

## ФЕНОМЕН ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

О.Е. Хоменко, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Украина

Выполнен анализ парадоксальности явления зональной дезинтеграции горных пород, которое проявляется во всех известных формах деформирования массива. Создана аналитическая модель, корректно описывающая феномен с использованием синергетического подхода в исследовании, применения термодинамического, усовершенствованного энтропийного и разработанного энергетического методов исследования. Установлены зависимости размеров и формы энергетических зон, их количества, условий перехода в состояние дисбаланса, образования кольцеобразных областей деформирования массива и определена динамика формирования зон, входящих в предохранительную капсулу, которую формирует массив вокруг подземных выработок.

**Введение.** Зональная дезинтеграция массива горных пород вокруг подземных выработок это физическое явление, которое активно проявляется вокруг полостей, расположенных на глубине, где гравитационная составляющая напряжений близка к пределу прочности пород на одноосное сжатие либо превышает его. Это приводит к образованию кольцеобразных чередующихся зон разгруженных и разрушенных пород. Явление зональной дезинтеграции пород было открыто в золоторудной шахте Южной Африки (1972), в СССР (1978, 1985), в Украине (2002, 2006) и т.д. Различные аспекты явления изучали более 100 авторов из Украины, России, Казахстана, Польши, Франции, Канады, которые опубликовали несколько сотен научных трудов (рис. 1).

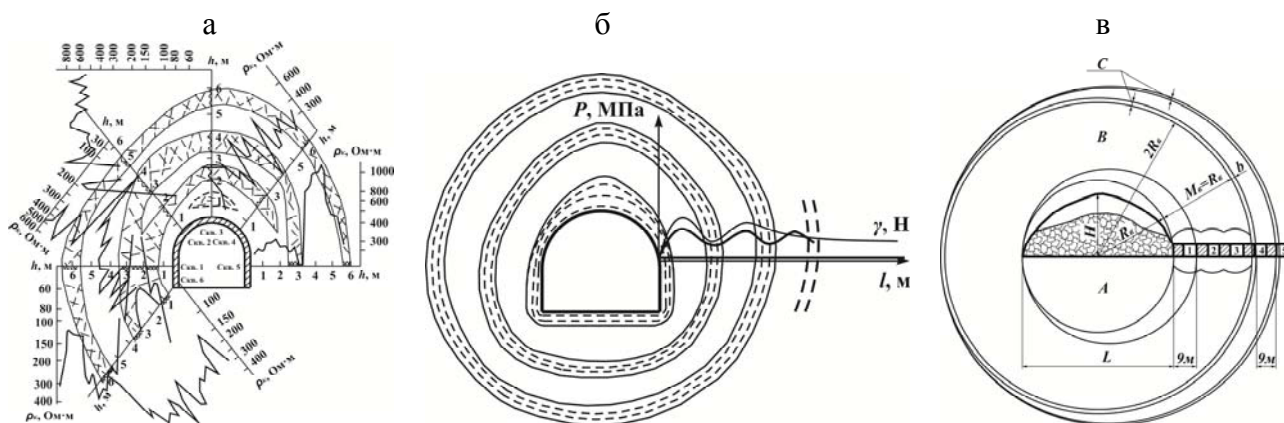


Рис. 1 Выявление зональной дезинтеграции горных пород по результатам промышленных опытов, выполненных исследователями Украины (а), России (б), Казахстана (в)

