processes of formation of zonal disintegration of massif around the development workings has been created. Main technical parameters, such as distribution of radial and tangential stresses remaining after the conversion of potential energy in the areas of thermodynamic balance, the total stress from the action of the variety of intensity factors (density, magnetization, water abundance, gas content), and appearing of massif deformation areas in zones of thermodynamic energy imbalance have been modeled.

Findings. The choosing of the synergetic approach for the research has been substantiated. The classification of methods studying the stress-strain state of rocks has been fulfilled. Advantages and disadvantages of widely used theoretical modeling methods have been analyzed. The efficiency of phenomenological strength theories for the identification of massif areas exposed to destruction has been proved. The main stages and correlations in the process of modeling of rock zonal disintegration with the entropy, thermodynamic and thermal methods have been considered, and the dynamics of energy zones formation around development workings for Ukrainian ore mines has been modeled.

Originality. The method describing adequately the phenomenon of rock zonal disintegration around underground workings, recognized by international scientific community like one of the most difficult scientific problems which cannot be described on the base of existing concepts of physics, has been developed.