

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА ПРИ КАМЕРНОЙ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ РУД

О. Хоменко<sup>1\*</sup>, М. Кононенко<sup>1</sup>, М. Данильченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кафедра подземной разработки месторождений, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

\*Відповідальний автор: e-mail [koordin@rudana.in.ua](mailto:koordin@rudana.in.ua), тел. +380679506635

## MODELING OF BEARING MASSIF CONDITION DURING CHAMBER MINING OF ORE DEPOSITS

O. Khomenko<sup>1\*</sup>, M. Kononenko<sup>1</sup>, M. Danylchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Underground Mining Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail [koordin@rudana.in.ua](mailto:koordin@rudana.in.ua), tel. +380679506635

### ABSTRACT

**Purpose.** To examine rock mass stress changes in hanging wall and footwall rocks of the deposit during mining of primary and secondary stoping chambers.

**Methods.** Analytical research into stress-strain state around stoping chambers was executed with the help of thermodynamical method that gives the highest convergence of calculated elastic deformations and those measured in the mine.

**Findings.** Regularities of stress field formations in the mass of stoping chambers unloading zones are specified. The main areas of stresses concentration located in hanging wall and footwall rocks, in ore mass and backfilling are determined. The shape of radial stress isolines around stoping chambers tends towards ellipsoid. The stress level of mass around hanging wall and footwall rocks, in unloading zones of stoping chambers changes according to exponential dependences relating to the distance from ore deposit.

**Originality.** Consists in capitalizing on the rock mass weakening effect which hosts primary and secondary stoping chambers for using rock stress value for determination of development workings site.

**Practical implications.** The stress level of rocks around stoping chambers is defined and empirical dependencies of radial stresses values alterations in terms of changes of mining depth and proximity from ore deposit contour are specified.

**Keywords:** *theoretical research, mass unloading zone, stress-strain state, chambers of primary and secondary mining stage, radial stresses*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На территории Украины располагаются до 20% мировых запасов железной руды, а в мировом производстве этот объем составляет около 5%. По запасам железорудного сырья Украина занимает первое место, а по объемам производства – седьмое. Основным железорудным сырьем, которое производится отечественными предприятиями является железная руда, железорудный концентрат, окатыши и агломерат (Tsaruk, 2014). Производственные мощности страны позволяют обеспечить сырьем как отечественные металлургические заводы, так и экспортировать значительную часть продукции в страны Европейского союза и Азии. Странами-импортерами украинской железной руды являются Польша, Чехия, Словакия, Австрия, Румыния, Сербия и Китай.

Основными месторождениями железной руды в Украине являются Криворожский железорудный бассейн, Кременчугский железорудный район, Белозерский железорудный район, Конкский район магнитных аномалий, Приднепровский железорудный район, Приазовский железорудный район, Одесско-Белоцерковский железорудный район и Керченский железорудный бассейн. Из перечисленных месторождений железных руд в настоящее время открытым и подземным способами разрабатываются Криворожско-Кременчугская железорудная зона (бассейн) и подземным способом Белозерский железорудный район. Руды Криворожского бассейна разрабатываются 9 карьерами и 7 шахтами, Кременчугский железорудный район – 2 карьерами, Белозерский железорудный район – 2 шахтами. Важное значение для горнорудной промышленности страны имеет Бело-

зерский железорудный район, в который входят Северо-Белозерское, Южно-Белозерское и Переверзевское месторождения. Порядка 60% запасов этих месторождений составляют богатые руды с содержанием более 60% железа и не требующих обогащения. Освоение месторождений ведет частное акционерное общество “Запорожский железорудный комбинат” (Kononenko & Khomenko, 2010).

Добыча богатых железных руд Южно-Белозерского месторождения осуществляется с помощью камерной системы разработки с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями (закладкой). Сущность данного варианта системы разработки заключается в том, что отработка запасов руды этажа производится вкрест простирания с помощью очистных камер первой и второй очередей отработки. Для выполнения подготовительно-нарезных работ очистных камер на поэтажных и откаточных горизонтах проводят 8 полевых штреков в породах лежачего и висячего боков, общей протяженностью до 240 м. Расстояние от контакта руды до полевых штреков составляет 30 – 35 м и основывается на производственном опыте с целью достижения технологических удобств. Ведение очистных работ в камерах оказывает влияние на устойчивость полевых штреков и способствует проявлению горного давления в виде разрушения крепи, вывалов, отслоения и обрушения пород в штреках. Таким образом, исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород вблизи очистных камер, в которых проводятся подготовительные полевые выработки, имеет актуальное значение.

