

УДК 622.272:001.57

И.И. Кайдо**КЛАСТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ ЗОНАЛЬНОЙ
ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МАССИВА ВОКРУГ
ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК**

Семинар № 16

С о времен античности пытли-
вый человеческий ум предла-
гает различные модели мира. Здесь
можно вспомнить «Числа» и «Пра-
вильные многогранники» Пифагора,
идею «Единого» Парменида, «Атомы-
амеры» Демокрита и, наконец, «Апо-
рии» Зенона Элейского, которые
вскрыли диалектическую сущность
познания мира и, по сути, стали стар-
товой основой для развития филосо-
фии, математики и естественных на-
ук, необходимых для создания адек-
ватной картины мира и всех явлений
в нем происходящих.

Явление зональной дезинтеграции
массива вокруг подземных вырабо-
ток, которое в 1985 г. было открыто
коллективом авторов: акад. Е.И. Ше-
мякин, д.т.н. М.В. Курленя, к.ф.-м.н.
В.Н. Опарин, к.т.н. В.Н. Рева, к.т.н.
Ф.П. Глушихин, к.т.н. М.А. Розенба-
ум, до настоящего времени не имеет
общепризнанной физической модели
[1-7].

Даже среди авторов открытия нет
единства в представлении о сущности
явления, поэтому в научной литера-
туре появляются всё новые модели
зональной дезинтеграции [8-18].

М.В. Курленя и В.Н. Опарин яв-
ление зональной дезинтеграции отне-
сли к широкому классу физических
явлений, реализующихся на различ-
ных масштабных уровнях иерархиче-
ской структуры мира: атомарном (ор-
битали), химическом (автоколебатель-

ные реакции типа Белоусова-Жабо-
тинского), оболочки в структуре Зем-
ли и Луны, орбиты планет Солнечной
системы [4-7].

Они предложили в качестве ос-
новных характеристик явления зо-
нальной дезинтеграции использовать
ряд величин [7].

Количественные параметры явле-
ния представлены масштабным фак-
тором явления зональной дезинтегра-
ции – постоянным соотношением ра-
диусов двух соседних зон равным $\sqrt{2}$
(модулем масштабного фактора
 $\alpha^i = \sqrt{2^i}$) и параметром толщины обо-
лочки интенсивной мелкомасштабной
дезинтеграции Δr_i . Для расчета гео-
метрических параметров зональной
дезинтеграции авторы предложили
формулы

$$r_i = \alpha^i r_0, \quad (1)$$

$$\Delta r_i = (0,05 - 0,11) r_i, \quad (2)$$

где i - номер зоны дезинтеграции, от-
считываемый от контура выработки,

$\alpha^i = \sqrt{2^i}$ - модуль масштабного фак-
тора, Δr_i - толщина оболочки мелко-
масштабной дезинтеграции.

Также ими было сделано предпо-
ложение, что динамика явления мо-
жет описываться следующим соотно-
шением

$$\frac{r_i}{\sqrt{t_i}} = const, \quad (3)$$

где r_i – радиус зоны дезинтеграции; t_i – время образования r_i зоны дезинтеграции.

В терминологическом аспекте зональная дезинтеграция специально выделена авторами открытия, видимо, чтобы разорвать преемственность геомеханических понятий. Действительно, существуют термины: пластическое деформирование, разрушение, трещинообразование, которые широко используются в геомеханике. Нужно согласиться с авторами открытия, – термин дезинтеграция очень емкий. Дезинтеграция – нарушение целостности ассоциируется со сложными процессами деформирования и разрушения структурных элементов массива, для изучения которых предназначено новое научное направление материаловедения – физическая мезомеханика.

Не останавливаясь на критическом обзоре известных моделей явления зональной дезинтеграции, заметим, что ни одна из них не приблизилась к созданию физического объяснения параметров модели Курлени - Опарина.

Авторская кластерно-перколяционная модель разработана именно с целью раскрытия физической сущности явления зональной дезинтеграции и обоснования закономерности параметров указанной модели.

Сущность предлагаемой модели состоит в описании механизма перераспределения сил в кластерах массива, обеспечивающих реализацию явления зональной дезинтеграции.

