

УДК 622.273.217.4

**Петлёванный М.В., к.т.н, доцент кафедры подземной разработки месторождений**  
(НТУ «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина)

**Павлов Д.В., студент кафедры подземной разработки месторождений**  
(НТУ «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА ПРИ ЕГО РАЗНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВАХ**

Мировой опыт горнодобывающей промышленности показывает, что при освоении месторождений ценных руд высокоэффективным является применение технологий разработки с закладкой выработанного пространства. Такие свойства как незначительная усадка закладочного массива, более высокая его прочность, а также низкий коэффициент фильтрации позволили при проектировании закладочных работ отдавать предпочтение твердеющей закладке [1, 2]. В Украине единственное предприятие, применяющее технологию разработки с твердеющей закладкой, является ПИИ ЧАО «Запорожский железорудный комбинат», осуществляющее добычу богатых железных руд Южно-Белозерского месторождения [2, 3] в сложных условиях, где ведение горных работ затрудняется в связи со снижением их прочностных характеристик [4]. При таких системах разработки извлечение рудных запасов по площади шахтного поля чередуется с закладочными работами, отстающими от очистных камер первой очереди, на время, необходимое для затвердения искусственного массива. Очистные камеры второй очереди отработки рудных запасов находятся в окружении руды и закладки камер первой очереди [5, 6]. Для того, чтобы закладочный массив из твердеющей был устойчив при постоянном увеличении глубины разработки, необходимо, чтобы напряжения, возникающие в нем, не превышали критические, приводящие к разрушению. Прочностные свойства искусственного массива зависят от состава смеси и внутренних связей между компонентами, способными противостоять растягивающим и сжимающим напряжениям на контуре площади обнажения [7, 8]. Исследование напряженного состояния закладочного массива выполнялось многими зарубежными учеными [9, 10], однако исследованиям напряженности закладочного массива при разных упругих свойствах в литературных источниках уделено недостаточно внимания.

В связи с тем, что при отработке камер второй очереди наблюдаются разрушения закладочного массива [11-13], то для достижения его устойчивого состояния предполагается исследовать изменение напряженного состояния при различных физико-механических свойствах, а именно модуль упругости (Юнга), существенно влияющий на формирование поля напряжений в закладочном массиве. Кроме того, необходимо также исследовать влияние глубины разработки для рационального проектирования свойств закладки при углублении горных работ.

Задача исследования напряженного состояния закладочного массива, окружающего камеру второй очереди, решалась методом конечных элементов при помощи программного пакета SolidWorks 2016 посредством построения и исследования геомеханической модели разномодульного массива. Геотехнологические условия разработки залежи и физико-механические свойства руды, пород и закладки принимались на основании предыдущих работ автора [14, 15]. По данным практики закладочных работ модуль упругости твердеющей закладки колеблется в пределах 600 – 1500 МПа. В компьютерной модели присутствуют как постоянные физико-механические свойства, так и переменные: глубина заложения камеры (790, 890, 990, 1090 м), прочность пород (const), плотность (const), коэффициент Пуассона (const), модуль упругости пород и руды (const), модуль упругости закладки (600, 800, 1000, 1200 МПа). Всего выполнено 16 вычислительных экспериментов. Задача решалась в упругой постановке, напряженное состояние анализировалось по полученным эпюрам вертикальных и горизонтальных напряжений. Согласно проведенному моделированию, получены следующие результаты:

– установлены закономерности изменения максимальных разрушающих напряжений в зонах пониженной устойчивости закладочного массива в зависимости от его упругих свойств и глубины разработки;

– установлено, что с увеличением глубины разработки, несмотря на повышение модуля упругости закладки, величины напряжений увеличиваются; то есть не имеет смысла с глубиной повышать упругие свойства закладочного массива, что способствует его хрупкому разрушению, а придавать ему вязкопластические свойства.

### Перечень ссылок

1. Битимбаев, М.Ж., Крупник, Л.А., & Шапошник, Ю.Н. (2012). *Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых*. Алматы: Изд. Ассоциации ВУЗов РК.

2. Кузьменко, А.М., Петлёванный, М.В., & Усатый, В.Ю. (2015). *Твердеющая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях*. Днепропетровск: Национальный горный университет.

3. Кузьменко, А.М., & Петлёванный, М.В. (2013). Состояние и перспективы развития закладочных работ на подземных рудниках Украины. *Геотехнічна механіка*, (110), 89-97.

4. Lozynskiy, V., Saik, P., Petlovanyi, M., Sai, K., & Malanchyk, Ye. (2018). Analytical research of the stress-deformed state in the rock massif around faulting. *International Journal of Engineering Research in Africa*, (35), 77-88. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.35.77>

5. Khomenko, O., Kononenko, M., & Petlovanyi, M. (2015). Analytical modeling of the backfill massif deformations around the chamber with mining depth increase. *New Developments in Mining Engineering*, 265-269. <https://doi.org/10.1201/b19901-47>

6. Кузьменко, А.М., & Петлеваний, М.В. (2014). Влияние структуры горного массива и порядка отработки камерных запасов на разубоживание руды. *Геотехническая механика*, (118), 37-45.

7. Kuz'menko, O., Petlyovanyu, M., & Stupnik, M. (2013). The influence of fine particles of binding materials on the strength properties of hardening backfill. *Mining of Mineral Deposits*, 45-48. <https://doi.org/10.1201/b16354-10>

8. Петлёванный, М.В. (2012). Повышение устойчивости закладочного массива из твердеющей закладки при добыче руды на глубоких горизонтах. *Геотехническая механика*, (98), 287-296.

9. Emad, M.Z. (2017). Numerical modelling approach for mine backfill. *Sādhanā*, 42(9), 1595-1604. <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0702-0>

10. Bagde, M.N., & Mitri, H.S. (2012). Numerical analysis of backfill failure due to adjacent stope mining. *Proceedings of the International Conference on Ground Improvement & Ground Control*. [https://doi.org/10.3850/978-981-07-3560-9\\_07-0706](https://doi.org/10.3850/978-981-07-3560-9_07-0706)

11. Kuzmenko, O., & Petlovanyi, M. (2017). Interrelation of structural changes of the enclosing massif with sustainability of extraction chamber during iron ore deposit development. *Journal of Donetsk Mining Institute*, (2), 56-61. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-2-56-61>

12. Кузьменко, А.М., & Петлёванный, М.В. (2017). Разрушение закладочного массива в зависимости от технологии его возведения. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (52), 159-166.

13. Кузьменко, А.М., & Петлёванный, М.В. (2017). Влияние природных и технологических факторов на устойчивость пород и закладочного массива при их обнажении в очистных камерах. *Геотехническая механика*, (132), 62-73.

14. Petlovanyi, M. (2016). Influence of configuration chambers on the formation of stress in multi-modulus mass. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 48-54. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.048>

15. Кузьменко, О.М., & Петльований, М.В. (2017). Стійкість штучного масиву при підземній розробці потужного рудного покладу на великій глибині. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (50), 56-62.