

### Раздел 3. Физика горных процессов на больших глубинах

УДК 622.831.24.001

О.Е. Хоменко, М.Н. Кононенко, А.П. Дронов

#### ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНАЛЬНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ МАССИВА ВОКРУГ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Государственное ВУЗ «Национальный горный университет» МОН Украины

*Цель работы – исследование зонального структурирования массива вокруг горных выработок в лабораторных условиях. Основными методами выполнения исследований являются методы эквивалентных, оптико-поляризационных и электропроводных материалов. Границы зон определялись по соответствию напряжений величине  $\gamma_H$ . Результаты исследований параметров зон на физических моделях показали возможность визуализации зональной напряженности массива, эллипсоидную форму зон и их центрирование относительно выработок. Установлены отношения вертикальных и горизонтальных полуосей зон для подготовительных выработок и очистных камер, и определена сходимостъ полученных значений.*

**Ключевые слова:** лабораторные методы исследования, напряженно-деформированное состояние, структурирование массива вокруг выработок, размеры полуосей зон.

#### Введение

Разработка месторождений в разнообразных условиях залегания, изменяющихся свойствах руд и пород характеризуется растрескиванием, расслаиванием, заколообразованием, обрушением, удароопасностью и другими формами проявления энергии горного давления. Анализ горнотехнических и геодинамических условий разработки рудных месторождений Украины показал, что динамические проявления горного давления указывают на высокую обеспеченность рудных месторождениях упругой потенциальной энергией. Процессы накопления напряжений в массиве и разрушения горных пород, возникающие в процессе отработки месторождений, исследуются с помощью разнообразных методов. В основу большинства применяемых методов исследований положен принцип зависимостей свойств горных пород и их напряженного состояния под воздействием естественных и искусственных энергетических полей, возникающих в массиве. Несмотря на многообразие применяемых методов и средств диагностики, и контроля напряженно-деформированного состояния массива, по функциональному назначению

их обычно объединяют в три класса: промышленные (натурные), лабораторные (физические) и теоретические (аналитические). В свою очередь классы подразделяются на группы (визуальные, маркшейдерские, механические, геофизические и др.) и далее на виды. В данной работе представлены результаты лабораторных исследований по выявлению зонального структурирования массива вокруг горных выработок. Физическое моделирование зональности в массиве, вмещающем горные выработки, выполняли на эквивалентных, оптико-поляризационных и электропроводных материалах.

### Экспериментальная часть

Метод эквивалентных материалов применялся для моделирования проведения подготовительных и очистных выработок при проявлении зонального структурирования массива (рис. 1, а, б). Подбор эквивалентного материала производили путем определения предела прочности на сжатие, модуля упругости и коэффициента Пуассона по цилиндрическим образцам с помощью цифрового прессы КС-200/EUR компании «Tecnotest» (г. Модена, Италия), установленного в лаборатории кафедры строительства, геотехники и геомеханики ГВУЗ «НГУ». Состав эквивалентного материала подбирался по основным физическим свойствам с целью воспроизводства свойств горных пород Криворожского и других рудных месторождений Украины. Свойства эквивалентного материала регулировали соотношением кварцевого песка, молотого гранита, чугуновой стружки, измельченной слюды и парафина. Нагружение моделей производили на стенде для плоского моделирования горного давления. Количество испытаний для каждого варианта составляло 3. Фактически с учетом отладки процесса моделирования и количества продублированных вариантов было испытано более 30 моделей [1].