Реальный массив горных пород имеет сложное строение, обусловленное его структурными и текстурными особенностями, сформированными в результате геологических и тектонических процессов. Минеральное строение горного массива обладает существенной анизотропией физико-механических свойств, которая

проявляется в его текстуре. Внутри и на границе структурных элементов силы связи существенно отличаются, что проявляется в ассоциировании (объединение) их в целостный элемент (кластер). Вследствие этого в массиве всегда существуют иерархически упорядоченная структура вложенных кластеров, связь между которыми обусловлена не только силами, связывающими элементы внутри кластера, но и силами, действующими на контактах его с другими кластерами. Согласно современным данным геологии и геомеханики системно можно представить иерархическую структуру массива горных пород с учетом масштабного фактора подземных горных выработок, размер которых обычно не превышает десятков метров (табл. 1).

В основе, на самом нижнем структурном уровне - наноуровне частицы (атомы и ионы) под действием электрических сил формируют не только широко известные кристаллические и аморфные вещества, но также и такие мало изученные, как фуллереноподобные наноболочки [19].

Однако в современной геомеханике рассматриваются только кристаллические и аморфные вещества, слагающие кластеры различных уровней. Кластеры 1-го уровня – это кристаллы или их части, образованные в результате нарушения порядка расположения элементов дислокациями, а также частицы аморфного вещества, сопоставимые по размерам с кластерами 1-го порядка, которые размещаются в пространстве между кристаллами - зернами в кластерах-ассоциатах 2-го уровня. Ассоциаты кластеров 1-го уровня образуют кластеры 2-го уровня. Очевидно, что силы связи между кластерами в ассоциате существенно слабее, чем внутри кластеров, что является необходимым условием устойчивости внутренней структуры ассоциатов,

Таблица 1
Иерархические уровни вложенных кластерных структур массива горных пород

Масштаб уровня	Порядок величин, м	Характеристика взаимодействий	Характеристика структуры уровня
Мега	>10	Упругопластическое взаимодействие элементов литосферы	Кластеры 10 уровня, ассоциаты кластеров от 9 до 1 уровня.
Макро	1	Упругопластическое взаимодействие макроотдельностей массива с формированием зон упругого и пластического деформирования материала	Кластеры 9 уровня, ассоциаты кластеров от 8 до 1 уровня.
Субмакро	10^{-1}	Упругопластическое взаимодействие субмакроотдельностей массива с формированием зон упругого и пластического деформирования материала	Кластеры 8 уровня, ассоциаты кластеров от 7 до 1 уровня.
Микро	10^{-2}	Упругопластическое взаимодействие микроотдельностей массива с формированием зон упругого и пластического деформирования материала	Кластеры 7 уровня, ассоциаты кластеров от 6 до 1 уровня.
Субмикро	10^{-3}	Упругопластическое взаимодействие субмикроотдельностей массива с формированием зон упругого и пластического деформирования материала	Кластеры 6 уровня, ассоциаты кластеров от 5 до 1 уровня.
	10^{-4}	Взаимодействие ассоциатов кластеров (зерен, кристаллов) с формированием зон вязкопластического течения	Кластеры 5 уровня, ассоциаты кластеров от 4 до 1 уровня.
	10^{-5}	Взаимодействие ассоциатов кластеров (зерен, кристаллов) с образованием собственных однородных включений фазово-пустотное	Кластеры 4 уровня, ассоциаты кластеров от 3 до 1 уровня.
	10^{-6}	Взаимодействие ассоциатов кластеров (зерен, кристаллов) с формированием площадок скольжения	Кластеры 3 уровня, ассоциаты кластеров от 2 до 1 уровня.
	10^{-7}	Субзерновое граничное взаимодействие кластеров (зерен, кристаллов)	Кластеры 2 уровня, ассоциаты кластеров 1 уровня.
	10^{-8}	Дислокационное взаимодействие кластеров в решетках	Кластеры 1 уровня, образованные нарушением порядка в решетках.
Нано	10^{-9}	Ионно-электронное взаимодействие атомов и ионов	Кластеров 1 уровня - кристаллы и фуллереноподобные оболочки.
	$<10^{-9}$	Полевые взаимодействия частиц	Структуры, формирующиеся по законам квантовой механики.

а также возможности перераспределения внешних силовых воздействий (перколяции сил) по структурным взаимодействиям внутри.

Аналогичным образом формируются все вышележащие структурные уровни массива горных пород.