## **2. АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Проведенные исследования напряженно-деформированного состояния массива пород для отработки очистных камер в условиях Южно-Белозерского месторождения позволили установить параболические зависимости изменения радиальных напряжений при удалении от камер второй очереди отработки вглубь закладочного массива. Выявлены основные области концентрации напряжений, которые располагаются в породах лежачего бока, в массиве руды и закладки камер первой очереди отработки. В работе не рассматривалось напряженно-деформированное состояние массива горных пород вокруг камер первой очереди отработки, что не позволяет определить напряжения в породах висячего бока (Khomenko, Kononenko & Petlyovany, 2014).

Исследователями Научно-исследовательского горнорудного института Государственного высшего учебного заведения “Криворожский национальный университет” (НИГРИ ГВУЗ “КНУ”) проведены натурные исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и устойчивость конструктивных элементов этажно-камерной системы разработки, выполненные в условиях ЧАО “ЗЖРК” в пределах глубин 325 – 640 м (Chistyakov, Bliznyukov, Moshinskiy & Maluy, 2000). Установлено, что горное давление в очистных камерах проявляется в виде сводообразования и вывалов, а также псевдопластических деформаций приконтурного массива.

При проведении горных выработок зоны интенсивного нарушения достигают порядка 1.0 – 1.5 м, при этом несущая способность законтурного массива снижается в 3 – 5 раз. Полученные результаты натурных исследований дают качественную картину поведения массива горных пород в диапазоне глубин 325 – 640 м. Но при отработке месторождения ниже 640 м изменяются параметры конструктивных элементов этажно-камерной системы разработки, вследствие чего необходимо проводить дальнейшие исследования на глубине более 640 м.

Исследованиям напряженно-деформированного состояния в породах лежачего и висячего боков очистных камер горизонтов 740, 840 и 940 м и влияние их на устойчивость буровых выработок, расположенных вблизи очистного пространства посвящена работа (Vladyko, Kononenko & Khomenko, 2012). Выполненные исследования позволили установить экспоненциальную зависимость изменения напряжений очистных камер с изменением глубины их заложения, а также получены эмпирические зависимости величины деформаций для разной глубины заложения камер, которые позволяют определить размер и форму зон разрушающих деформаций влияющих на устойчивость буровых выработок. В представленных исследованиях не рассматривается влияние напряженно-деформированного состояния массива вокруг камер первой и второй очередей отработки на устойчивость полевых откаточных штреков.

Результатами исследования поведения массива горных пород, выполненные на моделях из эквивалентных материалов, установлено, что искусственный массив не претерпевает деформаций и сохраняет устойчивость (Falshtynskyy, Dychkovskyy, Lozynskyy & Saik, 2012). Наблюдаются разрушения массива модели со стороны пород висячего бока на расстояние до 0.17 м, что составляет порядка 40 м в натуральных условиях. Зафиксированы трещинообразование в массиве модели у наклонного днища камеры. Проведенные исследования дают качественную картину деформации массива модели вокруг очистной камеры и обуславливают необходимость проведения дальнейших исследований по выявлению областей деформаций пород лежачего бока (Russkikh, Yavors'kyu, Chistyakov & Zubko 2013).

На основе проведенного анализа в области разработки рудных месторождений при помощи камерных систем и их влияния на массив горных пород позволил сделать следующий вывод, что применение камерных систем разработки для отработки крутопадающих залежей железных руд обуславливает необходимость оценки напряженно-деформированного состояния вокруг очистных камер и его влияние на устойчивость массива горных пород, на глубинах 840 – 1040 м.

## **3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Для исследования напряженно-деформированного состояния массива вокруг камер первой и второй очередей отработки выполняли выбор наиболее целесообразного аналитического метода, который направлен на применение синергетического подхода (Khomenko, Kononenko & Netecha, 2016; Zeng, Sui &

Shen, 2014). Анализ теоретических методов исследования позволили выбрать наиболее целесообразный метод – термодинамический, разработанный в ГВУЗ “КНУ”, что дает наиболее высокую сходимость (85 – 90%) расчетных и непосредственно измеряемых

упругих деформаций (Lavrinenko & Lysak, 1993). Проведение аналитических исследований выполняли согласно разработанным расчетным схемам моделирования термодинамических процессов в массиве горных пород, вмещающим очистные камеры (Рис. 1).