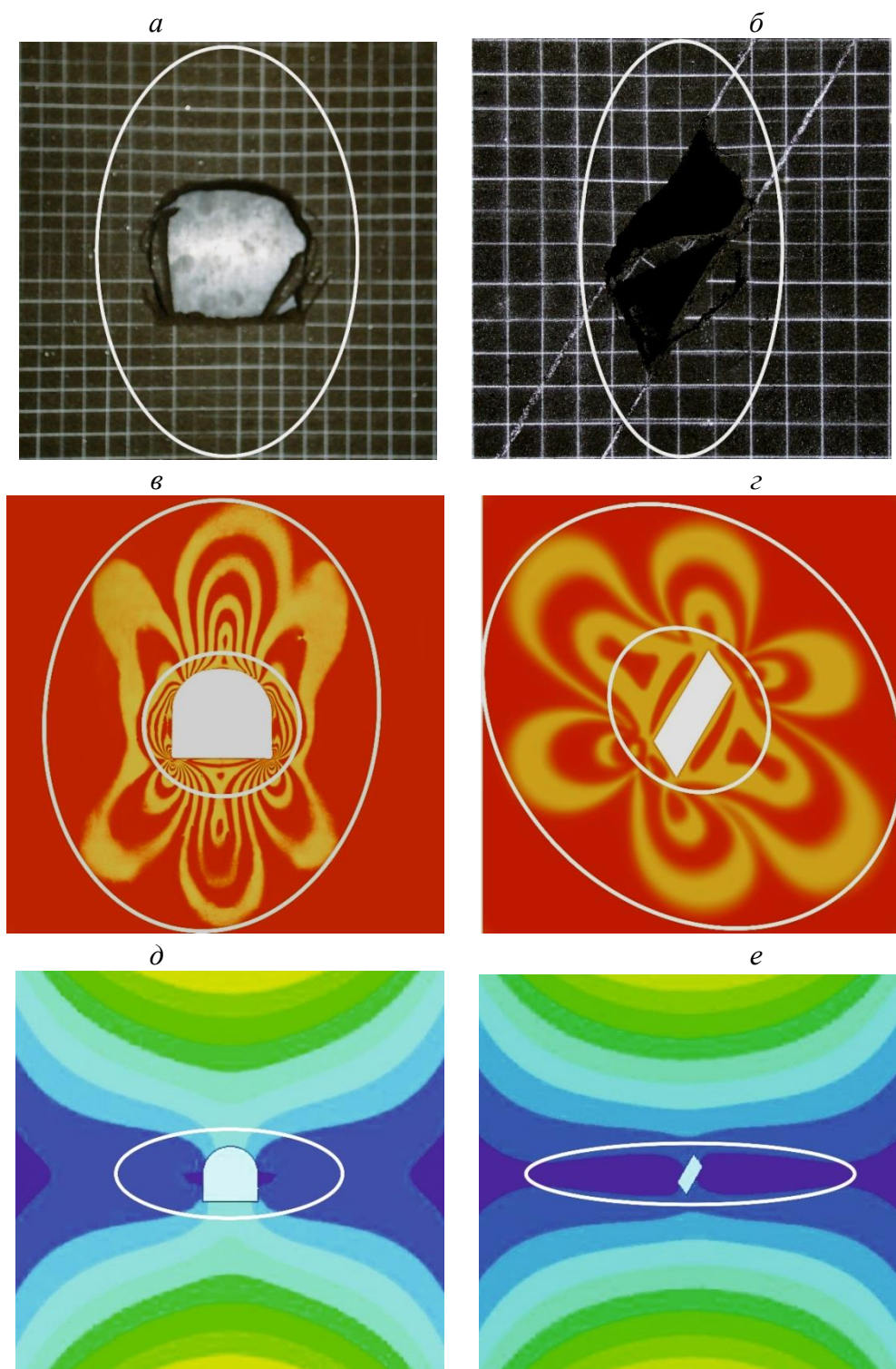
При моделировании осуществляли измерения абсолютных смещений отдельных точек и степени деформаций элементов модели. Разность начального и результирующего замеров по шкале давала величину абсолютного смещения точек модели методом фотофиксации, при котором на поверхность модели наносили мерную сетку и систематически фотографировали. Далее с помощью двух цифровых фотоснимков высокого разрешения определяли смещения отдельных точек модели относительно других, то есть деформацию участка модели [2, 3]. К моделированию принималась площадь поперечного сечения подготовительной выработки  $S_{np}=10,5 \text{ м}^2$  ( $h_e = 3 \text{ м}$ ,  $d_e = 3,5 \text{ м}$ ), размеры очистной камеры ( $h_k = 60 \text{ м}$  и  $l_{np} = 40 \text{ м}$ ), глубина заложения выработок  $H = 1000 \text{ м}$ , прочность вмещающих руд  $\sigma_{сж} = 80 \text{ МПа}$  [2].