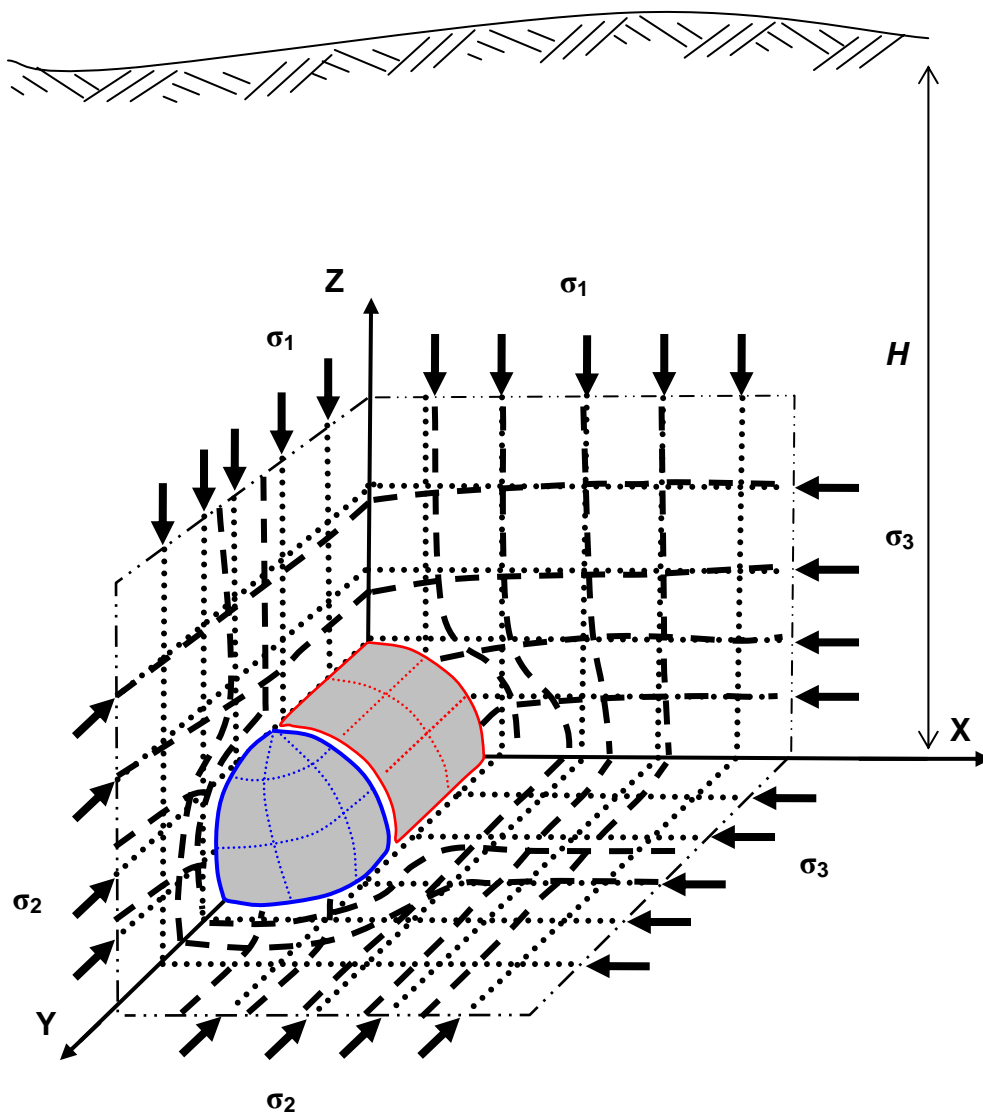


Рис. 2. Изменение траекторий линий главных напряжений вокруг цилиндрической выработки со сферическим забоем

Согласно теории упругости в массиве горных пород вокруг выработки происходит перераспределение напряжений (рис. 2). Кроме изменения абсолютных величин напряжений в каждой точке массива по сравнению с исходным состоянием существенно изменяется их ориентации вблизи вы-

работки. Траектории главных напряжений в реальном массиве на каждом масштабном структурном уровне представляют собой перколяционный кластер передачи сил (рис. 2 и 3).