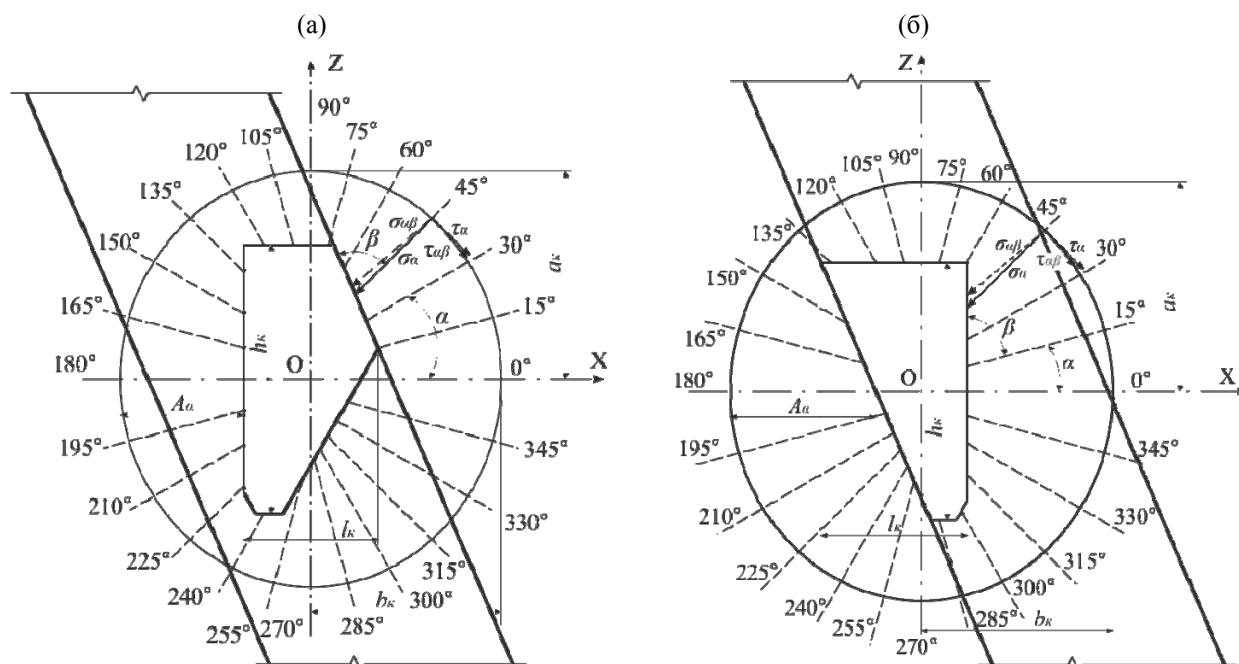


Рисунок 1. Расчетные схема моделирования термодинамических процессов, протекающих во вмещающем массиве камер первой (а) и второй (б) очереди отработки запасов руд

Целью выполняемых исследований является изучение напряженности массива пород всياчего и лежачего боков, окружающих камеры первой и второй очереди отработки. Основными задачами моделирования являются исследование полей напряжений вокруг камер и выявление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния пород в массиве зон разгрузки, сформированных вокруг камер первой и второй очереди отработки запасов руд. Разработанный НИГРИ ГВУЗ “КНУ” и внедренный на комбинате в 2001 году новый вариант этажно-камерной системы разработки с твердеющей закладкой характеризуется измененной формой очистных камер вкрест простирания залежи. Залежь делят на две очистные камеры – первой и второй очереди отработки запасов руд.

В качестве примера рассмотрим формирование полей напряжений в массиве вокруг камер первой очереди отработки, которые в свою очередь являются среднестатистическими очистными камерами горизонтов 840, 940 и 1040 м. К моделированию принимали очистные камеры с усредненными геотехническими условиями (глубина расположения очистной камеры  $H = 840, 940$  и  $1040$  м, угол падения залежи  $\alpha = 67^\circ$ , горизонтальная мощность залежи  $m = 90$  м, прочность руды на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} = 70$  МПа, прочность горных пород всياчего бока на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} = 120$  МПа, прочность горных пород лежачего бока на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} = 90$  МПа, прочность закладочного массива на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} = 50, 55$  и  $60$  МПа) соответственно глубине размещения

камеры, а также с минимальными и максимальными геотехническими условиями (прочность руды на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} = 60 - 80$  МПа прочность горных пород всячего бока на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} = 90 - 140$  МПа, прочность горных пород лежачего бока на одноосное сжатие  $\sigma_{сж} = 80 - 100$  МПа).

Основные области концентрации напряжений, формирующиеся в массиве зоны разгрузки, присущи как радиальным (нормальным)  $\sigma_r$ , так и тангенциальным (касательным)  $\tau_r$  напряжениям. Последние характеризуются меньшими значениями напряжений. Оба вида напряжений формируют напряженно-деформированное состояние массива горных пород. Отношение между предельными напряжениями растяжения  $\sigma_p$  и сдвига  $\tau_p$  принимаем равным  $\sigma_p = 0.9\tau_p$ . Следовательно, оценка напряженно-деформированного состояния производилась по максимальным напряжениям, действующим в массиве пород – радиальным  $\sigma_r$  (Рис. 2).