**Состояние вопроса.** Феномен данного явления связан с многообразием форм его проявления. Так, например, в упругих прочных породах (граниты, амфиболиты, кварциты) на глубинах свыше 1600 м (Кривбасс) интенсивно формируются зоны разнонапряженных пород, которые сопровождаются образованием кольцевидных областей повышенной трещиноватости. В упруго-пластичных породах (маргитовые, гетитовые руды) на глубинах свыше 900 м (Кривбасс) кольцевидные зоны пониженных напряжений разделяются интенсивно смятыми рудами. В пластичных породах (марганцевые руды, глины, суглинки) на глубинах до 100 м (Никополь-Марганецкий бассейн) активно развиваются процессы зональной конвергенции и дивергенции. Прочные упругие породы накапливают намного больше потенциальной энергии, чем слабые, в которых при росте давления активно проявляются пластические деформации. Чем большее высвобождается энергия, тем динамичнее протекают процессы деформирования породы и тяжелее их последствия. При горных ударах освобождение пород от напряжения сопровождается мгновенным переходом аккумулированной энергии в работу с сейсмическим эффектом и воз-

душным ударом. Непрочные пластичные породы плавно заполняют полость выработки, уменьшая площадь поперечного сечения, тем самым противодействуя горным работам [1].

**Выделение нерешенной проблемы.** Парадоксальность явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок заключается в том, что оно противоречит представлениям классической механики горных пород о состоянии массивов, согласно которым невозможно движение фронта запредельного 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 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 наноуровнях, поверхностного натяжения жидкостей, образования фракталов, самосогласованного 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.

**Основной материал.** 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 этот процесс ощутим 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 протекания процессов нелинейного и самоорганизующегося роста. С использованием синергетического подхода в исследовании и развитии новых методов моделирования, открывается возможность адекватного описания горных ударов, внезапных выбросов газа, прорывов воды и других процессов перехода вещества на новые энергетические уровни.

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

Для оценки существующей теоретической базы был выполнен анализ теорий о действии сил вокруг подземных горных выработок и составлена классификация (табл. 2). В классификацию не включены исследователи более раннего периода, которые проклассифицировали горные породы по технологическим признакам, а также исследователи, которые продолжали и расширили основополагающие гипотезы, не внося существенных изменений в аналитический аппарат.

Классификация теорий о действии сил вокруг подземных горных выработок

Таблица 2

Класс	Группа	Исследователь		Научный результат	Основной недостаток	
		ФИО	Страна			Год
I. Сил	1. Свода	Шульц	Германия	1867	Размеры и форма свода естественного равновесия	Достоверность расчетов до 400 м
		А. Гейм	Швейцария	1878	Уравнения равновесия упругих деформаций	Нет учета бокового распора пород
		Дж. Талобр	Франция	1879	Картина зон разгрузки-концентрации напряжений	Отсутствие расчета параметров зон
		В. Риттер		1879	Уравнения давления на крепь выработки	Не учтено давление налегающих пород
		Ф. Энгессер	Германия	1882	Уравнение давления на крепь для сыпучей среды	Узкая область применения расчетов
		В. Тромпетер		1899	Картина зон пониженного и повышенного давлений	Нет описания физических процессов
		О. Коммерель	Австрия	1912	Параметры свода устойчивого равновесия	Расчет выполнен по натурным данным
		Шульц	Германия	1867	Допустимая длина обнажения кровли выработки	Расчет для непосредственной кровли
		Н. Фейоль	Франция	1885	Картина расслоения, прогибания, разрыхления	Отсутствие математического аппарата
		Г. Манцель	Германия	1894	Картина давления от налегающей толщи пород	Напряжения на контуре выработки = 0
II. Деформации	1. Разрушения	А. Леон	Австрия		Модель расчета напряжений в массиве пород	Достоверность расчетов до 200 м
		М.М. Протодьяконов	Украина	1908	Модель давления пород на крепь выработки	Давление на крепь выработки = 0
		Ф. Левинсон-Лесинг, А. Зайцев	Россия	1915	Зависимости уровня напряженности массива от формы выработки	Не рассчитывается нагрузка на крепь
		А.Н. Динник	Украина	1925	Расчет напряжений в нетронутом массиве пород	Отсутствие расчетного аппарата
		Дж. Стелдинг		1937	Картина разгрузки начальных напряжений	Отсутствие описания физпроцессов
		Р. Феннер	Россия	1938	Деформации в зонах разгрузки-концентрации	Устойчивость выработки по ее длине
		В.Д. Слесарев		1948	Модель устойчивых эквивалентных пролетов	Нет математического аппарата
		С.Г. Авершин	Киргизия	1955	Картина действия сил опорного давления	Отсутствие описания физпроцессов
		Р. Квапил	Россия	1958	Картина зон разгрузки-концентрации напряжений	Отсутствие научного обоснования
		Н. Хаст	Англия	1967	Замеры упругих деформаций в массиве пород	Эмпирические зависимости по данным натурных исследований
III. Состояния	1. Термодинамические	А.В. Савостьянов		1974	Теория разрушения слоистого массива и формирования зон опорного давления	Нет научного описания процессов в зонах концентрации напряжений
		В.Ф. Лавриненко	Украина	1975	Теория формирования напряжений в ненарушенном и нарушенном массивах горных пород	Нет единого программного продукта по определению параметров
		Теория перераспределения напряжений в нетронутом массиве горных пород				
		О.Е. Хоменко		2012	Теория зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок	

