

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНАЛЬНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ МАССИВА ВОКРУГ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

М. Кононенко^{1*}, О. Хоменко¹, А. Судаков², С. Дробот³, Ц. Лхагва⁴

¹Кафедра подземной разработки месторождений, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

²Кафедра техники разведки месторождений полезных ископаемых, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

³Государственный концерн "Ядерное топливо", Киев, Украина

⁴Отдел магистратуры и докторантуры, Монгольский университет науки и технологии, Улан-Батор, Монголия

*Ответственный автор: e-mail knn211179@gmail.com, тел. +380676626205

NUMERICAL MODELLING OF MASSIF ZONAL STRUCTURING AROUND UNDERGROUND WORKING

M. Kononenko^{1*}, O. Khomenko¹, A. Sudakov², S. Drobot³, Ts., Lkhagva⁴

¹Underground Mining Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

²Techniques Prospect of Deposits Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

³State Concern "Yaderne Palyvo", Kyiv, Ukraine

⁴Postgraduate Study Department, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

*Corresponding author: e-mail knn211179@gmail.com, tel. +380676626205

ABSTRACT

Purpose. To identify indicators of massif zonal structuring around underground working using numerical modeling techniques.

Methods. Research into massif zonal structuring was performed using finite element method and thermodynamic method by which the size and number of zones formed around development workings and stopes have been simulated.

Findings. The ratio of zones' vertical and horizontal semi axes in the massif has been established and reliability of the obtained results was determined. The prospects of new modeling techniques for the study of massif zonal structuring parameters around underground workings have been identified.

Originality. The opportunities for wide application of numerical simulation methods to study the phenomenon of zonal encapsulation by the massif of underground workings have been revealed.

Practical implications. The sizes and shapes of zones in the massif around workings were determined and requirements were formulated stating that synergetic research methods should allow to more accurately determine the number, size and shape of zones, as well as fading sinusoidal stress and massif strain domains.

Keywords: *finite element method, thermodynamic method, massif zonal structuring, rock massif*

1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Разработка месторождений полезных ископаемых в разнообразных условиях залегания характеризуется растрескиванием, расслоением, образованием заколов, обрушений, горных ударов и других форм проявления энергии горного давления. В основу большинства применяемых методов исследования этих явлений положен принцип зависимостей разных свойств горных пород с их напряженно-деформированным состоянием, которое происходит под воздействием естественных и искусственных энергетических полей (Shashenko, Garpieiev, & Solodyankin, 2009; Pellet, Roosefid, & Deleruyelle, 2009). Несмотря на многообразие применяемых методов исследова-

ния, средств диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массива, по функциональному назначению их объединяют в три класса: натурные (промышленные), физические (лабораторные) и аналитические (теоретические). В свою очередь классы подразделяются на группы (например, аналитические – на механики горных пород и синергетические), и далее на виды (сплошной среды, упругости, пластичности, ползучести, граничных разностей и элементов, конечных элементов, а также энтропийные, термодинамические и энергетические).

Метод конечных элементов, получивший сегодня достаточно широкое распространение, изначально разрабатывался для определения прочности проекти-

руемых и действующих конструкций (жилые здания, промышленные сооружения, детали машин) с заданными свойствами материалов (металл, бетон, железобетон). Моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород является обратной задачей, в которой отсутствует достоверная информация о свойствах массива, точных размерах выработок и целиков между ними при непрерывном протекании в массиве процессов деформирования (Falshtynskiy, Lozynskiy, Saik, Dychkovskiy, & Tabachenko, 2016). При этом современный уровень исследования физических свойств горных пород характеризуется применением синергетических методов, из которых самым апробированным является термодинамический метод (Lavrinenko & Lysak, 1980). Таким образом, необходимо оценить возможности методов конечных элементов и термодинамического метода на предмет выявления показателей зонального структурирование массива и на этой основе разработки требований к энтропийному и энергетическому исследованию.