Из Рисунка 2 видно, что основные области концентрации напряжений располагаются в породах всячего и лежачего боков, в массиве руды и закладки. Во всех областях действуют растягивающие напряжения. Напряжения в них изменяются по экспоненциальным зависимостям. Значения напряжений в массиве возрастают от границы зоны разгрузки в направлении обнажения массива очистной камерой. Первая область растягивающих напряжений расположена в породах всячего бока на уровне геометрического центра камеры. Ее размеры составляют при глубине заложения камеры  $840$  м –  $52$  м,  $940$  м –  $51.2$  м и  $1040$  м –  $50.7$  м.

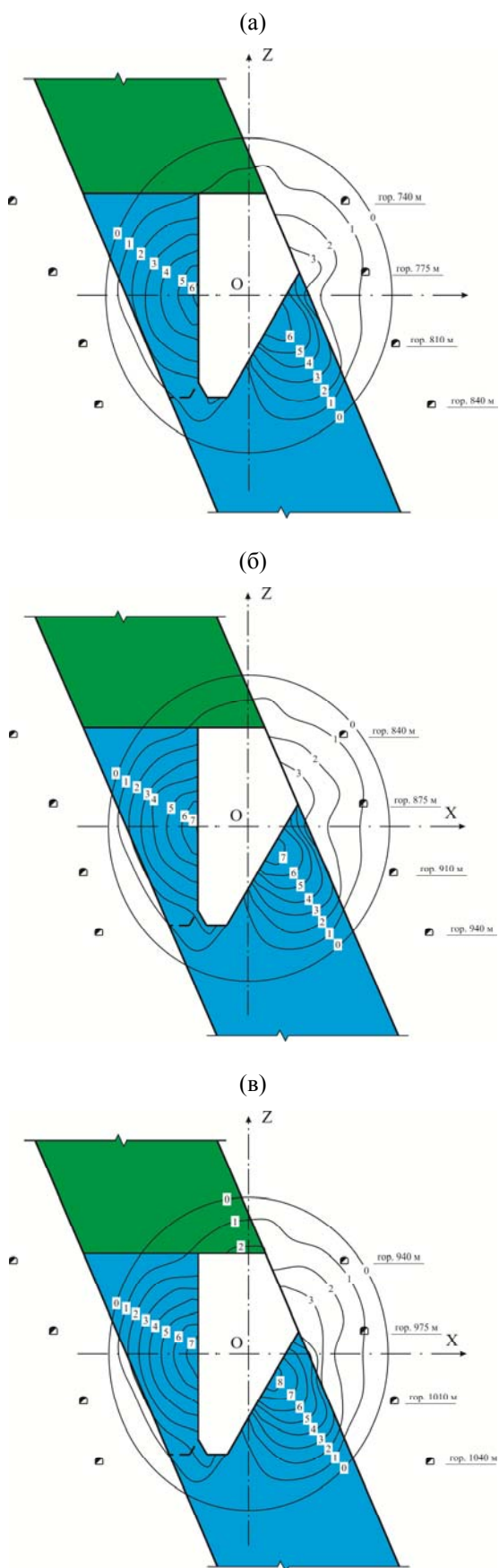


Рисунок 2. Изолинии радиальных напряжений  $\sigma_r$  (МПа) в массиве, окружающем камеры первой очереди отработки запасов вкост простирания залежи на горизонтах 840 м (а), 940 м (б) и 1040 м (в)

Величина максимального растягивающего напряжения с увеличением глубины разработки возрастает с 5.2 до 6.6 МПа и составляет порядка 3.4  $\gamma H$ . Форма изолиний – эллипсоидная. Вторая область растягивающих напряжений расположена в породах висячего бока и закладке, непосредственно в кровле камеры. Ее размеры с увеличением глубины разработки возрастают с 27 до 28 м. Величина максимального растягивающего напряжения при глубине заложения камеры 840 м составляет 1.7 МПа, 940 м – 1.9 МПа и 1040 м – 2.3 МПа или порядка 1.8  $\gamma H$ . Форма изолиний – эллипсоидная. Третья область растягивающих напряжений расположена в породах лежащего бока и в рудном массиве очистной камеры второй очереди отработки. Ее размеры составляют при глубине заложения камеры 840 м – 46 м, 940 м – 45 м и 1040 м – 44 м. Величина максимального растягивающего напряжения с увеличением глубины разработки возрастает с 6.3 до 7.8 МПа и составляет порядка 3.9  $\gamma H$ . Форма изолиний – эллипсоидная, плавно примыкающая к днищу камеры. Четвертая область растягивающих напряжений расположена в породах висячего бока и в рудном массиве у наклонного днища очистной камеры. Ее размеры с увеличением глубины разработки возрастают с 45.5 до 46.1 м. Величина максимального растягивающего напряжения при глубине заложения камеры 840 м составляет 1.1 МПа, 940 и 1040 м – 1.3 МПа или порядка 1.5  $\gamma H$ . Форма изолиний – эллиптическая, плавно соединяющаяся с изолиниями в породах висячего бока.