Результаты физического 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 вер-

тикальной и сжатостью в горизонтальной плоскостях при неизменных нагрузке и составе эквивалентного материала, а также значительно разнящихся размерах и форме зон для подготовительных и очистных выработок и др. Также метод дает возможность выявить только по одной зоне, формирующейся вокруг выработок (рис. 1, а, б). Отношение вертикальных и горизонтальных полуосей к полуразмерам выработок для зоны № 1 составляет 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% (табл. 1). Помимо этого, метод дает хорошие результаты при моделировании возможных областей разрушения массива. 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 [3].

Далее выполняли физическое моделирование зональности в массиве на оптико-поляризационных материалах. Оптико-поляризационный метод или метод фотоупругости применялся при изучении распределения напряжений вокруг горных выработок. Исследование моделей производили на стенде для оптико-поляризационного моделирования, который установлен в лаборатории кафедры строительства, геомеханики и геотехники. Модели изготавливались из полимеров на основе эпоксидной смолы типа ЭПД. Отверждение смолы проводили 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 модели отжигали для снятия остаточных напряжений при максимальной температуре на 5 – 10 °С выше максимальной температуры полимеризации.

Определение модуля упругости и коэффициента Пуассона материала производили в результате измерения деформаций при помощи механического тензометра на образцах в виде растягиваемой полосы. Изменение модуля упругости (в 1 – 2 раза) достигалось при добавлении в первоначальную смесь дибутилфталата. После изготовления плоские модели устанавливали на пути лучей поляризованного света и на экране анализатора наблюдали поля распределения цветов, соответствующие касательным напряжениям. При увеличении нагрузки картина распределения цветов на экране изменялась до определенных значений в зависимости от угла сдвига фаз. Процесс повторяли несколько раз с целью получения картины цветных полос первого, второго, третьего и четвертого порядков. При этом порядок полос прямо пропорционален увеличению касательных напряжений. Характер распределения цветов и их изменение под нагрузкой фиксировались с указанием цветов и порядка полос [4].



**Рис. 1.** Результаты выявления энергетических зон при моделировании подготовительных (*a*, *в*, *д*) и очистных (*б*, *г*, *е*) выработок на эквивалентных (*a*, *б*), оптико-поляризационных (*в*, *г*) и электропроводных (*д*, *е*) материалах: эллиптические линии вокруг выработок – границы зон, где напряжения приближаются к  $\gamma H$

Определение места положения отдельных зон выполнялось по анализу изменения напряженности массива. Как показал анализ явления зональной дезинтеграции горных пород, водоразделом зон является значение напряженности массива, соответствующее величине  $\gamma H$ . 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 по моделированию зональной напряженности массива вокруг горных выработок [5].

Таблица 1

**Результаты замеров энергетических зон при физическом моделировании состояния массива вокруг выработок**

Метод	Вид выработки	Полуось энергетической зоны, $a_n/0,5h$ и $b_n/0,5b$					
		верт.	гор.	верт.	гор.	верт.	гор.
		зона № 1		зона № 2		зона № 3	
Эквивалентные материалы	Подготов.	1,71	1,88	$\infty$	$\infty$	-	-
	Очистная	1,71	1,51	$\infty$	$\infty$	-	-
Оптико-поляризационные материалы	Подготов.	1,43	1,56	3,28	4,71	$\infty$	$\infty$
	Очистная	1,33	1,71	3,12	4,57	$\infty$	$\infty$
Электропроводные материалы	Подготов.	1,69	3,25	$\infty$	$\infty$	-	-
	Очистная	1,66	13,00	$\infty$	$\infty$	-	-

Результаты физического моделирования на оптико-поляризационных материалах также показали возможность визуализации зональной напряженности массива и подтвердили результаты, полученные на эквивалентных материалах.