2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В соответствии с классификацией, к теоретическим (аналитическим) методам исследования отнесены математические методы механики горных пород, которые основываются на положениях теории сплошной среды, теории упругости, пластичности и ползучести. Наиболее широко используемая группа математических методов – это аналитические методы теории упругости. Основное их преимущество заключается в том, что они дают реальную основу для понимания только геомеханических процессов, вызываемых образованием выработки. Основной недостаток – высокая степень идеализации горных пород до однородного изотропного или анизотропного массива с простейшей геометрией подземной конструкции, вследствие чего утрачиваются некоторые существенные особенности конкретных породных массивов.

С целью приближения модельных представлений к реальным условиям в механике горных пород используют аналитические методы теории пластичности и теории ползучести. Это позволяет достичь определенных результатов, однако практический выход сильно затруднен вследствие чрезвычайной идеализации строения рудо-породного массива и определения граничных условий. Помимо указанного, 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 упруго-пластичной и объемной постановках, что влекло применение сверхмощных компьютеров (Russkikh, Demchenko, Salli, & Shevchenko, 2013; Timoshuk, Demchenko, & Sherstuk, 2010). Невзирая на все усовершенствования, существующие численные методы и дополняющие их критерии прочности не позволяют точно определить границы зон разрядки и концентрации напряжений вокруг горных выработок, что ставит под сомнение достоверность полученных результатов в целом (Bondarenko, Symanovych, & Koval, 2012).

Метод конечных разностей – первый из численных методов, который является классическим приближением метода теории упругости, при котором искомые значения перемещений определяются в узловых точках, а производные – разностными соотношениями. Главным недостатком метода является чрезвычайная сложность применения для анализа напряженно-деформированного состояния неоднородных сред и индивидуальный подход к каждой задаче механики деформируемого твердого тела. Метод конечных элементов базируется на теории потенциала и теории интегральных сингулярных уравнений, в которых основой численной реализации является переход от функциональных интегральных соотношений к их алгебраическим аналогам.

С помощью метода возможно решение задач механики горных пород в плоской и объемной постановке. Однако в настоящее время практическое приложение метода практически отсутствует из-за недостаточной разработки программного обеспечения. Метод конечных элементов относится к вариационным методам и представляет собой обобщение метода Релея-Ритца-Галеркина. Сущность метода состоит в том, что искомую непрерывную величину аппроксимируют кусочным набором простейших функций, заданных над ограниченными конечными элементами, т.е. породный массив представляется в виде набора относительно больших конечных элементов, как правило, связанных между собой в отдельных узлах (Sdvyzhko, Babets, Kravchenko, & Smirnov, 2016; Marras et al., 2015).

Оценка прочностного состояния массива, в котором важным вопросом является выбор критерия сравнения действующих напряжений с предельно допустимыми их значениями. Имеются в виду различные теории феноменологической прочности: теория наибольших нормальных напряжений (критерий У.Д. Ренкина); теория наибольших касательных напряжений (критерий Ш. Кулона-А. Навье, критерий О. Мора и с учетом усовершенствований – Р. Гриффитса, Э. Хозькома, Г.Н. Кузнецова); интегральная оценка устойчивости пород Н.С. Бульчева и Н.Н. Фотиевой; критерий А. Гриффитса-У. Брейса; оценка интегральных характеристик массива, не зависящих от его локальных качеств (гидравлический радиус В.Д. Слесарева) и прочие. Адекватность выбора и применения критерия прочности ставит под сомнение результаты моделирования. Моделирование состояния массива вокруг подготовительных и очистных выработок выполнялось с помощью программного продукта “Plaxis”.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании состояния массива с помощью метода конечных элементов на контуре выработок получали стремящиеся к нулю нормальные и максимальные касательные напряжения (Рис. 1а, б). С удалением вглубь от обнажения массива нормальные напряжения увеличивались, а касательные уменьшались (Рис. 2а), что приводило к формированию разнонапряженных зон. Определение положения границ отдельных зон выполнялось по анализу изменения напряженности массива. Критерием определения места положения зон являлось значение напряженности массива, соответствующее величине γH , которое для метода конечных элементов выполнялось лишь условно.