В результате выполненного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг камер первой очереди отработки необходимо определить действующие напряжения в породах висячего бока залежи. Общую картину увеличения напряженно-деформированного состояния в породах висячего бока, можно наблюдать по изменению максимальных радиальных напряжений с уменьшением расстояния от контура рудной залежи (Рис. 3).

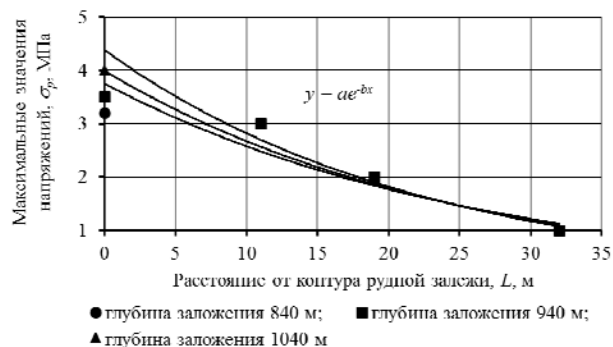


Рисунок 3. Изменение максимальных напряжений в породах висячего бока, действующих вокруг камер первой очереди отработки с увеличением расстояния от контура рудной залежи

Проведя аппроксимацию максимальных значений, получены эмпирические уравнения зависимостей радиальных напряжений от расстояния до рудной залежи.

Для массива пород всячего бока окружающего камеры первой очереди отработки, зависимости имеют вид:

– для этажа 740 – 840 м:

$$\sigma_p = 3.8 \cdot e^{-0.038 \cdot L}, \quad (1)$$

где:

$L$  – расстояние от рудной залежи в сторону пород всячего бока;

– для этажа 840 – 940 м:

$$\sigma_p = 4 \cdot e^{-0.04 \cdot L}; \quad (2)$$

– для этажа 940 – 1040 м:

$$\sigma_p = 4.4 \cdot e^{-0.044 \cdot L}. \quad (3)$$

Таким образом, на всех трех этажах 740 – 840, 840 – 940 и 940 – 1040 м область растягивающих напряжений  $\sigma_p$  в породах всячего бока изменяется по экспоненциальному закону, который имеет вид:

$$\sigma_p = a \cdot e^{-b \cdot L}, \quad (4)$$

где:

$a$  и  $b$  – данные числа, содержащие известные величины.

Каждое из этих данных значений изменяется с глубиной ведения очистных работ по следующим закономерностям:

$$a = 0.003 \cdot H + 1.25; \quad (5)$$

$$b = 0.0004 \cdot H^{0.7}, \quad (6)$$

где:

$H$  – глубина ведения очистных работ.

Подставив уравнения (5) и (6) в выражение (4), получим формулу, определяющую область растягивающих напряжений в породах всячего бока с учетом глубины заложения очистной камеры и расстояния до контура рудной залежи, которая имеет вид

$$\sigma_p = (0.003 \cdot H + 1.25) \cdot e^{-0.0004 \cdot L \cdot H^{0.7}}. \quad (7)$$

Исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород, вмещающего очистные камеры первой очереди отработки позволило выявить закономерности развития полей напряжений в массиве зон разгрузки очистных камер и определить изменение уровня напряженности массива пород всячего бока в зонах разгрузки очистных камер первой очереди отработки, которые изменяются от расстояния до рудной залежи по экспоненциальным зависимостям. Исследование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива позволило получить формулу, определяющую область растягивающих напряжений в породах всячего бока с учетом глубины заложения очистной камеры первой очереди отработки, и расстояния до контура рудной залежи. Поэтому при определении степени влияния на устойчивость полевых выработок всячего бока необходим точный учет распро-

странения напряженно-деформированного состояния очистными камерами первой очереди отработки.

Далее рассмотрим формирование полей напряжений в массиве вокруг камер второй очереди отработки, которые являются среднестатистическими очистными камерами гор. 840, 940 и 1040 м. К моделированию принимались очистные камеры с усредненными геотехническими условиями аналогичными, как и для камер первой очереди отработки (Рис. 4).

Из Рисунка 4 видно, что основные области концентрации напряжений располагаются в породах лежащего бока, в массиве руды и закладки. Во всех областях действуют растягивающие напряжения. Напряжения в них изменяются по экспоненциальным зависимостям. Значения напряжений в массиве возрастают от границы зоны разгрузки в направлении обнажения массива очистной камерой. Первая область растягивающих напряжений расположена в рудном массиве и массиве закладки очистной камеры первой очереди отработки на уровне геометрического центра камеры. Ее размеры составляют при глубине заложения камеры 840 м – 56.1 м, 940 м – 55.5 м и 1040 м – 54.9 м. Величина максимального растягивающего напряжения с увеличением глубины разработки возрастает с 3.9 до 5.1 МПа и составляет порядка 2.8  $\gamma H$ .