Исходное напряженное состояние характеризуется ортогональным семейством прямых линий главных напряжений,

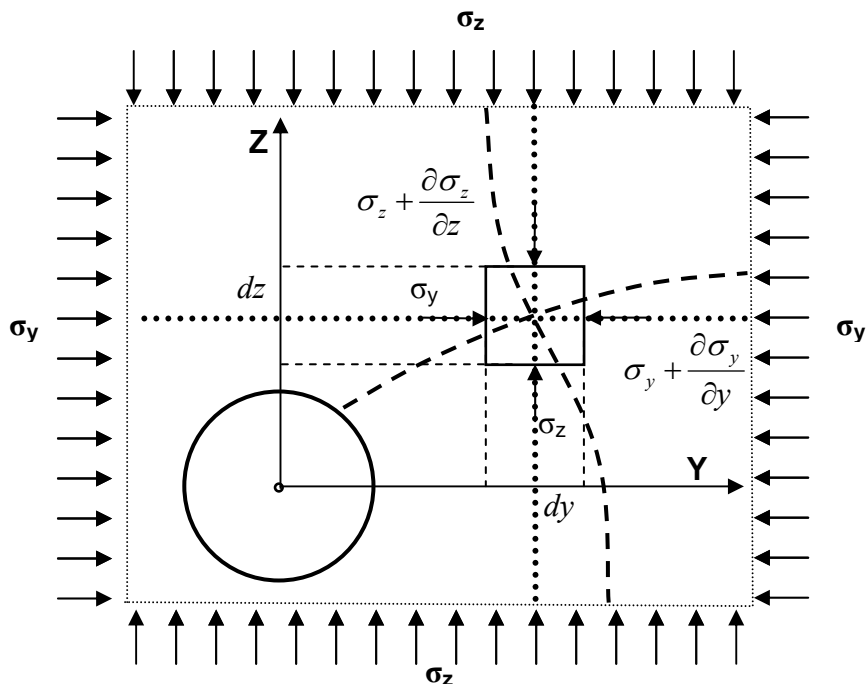


Рис. 3. Изменение траекторий линий главных напряжений вокруг цилиндрической выработки в выделенном элементарном объеме

а новое напряженное состояние, сформировавшееся после проведения выработки, характеризуется семейством кривых.

Известно, что единственной фундаментальной силой, которая интегрирует вещество, является сила электрического взаимодействия (рис.4). Эта сила на наноуровне вещества формирует не только широко известные кристаллические упаковки кубического или гексагонального типа, но и замкнутые оболочки – фуллерены (рис. 5 и 6).

Траектории главных напряжений на наноуровне можно представить как изменение электрического взаимодействия между атомами или ионами в результате перемещения их силой гравитации. Таким образом, перколяционные кластеры на наноуровне в кристаллических упаковках будут

представлять собой либо семейство параллельных линий, либо семейство пересекающихся линий (рис. 5).

Гипотеза, положенная в основу кластерно-перколяционной модели явления зональной дезинтеграции, состоит в том, что деформирование массива вокруг выработки в местах максимальной концентрации напряжений приводит к изменению упаковки атомов или ионов и образованию элементов фуллерено-подобной оболочки. Причем их локализация в узкой области концентрации напряжений на линии максимальных главных напряжений, которые имеют сферическую кривизну, создает предпосылку и возможность их объединения в единую фуллереноподобную оболочку. Эта оболочка поглощает часть наночастиц из вещества с внешней стороны оболочки, создавая вакансии,

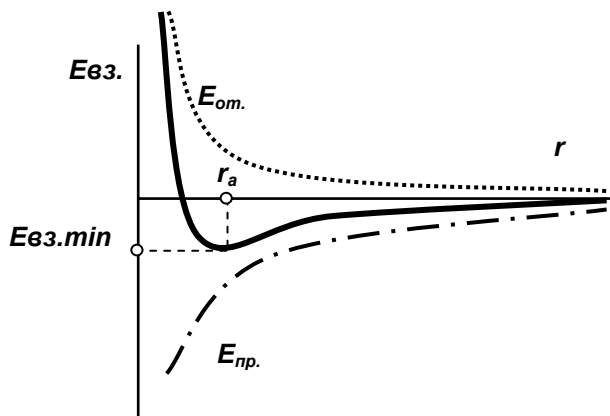


Рис. 4. Электрическое взаимодействие атомов и ионов

служащие зародышами микро и макротрещин в этой зоне. Эти трещины были открыты как явление зональной дезинтеграции.

Исследования процессов формирования фуллерена [20] показали, что он собирается из фрагментов - предварительно объединенных элементов, которые затем стягиваются в оболочку (рис. 7). Закономерность фрагментарной сборки фуллерена указывает на возможность объяснения с её помощью флуктуаций явления зональной дезинтеграции [21-23].