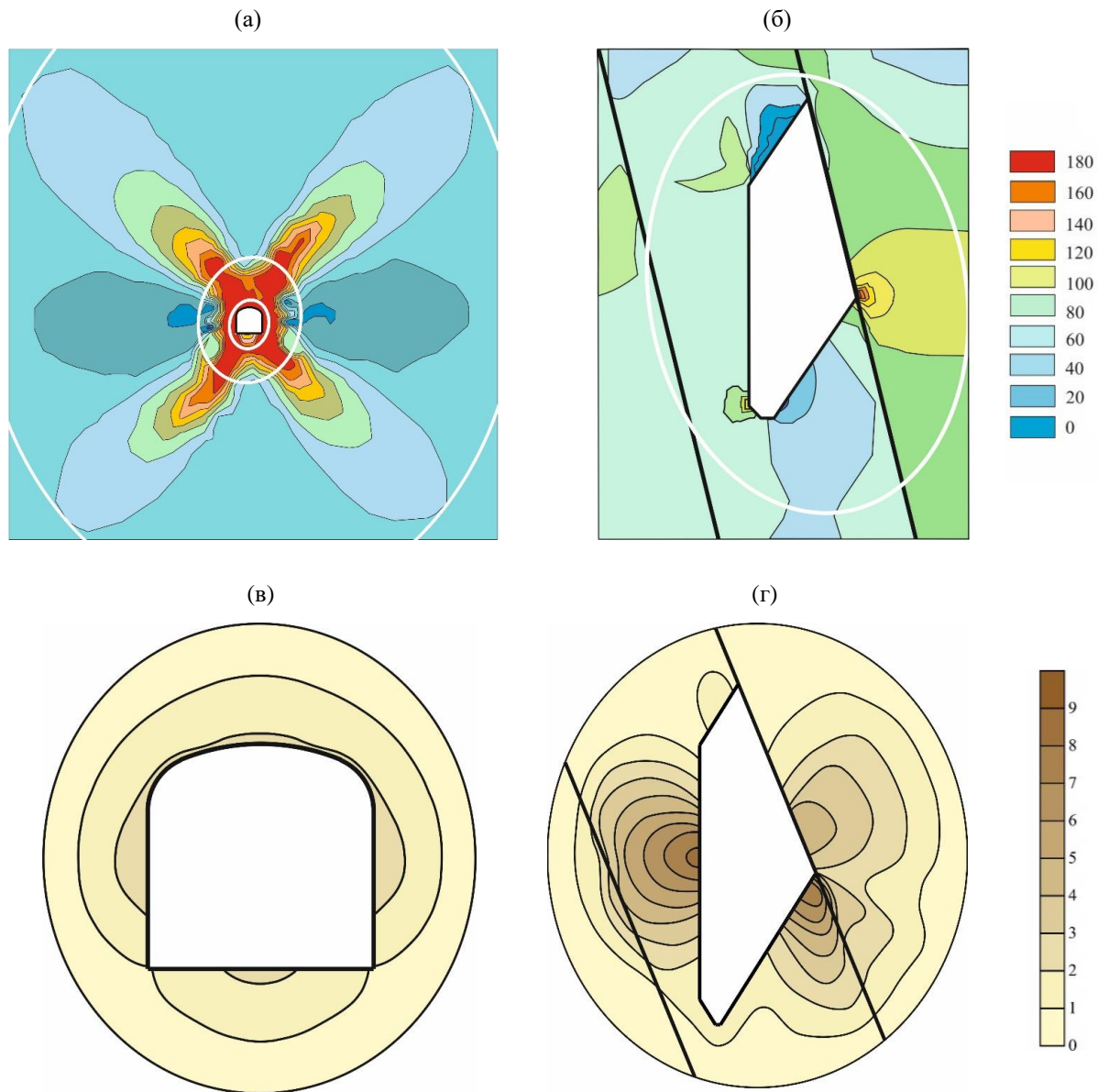


Рисунок 1. Развитие напряженно-деформированного состояния и формирование зон разгрузки и концентрации напряжений вокруг подготовительной выработки (а, в) и очистной камеры (б, г) на глубине 1000 м ЧАО “Запорожский ЖРК”, смоделированных методом конечных элементов (а, б; кН/м²) и термодинамическим методом (в, г; МПа)