Форма изолиний – эллипсоидная, плавно примыкающая к днищу камеры. Вторая область растягивающих напряжений расположена в закладке, непосредственно в кровле камеры. Ее размеры с увеличением глубины разработки возрастают с 31.1 до 32 м. Величина максимального растягивающего напряжения при глубине заложения камеры 840 м составляет 2 МПа, 940 м – 2.1 МПа и 1040 м – 2.6 МПа или порядка 1.9  $\gamma H$ . Форма изолиний – эллипсоидная. Третья область растягивающих напряжений расположена в породах лежащего бока. Ее размеры составляют при глубине заложения камеры 840 м – 56.1 м, 940 м – 55.5 м и 1040 м – 54.9 м. Величина максимального растягивающего напряжения с увеличением глубины разработки возрастает с 3.3 до 4.2 МПа и составляет порядка 2.5  $\gamma H$ . Форма изолиний – эллипсоидная. Четвертая область растягивающих напряжений расположена в рудном массиве у днища очистной камеры. Ее размеры с увеличением глубины разработки возрастают с 39.3 до 40.1 м. Величина максимального растягивающего напряжения при глубине заложения камеры 840 м составляет 3.2 МПа, 940 м – 3.5 МПа и 1040 м – 3.7 МПа или порядка 2.4  $\gamma H$ . Форма изолиний – эллиптическая, плавно соединяющаяся с изолиниями в массиве закладки камеры первой очереди отработки.

В результате выполненного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг камер второй очереди отработки значительный интерес представляют возникающие напряжения в породах лежащего бока. Общую картину увеличения напряженно-деформированного состояния в породах лежащего бока, можно наблюдать по изменению максимальных радиальных напряжений с уменьшением расстояния от контура рудной залежи (Рис. 5).



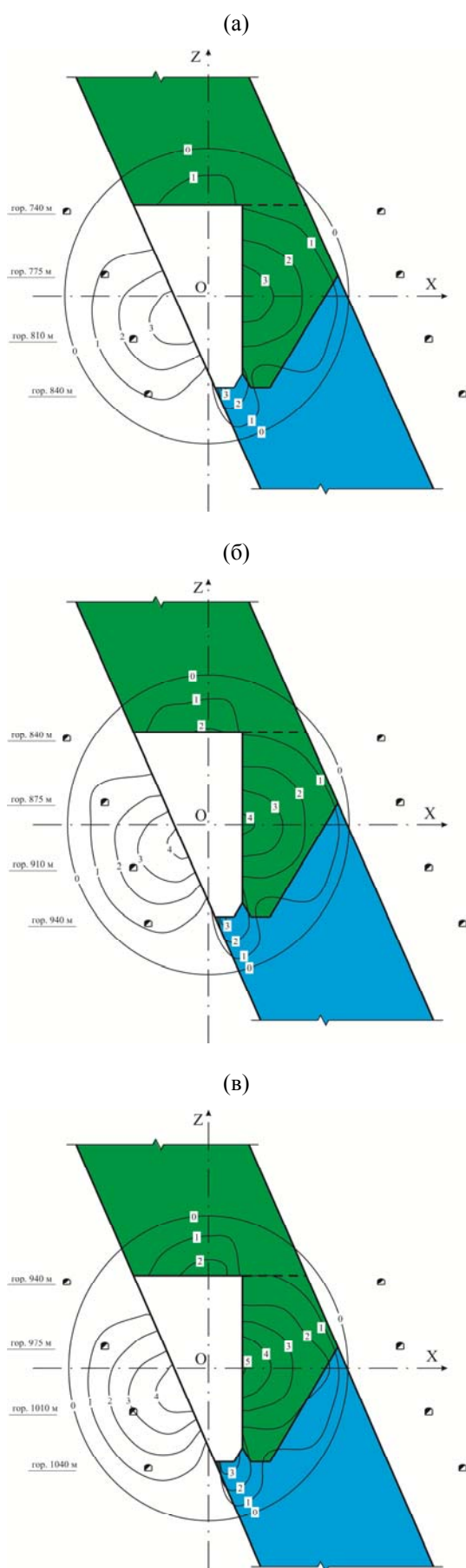


Рисунок 4. Изолинии радиальных напряжений  $\sigma_r$  (МПа) в массиве окружающем камеры второй очереди отработки вкост простирания залежи горизонтов 840 м (а), 940 м (б) и 1040 м (в)