Сферичность фуллереновой оболочки и зависимость фундаментальных электрического и гравитационного взаимодействий обратно пропорционально квадрату расстояния позволяет построить заключение, обос-

новывающее справедливость использования параметра $\sqrt{2}$. Действительно, как показал Эренфест П. [24], устойчивость физического мира, т.е. реализации в нем законов фундаментальных взаимодействий, обеспечивается его трехмерностью. В качестве усиления доказательства Эренфеста служит строгое доказательство Великой теоремы Ферма, т.е. отсутствие целочисленных решений уравнения $X^n + Y^n = Z^n$ при $n > 2$, представляющего метрику физического пространства.

Простой расчет показывает, что если на сфере произвольного радиуса регулярно расположено целое число наночастиц (например, как у фуллерена), то минимальный радиус сферы, на которой с той же регулярностью расположено большее число наночастиц, должен быть больше в $\sqrt{2}$ раз, а количество частиц будет больше в два раза.

Кстати, следует заметить, что укладка кругов на плоскости или упаковка шаров в пространстве не позволяет обеспечить появление сферических оболочек, отвечающих требованию целочисленности и взаимоотношению через $\sqrt{2}$.

Таким образом, реализация зональной дезинтеграции по модулю $\sqrt{2}$ возможно только в случае формирования фуллере-

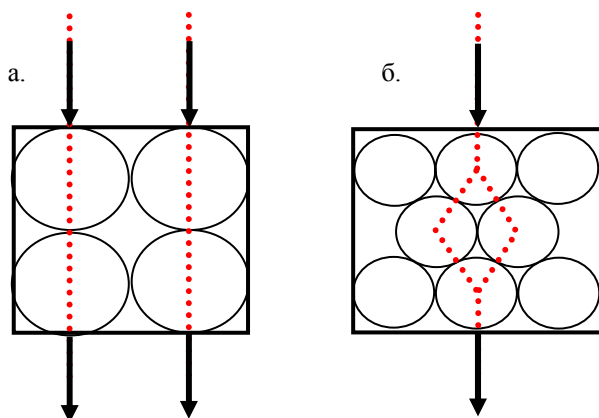


Рис. 5. Упаковки атомов и ионов в кристаллах и перколяционные кластеры в них: А. - кубическая; Б. - гексагональная

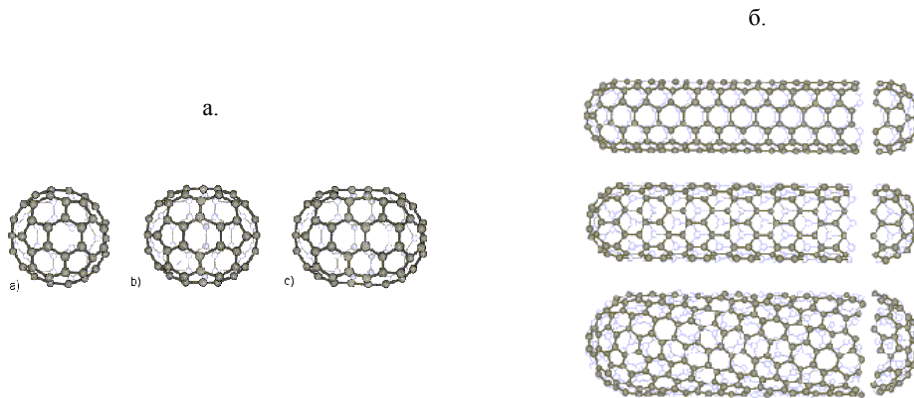


Рис. 6. Фуллерены (а) и фуллеренные трубки (б)