Анализ научных результатов и основных недостатков существующих теорий показал, что явление зональной напряженности массива было выявлено еще в 1899 году В. Тромпетером и до настоящего времени не было системно исследовано. Классификация показала бессистемность выполненных исследований по определению количества, формы, размеров зон разгрузки-концентрации напряжений, областей деформации массива, условий их образования и др. Известные научные теории не согласуются между собой, а некоторые не соответствуют познанным законам природы. Ни одна из них, за исключением термодинамической, не только не дает ответа о начальном напряженном состоянии массива, но даже не сформировала определенного подхода к его адекватному определению.

Сегодня явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок признано исследовательской общественностью как одна из сложнейших научных проблем, не поддающейся описанию на базе современных представлений физики. Это первое физическое явление, для объяснения которого требуются философское осмысление и разработка новых методов с привлечением аппарата синергетики и квантовой механики. Диалектическая сущность феномена раскрывается при аналитическом исследовании его на мега-, макро- и микроструктурных уровнях материальных тел и окружающих их физических полей. Именно таким образом явление зональной дезинтеграции горных пород, как непознанный феномен физического мира может быть представлено адекватной теорией и возможно только при использовании системных и синергетических методологических подходов; термодинамических, энтропийных и энергетических методов исследований, базирующихся на современных принципах взаимодействия материи и энергии (табл. 3) [2].

Таблица 3

Классификация методов исследования напряженно-деформированного состояния горных пород

Класс	Группа	Вид
I Нагурные (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

Использование основополагающих принципов дезинтеграции материи и энергии – сохранения, обратимости, энтропийности, самофокусировки, хаоса и порядка, симметрии, растрово-интегральных превращений, дальнего действия и суперпозиций позволило спроектировать и реализовать основные этапы моделирования – определение исходных данных, построение расчетной схемы, выполнение исследований, проверка и использование резуль-

татов в эффективных технологических решениях управления энергетическими потоками во вмещающем выработку массиве [3].

Для синергетического описания самоорганизующихся явлений протекания термодинамических процессов хорошо подходят категории «конвергенция» и «дивергенция», которые выступают в материальном пространстве как фазы центростремительной самоорганизации сложных систем. В ходе дивергенции целостный массив горных пород подразделяется на зоны дезинтеграции, а конвергенции – зоны интеграции. Конвергенция реализует свойство массива восстанавливать свою целостность и противодействовать формированию в нем трещин, пор и горных выработок. При малых размерах геологических и технологических нарушений массива конвергенция способна «залечивать» трещины, разломы, полости, образуя одну зону термодинамического баланса. При ведении горных работ на глубинах свыше 800 м во вмещающих породах прочностью менее 80 МПа и размерами выработок от единиц до сотен метров активно развиваются процессы дивергенции, формирующие за пределами приконтурной зоны интенсивной конвергенции (зоны разгрузки напряжений) зоны дивергенции (зоны концентрации напряжений).