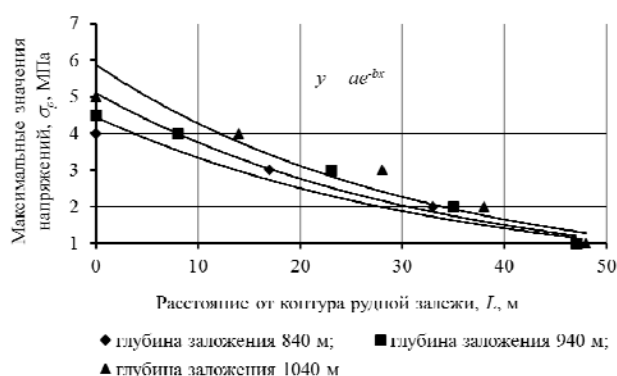


Рисунок 5. Изменение максимальных напряжений в породах лежачего бока, действующих вокруг камер второй очереди отработки с увеличением расстояния от контура рудной залежи

Проведя аппроксимацию максимальных значений получены эмпирические уравнения зависимостей радиальных напряжений от расстояния до рудной залежи.

Для массива пород лежачего бока окружающего камеры второй очереди отработки, зависимость имеет вид:

– для этажа 740 – 840 м:

$$\sigma_p = 4.4 \cdot e^{-0.029 \cdot L}; \quad (8)$$

– для этажа 840 – 940 м:

$$\sigma_p = 5.1 \cdot e^{-0.031 \cdot L}; \quad (9)$$

– для этажа 940 – 1040 м:

$$\sigma_p = 5.9 \cdot e^{-0.032 \cdot L}. \quad (10)$$

Таким образом, на всех трех этажах 740 – 840, 840 – 940 и 940 – 1040 м область растягивающих напряжений  $\sigma_p$  в породах лежачего бока изменяется по экспоненциальной зависимости, которая определяется формулой (4), где с изменением глубины ведения очистных работ ( $H$ ):

$$a = 0.0075 \cdot H - 1.9; \quad (11)$$

$$b = 0.0013 \cdot H^{0.4}. \quad (12)$$

Подставив уравнения (11) и (12) в выражение (4), получим формулу, определяющую область растягивающих напряжений в породах лежачего бока с учетом глубины заложения очистной камеры и расстояния до контура рудной залежи:

$$\sigma_p = (0.0075 \cdot H - 1.9) \cdot e^{-0.0013 \cdot L \cdot H^{0.4}}. \quad (13)$$

Исследование напряженно-деформированного состояния вмещающего очистные камеры второй очереди отработки массива горных пород позволило выявить закономерности развития полей напряжений в массиве зон разгрузки очистных камер и определить изменение уровня напряженности массива пород лежачего бока, в зонах разгрузки очистных камер второй очереди отработки, которые изменяются от расстояния до рудной залежи по экс-

пониженными зависимостям. Также исследование позволило получить формулу, определяющую область растягивающих напряжений в породах лежащего бока с учетом глубины заложения очистных камер второй очереди отработки, и расстояния до контура рудной залежи. Поэтому при определении степени влияния на устойчивость полевых выработок, закладываемых в лежащем боку залежи необходим точный учет влияния напряженно-деформированного состояния массива от очистных камер второй очереди отработки.

#### 4. ВЫВОДЫ

Аналитические исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистных камер первой и второй очереди отработки запасов позволили определить основные области концентрации напряжений, которые располагаются в породах висячего и лежащего боков залежи, в массиве руды и закладки. Во всех областях действуют растягивающие напряжения, которые изменяются по экспоненциальным зависимостям. Значения напряжений в массиве возрастают от границы зоны разгрузки в направлении обнажения массива очистными камерами.

Исследование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива позволило определить состояние пород висячего и лежащего боков, в зонах разгрузки очистных камер первой и второй очереди отработки запасов. Напряжения изменяются по экспоненциальным зависимостям от расстояния до рудной залежи с увеличением глубины ведения очистных работ.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

За предоставление исходных данных для моделирования и оказанную помощь при проверке результатов исследований авторы выражают благодарность директору по производству ЧАО "Запорожский ЖРК" В.Ю. Усатому.

#### ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Исследовать изменения напряженности массива в породах висячего и лежащего боков залежи, при отработке первичных и вторичных очистных камер.

**Методика.** Аналитические исследования напряженно-деформированного состояния массива вокруг очистных камер выполнялись с использованием термодинамического метода, который дает наиболее высокую сходимость расчетных и измеряемых в шахте упругих деформаций.

**Результаты.** Установлены закономерности развития полей напряжений в массиве зон разгрузки очистных камер. Определены основные области концентрации напряжений, которые располагаются в породах висячего и лежащего боков, в массиве руды и закладки. Форма изолиний радиальных напряжений вокруг очистных камер стремиться к эллипсоидной. Уровень напряженности массива пород висячего и лежащего боков, в зонах разгрузки очистных камер, изменяется по экспоненциальным зависимостям в зависимости от расстояния до рудной залежи.