Используемый метод позволил увидеть уже второй порядок зон, но при этом сама картина зональной напряженности более удалена от истинной. Это проявляется в невыдержанности напряженности по площади зон, что позволяет выполнить оконтуривание однородно-напряженного массива сугубо условно. Эллипсоиды имели несимметричную форму в горизонтальных и вертикальных плоскостях и было нарушено их центрирование относительно выработок. Более точные результаты метод показывает при моделировании областей концентрации напряжений, в отличие от областей разряджения, при помощи которых и выявляется истинная зональность в массиве. Отношения вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне № 1 составляет для подготовительной выработки  $a_n/0,5h = 1,43$  и  $b_n/0,5b = 1,56$ , в зоне № 2 соответствен-

но – 4,71 и 3,28, а для очистной в зоне № 1  $a_n/0,5h = 1,33$  и  $b_n/0,5b = 1,71$  и в зоне № 2 соответственно – 3,12 и 4,57 (табл. 1). Сходимость относительных размеров при моделировании составляет для зоны № 1 – 91 – 93%, а для зоны № 2 – 66 – 72% (табл. 1).

Далее физическое моделирование выполнялось в лаборатории кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ГВУЗ «НГУ» при помощи метода электродинамических аналогий, который применялся для изучения стационарных физических процессов, которые описываются уравнениями эллиптического вида. Этот метод основан на математической аналогии между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и стационарным 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, а также обеспечивает низкую контактную разность потенциалов между бумагой и металлическими шинами, легко поддается механической обработке при изготовлении в ней моделей горных выработок [6].

Изготовлению модели предшествовало определение геометрических форм исследуемой области и задание краевых условий на ее границах. Затем выбирался геометрический масштаб моделирования и производилось графическое нанесение контуров выработок на лист электропроводной бумаги. После этого бумагу обрезали вдоль границ моделируемой области. Задание граничных условий на модели осуществлялось в соответствии с теорией подобия. После изготовления модели производили ее подключение к установке ЭГДА, в результате чего на шины модели подавали разность потенциалов, условно принимаемую равной единице или 100%. Методика проведения экспериментов сводится к определению геометрических мест точек с одинаковыми значениями приведенного электрического потенциала путем описанных выше измерений. Соединяя указанные точки плавными кривыми, получаем эквипотенциальные линии, которые являются аналогами соответствующих напряжений в натуре, а затем оконтурившем границы выявленных зон в массиве модели (см. рис. 1 в, г)

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 по причине нарушения условия  $\gamma H$  на границе зон. Это говорит только о качественной стороне выявленной зональности в массиве по причине несоответствия напряжений по площади зон и на их границе. 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 центрированием с выработками, их размеры в горизонтальной плоскости являются сильно завышенными как для подготовительной  $b_n/0,5b = 3,25$ , так и для очистной  $b_n/0,5b = 13,0$

выработок. Сходимость относительных размеров зоны № 1 при моделировании вертикальных полуосей составляет 98%, а горизонтальных – 66% и меньше (табл. 1) [7].

Основным предназначением метода электропроводных материалов является получение результатов при моделировании распространения тепла, диффузии газа и жидкости, которые являются второстепенными факторами интенсивности напряжений в массиве. Поэтому можно предположить, что исследование как первичных, так вторичных факторов интенсивности напряжений будет сопровождаться значительными погрешностями. Это было подтверждено результатами, полученными при моделировании зональности в массиве при помощи метода электропроводных материалов.

### **Выводы**

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

2. Результаты физического исследования на оптико-поляризационных материалах позволили смоделировать уже второй порядок зон, в которых эллипсоиды имели несимметричную форму и не центрировались с выработками. Отношение 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, а для очистной в зоне № 1 – 1,33 и 1,71 и в зоне № 2 – 3,12 и 4,57.