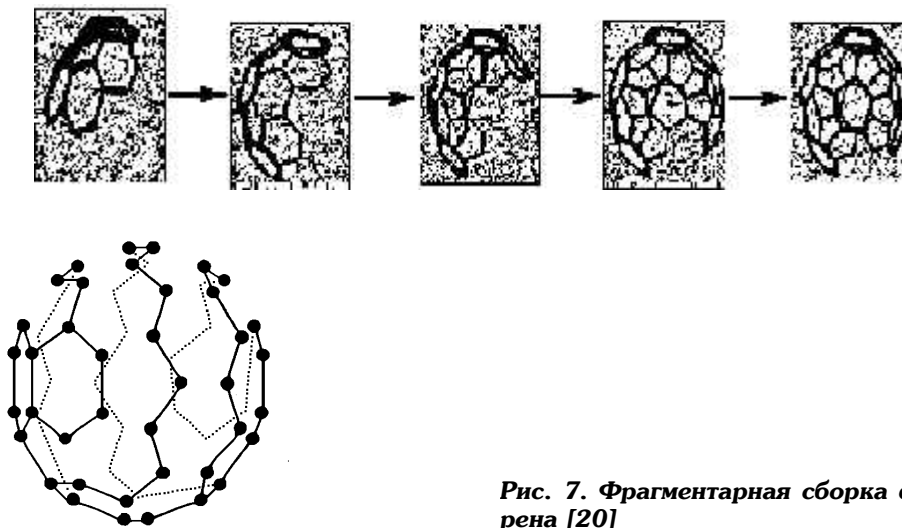


Рис. 7. Фрагментарная сборка фуллере-на [20]

ноподобных кластерно-перколяцион-ных оболочек.

Для определения второго важного параметра зональной дезинтеграции – ширины зоны мелкомасштабной дезинтеграции (повышенной трещиноватости) Курленя М.В. и Опарин В.Н. предложили использовать коэффициент, значение которого может изменяться в пределах от 0,05 до 0,11, причем как делать выбор они не указали.

Если вычислить максимальное значение радиуса границы зоны мелко-

масштабной дезинтеграции, т.е. $1,11 \cdot \sqrt{2} = 1,57$, то можно заметить близость этого числа к известному числу золотого отношения $\Phi = 1,618$ [25].

На рис. 8 показаны две фотографии дезинтеграции массива вокруг скважин. На рис. 8, а видно, что вокруг скважины диаметром 390 мм четко видна круговая трещина, радиус которой в $\sqrt{2}$ раз больше радиуса скважины. На рис. 8, б видно, что вокруг скважины диаметром 850 мм

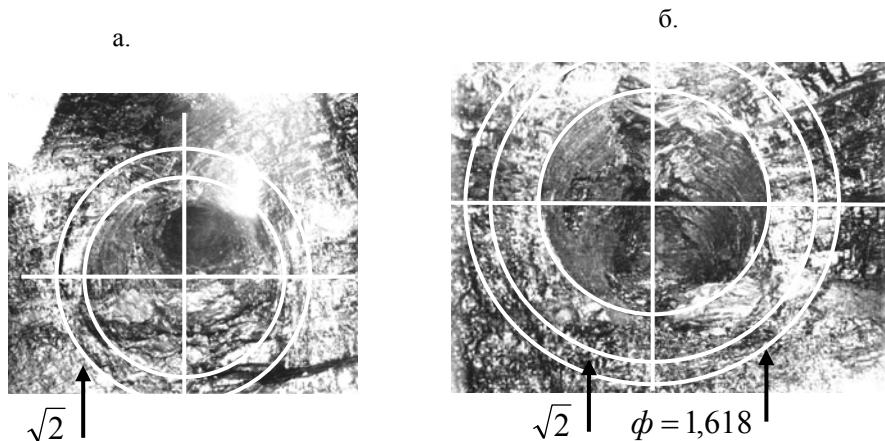


Рис. 8. Дезинтеграция массива вокруг скважин: а - скважина диаметром 390 мм; б - скважина диаметром 850 мм

имеет место серия кругообразных трещин, причем первая из них располагается в зоне зональной дезинтеграции ближе к границе $\Phi=1,618$. Кроме того, видны три трещины за границей зональной дезинтеграции. Появление этих трещин, а также значительное раскрытие всех трещин обусловлено разрушением массива в верхней части скважины, что хорошо видно на фото.

Таким образом, можно предположить, что зона мелкомасштабной дезинтеграции имеет две границы: внутреннюю, ближнюю к выработке на расстоянии в $\sqrt{2}$ раз больше радиуса выработки и внешнюю - на расстоянии в $\Phi=1,618$ раз больше радиуса выработки.

Согласно предлагаемой кластерно-перколяционной модели зональной дезинтеграции предполагается, что формирование сферической фуллерено-подобной оболочки начинается впереди забоя выработки, где происходит процесс интенсивного перераспределения напряжений, изменения их величин и ориентаций (см. рис. 2). По мере подвигания забоя выработки формируется новая сферическая фуллереноподобная обо-

лочка, а в массиве позади забоя сохраняется устойчивый пояс из экваториальных элементов сферы, который взаимодействуя с предыдущим поясом формирует цилиндрическую оболочку подобно фуллереновым трубкам (см. рис.6). Таким образом, параметры зон зональной дезинтеграции вокруг протяженных (цилиндрических) выработок совпадают с параметрами зон, сформированных в массиве вокруг забоя.