Отношение вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне №1 составили для подготовительной выработки 1.75 и 1.50; в зоне №2 – 5.20 и 4.00; в зоне №3 – 32.57 и 20.00 соответственно, а для очистной – в зоне №1 – 1.30 и 3.25. Сходимость относительных размеров при моделировании зоны №1 составило 85.71%, зоны №2 – 76.92% и зоны №3 – 84.21% (Табл. 1) (Vladyko, Khomenko, & Kozlov, 2007).

Термодинамический метод рассматривает исследуемый массив горных пород в качестве термодинамической системы. Ее состояние определяется всеми физическими величинами, характеризующими макроскопические свойства (плотность, внутреннюю энергию, намагниченность и т.д.). Термодинамический метод, базируясь на фундаментальных законах физики, позволяет довольно точно установить оптимальные размеры и форму устойчивого обнажения массива на любой заданной глубине в конкретных

горно-геологических условиях залегания рудных тел. В общем случае задача сводится к последовательно определению потенциальных напряжений в ненарушенном массиве, физических свойств пород в условиях их залегания, напряженного состояния пород вокруг выработок.

Оценку напряженности горных пород производили по основным областям концентрации напряжений в массиве, окружающем подготовительные выработки или очистные камеры. Для подготовительных выработок основные области концентрации напряжений – это кровля, почва и бока выработки, а для очистных камер – породы висячего и лежащего боков, потолочина и днище. Далее исследовали величины напряжений с учетом изменения исследуемых параметров: глубина горных работ (глубина заложения выработок); физические свойства горных пород (прочность, устойчивость, разрушаемость); техноло-

гические параметры выработок (размеры, форма, конструктивное исполнение). Затем исследовали области возможного разрушения массива при моделировании глубины горных работ и физико-механических свойств. В методе уже заложен критерий прочности по определению областей возможного деформирования массива, путем сравнения реальных напряжений с предельно-допустимыми на растяжение и сдвиг (Рис. 1в, г).

Термодинамический метод имеет ряд преимуществ перед численными методами по причине его создания специально для моделирования параметров разработки рудных месторождений. Он позволяет производить расчет начального напряженного состояния массива, физических свойств горных пород на заданной глубине, а не принимать среднестатистические значения. Метод показывает, что реально существующие радиальные и тангенциальные напряжения по мере приближения к поверхности обнажения массива выработкой увеличиваются, и на ее контуре приобретают максимальные значения (Рис. 2б).