3. Результаты физического моделирования с помощью метода электродинамических аналогий позволили исследовать только приконтурные зоны, в которых при симметричной форме эллипсоидов и центрировании с выработками. Отношение вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне № 1 составляет для подготовительной выработки 1,69 и для очистной – 1,66. При этом размеры зоны в горизонтальной плоскости были сильно завышенными как для подготовительной (3,25), так и для очистной (13,0) выработок.

4. Выполненные исследования зонального структурирования массива вокруг горных выработок с помощью широко применяемых лабораторных методов исследования не позволили установить точное количество, размеры и форму энергетических зон, выявить синусоидально затухающие напряжения и кольцевые области деформации. Разработка и применение новых методов моделирования позволит исследовать указанные параметры, формирующие и управляющие зональным структурированием массива вокруг выработок.

1. *Хоменко О.Е.* Моделирование на эквивалентных материалах выработанного пространства рудных шахт [Текст] / О.Е. Хоменко, В.В. Русских, М.Н. Кононенко // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 9. – С. 23–25.
2. *Хоменко О.Є.* Моделювання на еквівалентних матеріалах деформації масиву навколо первинних камер / О.Є. Хоменко, М.М. Кононенко // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 6. – С. 18–21.
3. *Хоменко О.Е.* Лабораторные исследования влияния размеров очистных камер на состояние отбиваемых слоев урановой руды / О.Е. Хоменко, Д.В. Мальцев // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 2. – С. 31–37.
4. *Zubko S.* Study of rock geomechanical processes while mining two-level interchamber pillars / V. Russkikh, A. Yavors'kyu, Ye. Chistyakov, S. Zubko // “Mining of mineral deposits”. – CRC Press / Balkema Taylor & Francis Group, London, UK. – 2013. – P. 149–152.
5. *Зубко С.А.* Исследование геомеханических процессов при отработке междукammerных целиков высотой в два этажа / В.В. Русских, С.А. Зубко, И.А. Карапа, А.В. Яворский // Научно-технический сборник. “Разработка месторождений”. – Д.: “ЛизуновПресс”. – 2013. – С. 247–254.
6. *Кайдо И.И.* Кластерная модель явления зональной дезинтеграции массива вокруг подземных выработок. – М.: МГГУ. – ГИАБ. – 2009. – №6. – С.48–57.
7. *Кайдо И.И.* О природе явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок (гипотеза). – М.: МГГУ. – ГИАБ. – 2009. – №1. – С. 16–21.

*О.Е. Хоменко, М.М. Кононенко, А.П. Дронов*

## **ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОНАЛЬНОГО СТРУКТУРУВАННЯ МАСИВУ НАВКОЛО ГІРНИЧИХ ВИРОБОК**

Мета роботи – дослідження зонального структурування масиву навколо гірничих виробок в лабораторних умовах. Основними методами виконання досліджень є методи еквівалентних, оптико-поляризаційних і електропровідних матеріалів. Межі зон визначалися щодо відповідності напружень величині  $\gamma_H$ . Результати досліджень параметрів зон на фізичних моделях довели можливість візуалізації зональної напруженості масиву, еліпсоїдну форму зон і їх центрування щодо виробок. Встановлено відношення вертикальних і горизонтальних півосей зон для підготовчих виробок і очисних камер, і визначена збіжність отриманих значень.

**Ключові слова:** лабораторні методи дослідження, напружено-деформований стан, структурування масиву навколо виробок, розміри півосей зон.



*O. Khomenko, M. Kononenko, A. Dronov*

## **LABORATORY RESEARCH OF ZONAL STRUCTURING OF MASSIF AROUND MINE WORKINGS**

Objective is research of zonal structuring of massif around mine workings. The main methods of research conducting are following: equivalent, optic-polarization and electrically conductive materials. Boundaries of zones were determined according to magnitude of stresses  $\gamma H$ . Results of research of zones parameters on physical models showed possibility of visualization of massif zonal stress, ellipsoid shape of zones and their centralization relatively to workings. Relations of vertical and horizontal semi-axes of zones for development workings and stoping chambers are established. Repeatability of received values is determined.

**Keywords:** laboratory research methods, stress-strain state, structuring of massif around mine workings, semi-axes sizes of zones.