Согласно первому закону термодинамики снижение количества потенциальной энергии в зоне разгрузки равно приращению такого же количества энергии в зонах опорного давления. Баланс процессов конвергенции и дивергенции, активно развивающихся вокруг горных выработок, формирует зоны термодинамического баланса. Определяющими техническими параметрами их формирования (форма, размеры, количество) являются параметры прилегающей к выработке зоны, которая, в свою очередь, зависит от параметров самой выработки (размеры, форма, прочность пород, глубина заложения). Размеры и форма приконтурной зоны являются базовыми параметрами для дальнейшего развития процессов зональной дезинтеграции в прилегающем массиве. 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 пород в этих зонах характеризуется более высокими градиентами интенсивности напряжений, температур, плотности, намагниченности по сравнению с нетронутым массивом, градиенты которых зависят от уровня преобразования факторов интенсивности в приконтурной зоне. Условия, описывающие состояние массива в энергетических зонах отражены в расчетной схеме и результатах моделирования (рис. 2) [4].

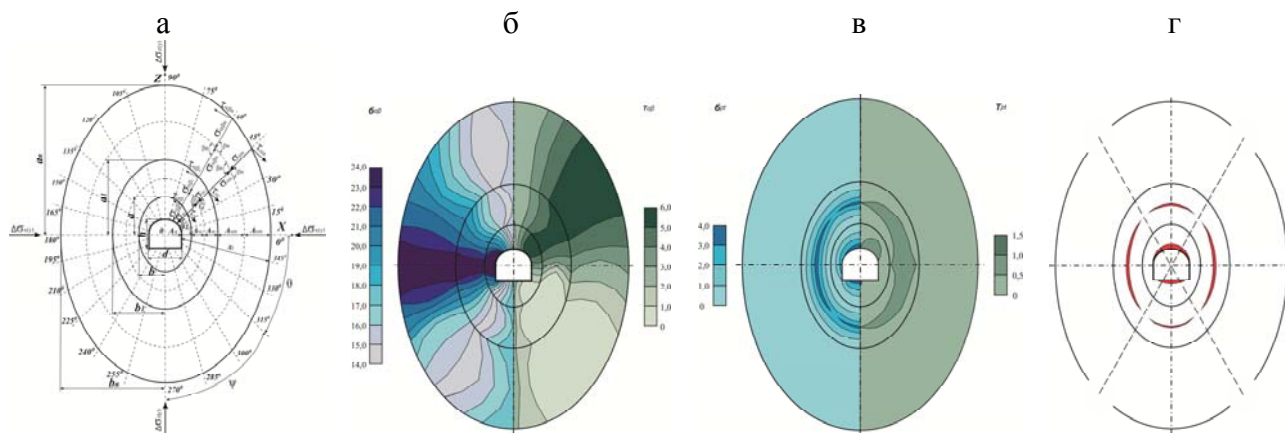


Рис. 3 Расчетная схема моделирования термодинамических процессов при формировании зональной дезинтеграции массива вокруг подготовительной выработки (а), распределение радиальных  $\sigma_{\alpha\beta}$  и тангенциальных  $\tau_{\alpha\beta}$  напряжений сохранившихся после преобразования потенциальной энергии в зонах термодинамического баланса (б), распределение радиальных  $\sigma_{\rho l}$  и тангенциальных  $\tau_{\rho l}$  суммарных напряжений в зонах термодинамического баланса (в), формирование областей деформирования массива в зонах термодинамического дисбаланса (г), МПа

Графическая интерпретация процессов формирования новых энергетических зон вокруг выработок представлена на рис. 3, из которого видно, что величина напряжений, превышающих предел прочности горной породы, переносятся на новую зону термодинамического

баланса, размеры и соответственно запас прочности которой превышают энергетическую зону, которая перешла в состояние дисбаланса.