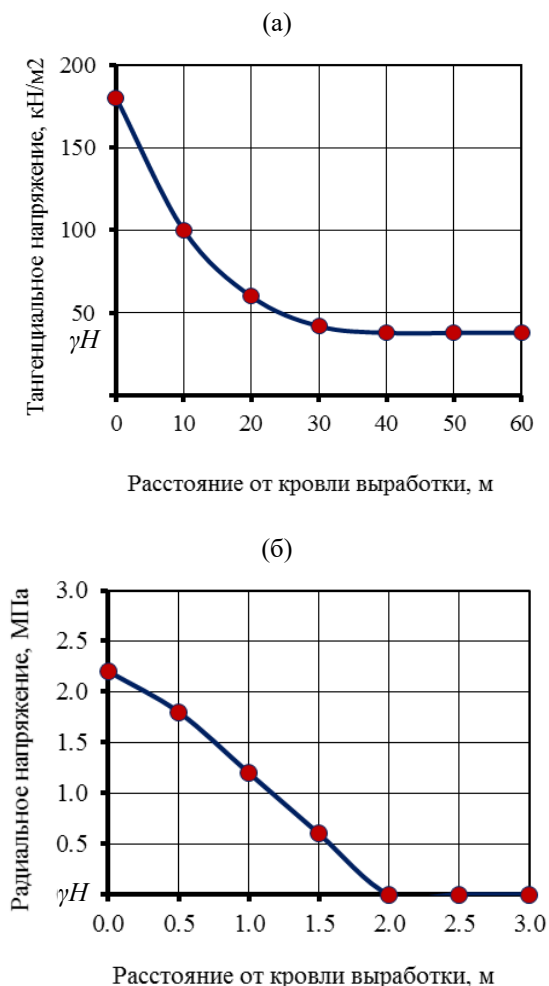


Рисунок 2. Характер изменения напряженности в массиве при моделировании состояния вмещающего массива методом конечных элементов (а) и термодинамическим методом (б) при проведении подготовительной выработки на глубине 1000 м

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 (разряжения) напряжений. Исследование состояния массива в зонах концентрации напряжений, процессов перераспределения нагрузки от толщи подработанных пород, процессов уравнивания энергии и развития зонального деформирования этим методом не представляется возможным (Табл. 1) (Khomenko, Kononenko, & Danylchenko, 2016).

Отношение вертикальных и горизонтальных полюсов в зоне №1 составляет для подготовительной выработки 2.05 и 1.90, а для очистной – 1.78 и 3.45. Сходимость относительных размеров при моделировании для зоны №1 – 92.68%. Относительная глубина разрушения массива $\left(\frac{U_n + 0.5h}{0.5h}\right)$ в зоне разгрузки при моделировании термодинамическим методом для подготовительных и очистных выработок находится в пределах 0.01 и 35.00.

Энтропийный метод – это одно из перспективных направлений исследований различных систем, который основывается на анализе изменений энтропии и динамики энергетических процессов, порождаемых изменением состояния открытых систем. В этом методе моделирование систем осуществляется с помощью отображения множества варьируемых значений в неслучайную функцию комплексного энтропийного потенциала. Вариации значений параметра моделируются как в пространстве, так и во времени. В качестве базового значения необходимо выбирать математическое ожидание параметра, диапазон его изменения, предельное или какое-либо номинальное значение. При таком определении величина энтропийного потенциала является обобщенной и унифицированной, на базе закона равномерной плотности энергии, характеристикой состояния неопределенности исследуемого параметра с любым другим законом распределения. Основы энтропийного метода заложил В.Ф. Лавриненко в рамках термодинамической теории. Для создания энтропийного метода нужна часть термодинамической теории требует доработки и расширения.

Далее на базе энтропийного метода, который определяет параметры ненарушенного массива горных пород и термодинамического метода, который моделирует состояние массива в приконтурной зоне (зоне разгрузки), разработан еще один – синергетический метод, которым является энергетический метод. Он позволяет моделировать состояние массива в энергетических зонах, которые формируют предохранительную капсулу, и описывать взаимодействие механической, термодинамической и других видов энергий.

Таблица 1. Размеры энергетических зон по результатам теоретического моделирования массива вокруг выработок

Метод	Вид выработки	Полуось энергетической зоны, $\frac{a_n}{0.5h}$ и $\frac{b_n}{0.5b}$					
		верти- кальная	горизон- тальная	верти- кальная	горизон- тальная	верти- кальная	горизон- тальная
		зона №1		зона №2		зона №3	
Конечных элементов	Подготовительная	1.75	1.50	5.20	4.00	23.75	20.00
	Очистная	1.30	3.25	γH	γH	γH	γH
Термодина- мический	Подготовительная	2.05	1.90	γH	γH	γH	γH
	Очистная	1.78	3.45	γH	γH	γH	γH

Механическая энергия раскрывает совокупность гравитационных и электромагнитных взаимодействий на уровнях макротел и проявляется при деформации, метаморфизме и деструкции вещественных геозергетических систем. Термодинамическая энергия является внутренней тепловой энергией атомно-молекулярных взаимодействий в твердых, жидких и газовых вещественных системах и характеризует движение атомов и молекул на физико-химических уровнях организации минералов, горных пород, геологических формаций и других геозергетических систем. Метод раскрывает понятие о естественных телах – геологических системах, которые не совпадают с понятием о термодинамических системах, поскольку первые представляют собой организованные системы, а вторые – бесструктурную статистическую совокупность (множество) однородных микрообъектов.