Следует заметить, что присутствие числа $\Phi=1,618$ в явлении зональной дезинтеграции, наверное, не случайно. Золотое отношение или золотое сечение проявляется в природе как признак гармонии [18, 25]. Вероятно, зональная дезинтеграция реализуется по какому-то общему закону макро квантования, о котором пока ничего не известно. Однако, последний параметр зональной дезинтеграции (3), который предложили Курленя М.В и Опарин В.Н., после несложных преобразований имеет вид

$$v_i \cdot r_i = const, \quad (4)$$

что очень похоже на известное соотношение неопределенностей Гейзенберга [26]

$$\Delta p \cdot \Delta x = h / 4\pi, \quad (5)$$

где Δp - погрешность измерения импульса частицы, Δx - погрешность измерения координаты частицы, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка.

Таким образом, кластерно-перколяционная модель дает объяснение физической природы явления зональной дезинтеграции и основных его параметров. Механизм зональной дезинтеграции согласно кластерно-перколяционной модели следующий.

Создание выработки нарушает равновесие массива – статичное гармоническое состояние и инициирует движения его элементов, которое гармонизируется динамическим модулем $\sqrt{2}$ и модулем золотого сечения Φ . Впереди забоя выработки образуются сферические фуллереноподобные оболочки с радиусами, определяемыми по формуле (1), начиная с оболочки, оконтуривающей сечение выработки.

Ширина зоны мелкомасштабной дезинтеграции определяется по формуле

$$\Delta r_i = K_i r_o, \quad (6)$$

где $K_i = (\Phi - \sqrt{2}) \sqrt{2^{i-1}}$ - коэффициент интенсивности мелкомасштабной дезинтеграции.

Геомеханические условия, в которых развивается явление зональной дезинтеграции целесообразно предста-

вить через параметр - критерий образования упруго-пластических зон [27].

$$q = \gamma H / R_c, \quad (7)$$

где γ - объемный вес горных пород; H - глубина расположения выработки; R_c - предел прочности пород на сжатие.

$q \leq 0,5$ - реализуется равномерное всестороннее сжатие массива в радиальном направлении к центру выработки за счет подвижности его структурных элементов;

$0,5 \leq q \leq 1,6$ - подвижность структурных элементов исчерпывается и начинается разрушение элементов вблизи выработки;

$q = 1,4 - 1,6$ - формируется первая зона дезинтеграции;

$q \geq 1,6$ - формируются после первой последующие зоны дезинтеграции.

Из положений кластерно-перколяционной модели следует, что в чистом виде зональная дезинтеграция, т.е. формирование замкнутой сферической фуллереноподобной оболочки на траекториях главных напряжений возможно только в условиях гидростатического напряженного состояния. Если соотношение главных напряжений отличается от равенства, то оболочка не будет завершаться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эффект* зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, Г. Л. Фисенко, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушихин, М. А. Розенбаум, Э. А. Троп // ДАН СССР. — 1986. — Т. 289. — №5.

2. Глушихин Ф.П., Шклярский М.Ф., Рева В.Н., Розенбаум М.А. Новые закономерности разрушения горных пород вокруг выработок // Шахтное строительство - 1986. - №2.

3. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Опарин В.Н. и др. Зональная дезинтеграция гор-

ных пород вокруг подземных выработок. // ФТПРПИ. — Ч. I. 1986. — № 3; Ч. II. — 1986. — № 4; Ч. III — 1987. — № 1; Ч. IV. — 1989. — № 4.

4. *Открытие* № 400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушихин, М. А. Розенбаум. - Оpubл. В БИ, 1992, № 1.