Рис. 3 Принцип формирования энергетических зон для условий проведения подготовительных выработок на глубине 1200 м в рудах прочностью 80 МПа

В соответствии с предложенным автором принципом формирования энергетических зон, то есть зон термодинамического баланса и дисбаланса энергии, научную ценность представляют обнаруженные закономерности динамики образования так называемых предохранительных 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. 4).

Полученные данные позволяют оценить интенсивность перехода зон термодинамического баланса в состояние дисбаланса, определить количество зон, формирующих предохранительную капсулу, и оценить энергетическое состояние каждой из этих зон. Динамика перехода к очередному энергетическому уровню, то есть формирование очередной зоны термодинамического баланса энергии, определяется по логарифмическим зависимостям, вид которых зависит от условий проведения выработок.

**Выводы.** 1. Моделирование условий проведения подготовительных и очистных выработок в породах и рудах прочностью 40 – 200 МПа на глубинах 0 – 3000 м позволили выявить устойчивую верификационную зависимость, отображающую размеры зон термодинамического баланса. Установлено, что размеры этих зон как полуосей эллипсоида  $a$ ,  $b$  и  $c$  имеют фиксированные размеры для любой горной выработки с замкнутым контуром независимо от ее формы, глубины заложения, физико-механических свойств массива и определяются относительно размеров приконтурной зоны или каждой последующей зоны относительно предыдущей (см. рис. 2, а).

2. Установлено, что общее количество энергетических зон зависит от прочности горных пород и глубины горных работ. Деформирование массива в очередной зоне термодинамического дисбаланса приводит к формированию и перенесению упругой энергии на очередную зону термодинамического баланса, формирование которых происходит по логарифмическим зависимостям (табл. 4).

3. Суммарные реальные радиальные  $\sigma_r$  и тангенциальные  $\tau_p$  напряжения, действующие в зонах термодинамического баланса в тангенциальном направлении, формируют кольцевые энергетические области. Радиальные  $\sigma_{rн}$  напряжения достигают своего максимума в вертикальной и горизонтальной плоскостях, которые соответствуют основным энергетическим потокам перераспределения упругой энергии. Формирование кольцевых областей деформации пород в центре зон

термодинамического дисбаланса происходит за счет развития в радиальных направлениях встречных процессов дивергенции и конвергенции (см. рис. 3, в).

Таблица 4

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	Общее количество энергетических зон
	500	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	
	600	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	
	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	4	
	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		

4. Формирование областей интенсивного деформирования начинается в вертикальной и горизонтальной плоскостях, где энергетические потоки формируют первоначальные линзообразные подобласти, которые далее преобразуются в кольцеобразные области. Интенсивность формирования зон термодинамического баланса и переход их в состояние дисбаланса позволяет определить объем массива, вовлекаемого в формирование предохранительной капсулы (см. рис. 3, г).

Список литературы

1. Хоменко О.Е. Прогнозирование удароопасности массива на глубоких горизонтах железорудных шахт [Текст] / О.Е. Хоменко, В.Н. Яворский, М.Н. Кононенко, В.П. Сердюк // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 11. – С. 9 – 10.
2. Хоменко О.Е. Синергетический подход в исследовании производственных процессов при добыче руд подземным способом [Текст] / О.Е. Хоменко, В.В. Русских, М.В. Нетеча, М.Н. Кононенко, А.А. Долгий // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 7. – С. 3 – 5.
3. Хоменко О.Е. Управление энергией горных пород при подземной разработке руд [Текст] // Горный журнал. Черные металлы. – 2010. – Специальный выпуск. – С. 41 – 43.
4. Хоменко О.Е. Энергетический метод исследования зональной дезинтеграции горных пород [Текст] / О.Е. Хоменко // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 4. – С. 44 – 54.