4. ВЫВОДЫ

Моделирование напряженности массива теоретическими методами, основным из которых является метод конечных элементов, показал, что на контуре выработок нормальные напряжения приближаются к нулю, а касательные – имеют максимальные значения, которые без адекватного критерия прочности далее не могут показать области возможного разрушения. Выявленное отношение вертикальных и горизонтальных полуосей в зоне №1 составляет для подготовительной выработки 1.75 и 1.50; в зоне №2 – 5.20 и 4.00; в зоне №3 – 23.75 и 20.00 соответственно, а для очистной в зоне №1 – 1.30 и 3.25.

Термодинамический метод показал, что по мере приближения к обнажению массива выработкой радиальные и тангенциальные напряжения увеличиваются, а на ее контуре приобретают максимальные значения. Отношение вертикальных и горизонтальных полуосей зоны №1 составляет для подготовительной выработки 2.05 и 1.90, а для очистной – 1.78 и 3.45. Главным недостатком метода является отсутствие возможности определения состояния массива за пределами зоны №1 (зоны разгрузки напряжений).

Выполненные исследования зонального структурирования массива вокруг горных выработок с помощью широко применяемых теоретических методов исследования не позволили установить точное количество, размеры и форму энергетических зон, выявить синусоидально затухающие напряжения и кольцевые области деформации. Усовершенствование существующего энтропийного метода как части

термодинамической теории и создание нового – энергетического – позволит исследовать указанные процессы и закономерности, формирующие и управляющие феноменом зонального капсулирования массивом подземных выработок.

БЛАГОДАРНОСТЬ

За предоставленные материалы и оказанную поддержку при проведении теоретических исследований с помощью термодинамического метода авторы выражают благодарность заведующему кафедры подземной разработки месторождений полезных ископаемых Государственного ВУЗ “Криворожский национальный университет” В.А. Калиниченку.

REFERENCES

- Bondarenko, V., Symanovych, G., & Koval, O. (2012). The Mechanism of Over-Coal Thin-Layered Massif Deformation of Weak Rocks in a Longwall. *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining 2012*, 41-44. <http://dx.doi.org/10.1201/b13157-8>
- Falshtynskiy, V., Lozynskiy, V., Saik, P., Dychkovskiy, R., & Tabachenko, M. (2016). Substantiating Parameters of Stratification Cavities Formation in the Roof Rocks during Underground Coal Gasification. *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 16-24. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.016>
- Khomenko, O., Kononenko, M., & Danylchenko, M. (2016). Modeling of Bearing Massif Condition during Chamber Mining of Ore Deposits. *Mining Of Mineral Deposits*, 10(2), 40-47. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.02.040>
- Lavrinenko, V.F., & Lysak, V.I. (1980). Napryazhennoe sostoyanie i fizicheskie svoystva porod v zonakh razgruzki vokrug gornykh vyrabotok. *Gornyy zhurnal*, (10), 29-32.
- Marras, S., Kelly, J.F., Moragues, M., Müller, A., Kopeira, M.A., Vázquez, M., & Jorba, O. (2015). A Review of Element-Based Galerkin Methods for Numerical Weather Prediction: Finite Elements, Spectral Elements, and Discontinuous Galerkin. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1007/s11831-015-9152-1>
- Pellet, F., Roosefid, M., & Deleruyelle, F. (2009). On the 3D Numerical Modelling of the Time-Dependent Development of the Damage Zone around Underground Galleries during and after Excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6), 665-674. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.07.002>
- Russkikh, V., Demchenko, Y., Salli, S., & Shevchenko, O. (2013). New Technical Solutions during Mining C₅ Coal Seam under Complex Hydro-Geological Conditions of Western Donbass. *Mining of Mineral Deposits*, 257-260. <http://dx.doi.org/10.1201/b16354-48>

Sdvyzhko, O., Babets, D., Kravchenko, K., Smirnov, A. (2016). Determination of the displacements of rock mass nearby the dismantling chamber under effect of plow longwall. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 34-42.