5. Опарин В.Н., Курленя М.В. О скоростном разрезе Земли по Гутенбергу и воз-

- можно его геомеханическом объяснении. Ч. I: Зональная геодезинтеграция и иерархический ряд геоблоков // ФТПРПИ. – 1994. – № 2.
6. *Опарин В.Н.* Масштабный фактор явления зональной дезинтеграции горных пород и стратификация недр Луны по сейсмическим данным // ФТПРПИ. — 1997. — № 6.5.
7. *Курленя М.В., Опарин В.Н.* О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомно-ионных радиусов // ФТПРПИ. — 1996. — № 2.
8. *Курленя М.В., Опарин В.Н.* Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I и II // ФТПРПИ. - 1999. - № 3. и ФТПРПИ.- 2000. - №4.
9. *Рева В.Н., Тропп Э.А.* Уруго-пластическая модель зональной дезинтеграции окрестности подземной выработки // В сб.: Физика и механика разруш. горн. пород примен. к прогнозу динам. явлений. - СПб.: ВНИИИ, -1995. - С. 125-130.
10. *Чаньшев А.И.* К исследованию явления зональной дезинтеграции горных пород// Напряженно-деформированное состояние массива горных пород. - Новосибирск: ИГД, 1988. - С. 3-8.
11. *Черняк И.Л., Ярунин С.А.* Управление состоянием массива горных пород. Учеб. Для вузов. - М.: Недра. - 1995. - 395 с.
12. *Одинцев В.Н.* Отрывное разрушение массива скальных горных пород. — М.: ИП-КОН РАН. - 1996.
13. *Аннин Б.Д., Жигалкин В.М.* Поведение материалов в условиях сложного нагружения. - Новосибирск: Изд-во СО РАН.- 1999 г.
14. *Морозов А.Ф., Метлов Л.С., Мордасов В.И.* Устойчивость подготовительных выработок в условиях зональной дезинтеграции горных пород. Ч. 1. — Донецк: Донеччина, 1999.
15. *Метлов Л.С., Морозов А.Ф., Зборщик М.П.* Физические основы механизма зонального разрушения пород в окрестности горной выработки// ФТПРПИ. - 2002. -№2.
16. *Белусова О.Е.* Математическое моделирование процесса разрушения вокруг цилиндрической выработки. Автореф. дис. ... к.т.н. ИГД СО РАН.- Новосибирск. 2007.
17. *Гузев М.А., Парошин А.А.* Неевклидовая модель зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок// ПМТФ. - 2000. - №3. - С. 181-195.
18. *Кайдо И.И.* О природе явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок (гипотеза). МПГУ. – ГИАБ, - №1. - 2009.
19. *Макаров П.В.* Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблемы моделирования// Физическая мезомеханика. - т.8, - №6.- (2005)
20. *Фуллерены — основа материалов будущего* // Трефилов В.И., Шур Д.В., Тарасов Б.П., Шульга Ю.М., Черногоренко А.В., Пишук В.К., Загинайченко С.Ю. - Киев: ИПМ НАНУ и ИГХФ РАН, - 2001, - 148 с.
21. *Куликов Д.В., Мекалова Н.В., Закиричная М.М.* Физическая природа разрушений, УГНТУ,- Уфа. - 1999.
22. *Кузьмич О.Ю.* Некоторые особенности трещинообразования в массиве вокруг подготовительных выработок.// Угольная промышленность СССР. Реф. На картах. ЦНИЭИуголь. -Вып. №7. - 1989.
23. *Морозов А.Ф., Юскевич А.М.* Флуктуации зональной дезинтеграции осадочных пород вокруг подготовительной выработки // Уголь Украины. - 1991. - №7. - С. 36-39.
24. *Шмиголь А.В., Кириченко В.Я., Бучатский С.М., Рева В.Н.* Шахтные исследования характера разрушения слабых пород на шахтах Западного Донбасса.// Шахтное строительство. – С. 11-12.
25. *Горелик Г.Е.* Почему пространство трехмерно? – М.: Наука. - 1982.
26. *Шевелев И.Ш., Марутаев М.А., Шмелев И.П.* Золотое сечение: три взгляда на природу гармонии. - М.: Стройиздат, 1990.
27. *Давыдов А.С.,* Квантовая механика.: М.- Наука, 1973.
28. *Атрушкевич О.А., Кайдо И.И., Гарипова С.М. Топоров С.П.* Геомеханическое обоснование применения анкерной крепи // Перспективы развития горнодобывающей промышленности: Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции. - Новокузнецк, СибГГМА. 1997.- С. 106-108. **ГИАБ**

Коротко об авторе

Кайдо И.И. – кандидат технических наук, горный инженер-физик, доцент кафедры ПРГПМ, Московский государственный горный университет.

Рецензент д-р техн. наук, проф. *Ю.Н. Кузнецов*