Shashenko, A., Gapieiev, S., Solodyankin, A. (2009). Numerical simulation of the elastic-plastic state of rock mass around horizontal workings. *Archives of Mining Sciences*, (54)2, 341-348.

Timoshuk, V., Demchenko, J., & Sherstuk, Y. (2010). The Role of Natural and Technogenic Components in Failure of Ge-

omechanical Stability of the Territories which are in the Influence Zone of Mining Objects. *New Techniques and Technologies in Mining*, 189-192.
<http://dx.doi.org/10.1201/b11329-31>

Vladyko, O., Khomenko, O., & Kozlov, S. (2007). Prognozirovanie ustoychivosti oчитnykh kamer v usloviyakh fil'tratsii dlya ZAO "Zaporozhskiy zhelezorudnyy kombinat" *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 13-15.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Выявить показатели зонального структурирования массива вокруг подземных выработок с помощью численных методов моделирования.

Методика. Исследование зонального структурирования массива выполнялось методом конечных элементов и термодинамическим методом, с помощью которых смоделированы размеры и количество зон, формирующихся вокруг подготовительных и очистных выработок.

Результаты. Установлено отношение вертикальных и горизонтальных полуосей зон в массиве и определена достоверность полученных результатов. Раскрыты перспективы создания новых методов моделирования для исследования параметров зонального структурирования массива вокруг подземных выработок.

Научная новизна. Раскрыты возможности широко применяемых численных методов моделирования для исследования феномена зонального капсулирования массивом подземных выработок.

Практическая значимость. Установлены размеры и форма зон в массиве вокруг выработок и определены требования к синергетическим методам исследования, заключающиеся в возможностях более точного определения количества, размеров и формы зон, а также синусоидально-затухающих напряжений и кольцевых областей деформаций массива.

Ключевые слова: метод конечных элементов, термодинамический метод, зональное структурирование массива, горный массив

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Виявити показники зонального структуривання масиву навколо підземних виробок за допомогою чисельних методів моделювання.

Методика. Дослідження зонального структуривання масиву виконувалося методом кінцевих елементів і термодинамічним методом, за допомогою яких змодельовані розміри та кількість зон, які формуються навколо підготовчих й очисних виробок.

Результати. Встановлено відношення вертикальних і горизонтальних напіввісей зон у масиві та визначена достовірність отриманих результатів. Розкрито перспективи створення нових методів моделювання для дослідження параметрів зонального структуривання масиву навколо підземних виробок.

Наукова новизна. Розкрито можливість широко застосованих чисельних методів моделювання для дослідження феномена зонального капсулювання масивом підземних виробок.

Практична значимість. Встановлено розміри і форму зон у масиві навколо виробок та визначено вимоги до синергетичних методів дослідження, що полягають у можливості більш точного визначення кількості, розмірів і форми зон, а також синусоїдально-згасаючих напружень та кільцевих областей деформацій масиву.

Ключові слова: метод кінцевих елементів, термодинамічний метод, зональне структуривання масиву, гірський масив

ARTICLE INFO

Received: 27 June 2016

Accepted: 14 September 2016

Available online: 30 September 2016

ABOUT AUTHORS

Maksym Kononenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/58, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: kmn211179@gmail.com

Oleh Khomenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/58, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: koordin@rudana.in.ua

Andrii Sudakov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Techniques Prospect of Deposits Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 9/401, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: sudakovy@ukr.net

Serhii Drobot, General Director, State Concern "Yaderne Palyvo", 34 Khreshchatyk St, 01001, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@nfuel.gov.ua

Tsendjav Lkhagva, Employee of Postgraduate Study Department, Mongolian University of Science and Technology, 8th khoroo, Baga toiruu 34, 14191, Ulaanbaatar, Mongolia. E-mail: khagva01@yahoo.com