**Научная новизна.** Состоит в использовании эффекта разупрочнения массива, вмещающего первичные и вторичные очистные камеры для использования величины напряженности пород при определении места заложения полевых подготовительных выработок.

**Практическая значимость.** Определен уровень напряженности пород вокруг очистных камер и установлены эмпирические зависимости изменения величины радиальных напряжений, учитывающие изменения глубины горных работ и удаление от контура рудной залежи.

**Ключевые слова:** теоретические исследования, зона разгрузки массива, напряженно-деформированное состояние, камеры первой и второй очереди отработки, радиальные напряжения

#### REFERENCES

- Chistyakov, E., Bliznyukov, V., Moshinskiy, V., & Malyu, A. (2000). Puti povysheniya effektivnosti razrabotki krutopadayushchikh mestorozhdeniy siste-mami s zakladkoy vyrabotannogo prostranstva. *Sbornik Nauchnykh Trudov GNIGRI*, 67-73.
- Falshytynskyy, V., Dychkovskyy, R., Lozynskyy, V., & Saik, P. (2012). New method for justification of the technological parameters of coal gasification in the test setting. *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining 2012*, 201-208. <http://dx.doi.org/10.1201/b13157-35>
- Khomenko, O., Kononenko, M., & Netecha, M. (2016). Industrial research into massif zonal fragmentation around mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 50-56. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.050>
- Khomenko, O., Kononenko, M., & Petlyovanyy, M. (2014). Investigation of stress-strain state of rock massif around the secondary chambers. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 241-245. <http://dx.doi.org/10.1201/b17547-43>
- Kononenko, M., & Khomenko, O. (2010). Technology of support of workings near to extraction chambers. *New Techniques and Technologies in Mining*, 193-197. <http://dx.doi.org/10.1201/b11329-32>
- Lavrinenko, V., & Lysak, V. (1993). Fizicheskie protsessy v massive porod pri narushenii ravnovesiya. *Izv. Vuzov. Gornyy Zhurnal*, (1), 1-6.
- Russkikh, V., Yavors'kiy, A., Chistyakov, Y., & Zubko, S. (2013). Study of rock geomechanical processes while mining two-level interchamber pillars. *Mining of Mineral Deposits*, 149-153. <http://dx.doi.org/10.1201/b16354-26>
- Tsaruk, A. (2014). Evaluation of Economic and Environmental Efficiency of Iron Ore Enterprises in Ukraine. *Adv. Sci.*, 2014(8), 221-224. <http://dx.doi.org/10.15550/asj.2014.08.221>
- Vladyko, O., Kononenko, M., & Khomenko, O. (2012). Imitating modeling stability of mine workings. *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining 2012*, 147-150. <http://dx.doi.org/10.1201/b13157-26>
- Zeng, L.J., Sui, Y.H., & Shen, Y.S. (2014). Analysis of Synergetic Development of Science & Technology Industry and Ecological Mining Area. *Advanced Materials Research*, 962-965, 2089-2095. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.962-965.2089>

## **ABSTRACT (IN UKRAINIAN)**

**Мета.** Дослідити зміни напруженості масиву в породах висячого і лежачого боків покладу, при відпрацюванні первинних і вторинних очисних камер.

**Методика.** Аналітичні дослідження напружено-деформованого стану масиву навколо очисних камер виконувалися з використанням термодинамічного методу, який дає найбільш високу збіжність розрахункових і вимірюваних у шахті пружних деформацій.

**Результати.** Встановлено закономірності розвитку полів напружень у масиві зон розвантаження очисних камер. Визначено основні області концентрації напружень, які розташовуються у породах висячого і лежачого боків, у масиві руди та закладки. Форма ізоліній радіальних напружень навколо очисних камер прагне до еліпсоїдної. Рівень напруженості масиву порід висячого і лежачого боків, у зонах розвантаження очисних камер, змінюється за експоненціальними законами в залежності від відстані до рудного покладу.

**Наукова новизна.** Полягає у використанні ефекту знеміцнення масиву, що вміщує первинні і вторинні очисні камери для використання величини напруженості порід при визначенні місця закладення польових підготовчих виробок.

**Практична значимість.** Визначено рівень напруженості порід навколо очисних камер і встановлені емпіричні залежності зміни величини радіальних напружень, що враховують зміни глибини гірських робіт і відстань від контуру рудного покладу.

**Ключові слова:** *теоретичні дослідження, зона розвантаження масиву, напружено-деформований стан, камери першої і другої черги відпрацювання, радіальні напруження*

## **ARTICLE INFO**

Received: 11 January 2016

Accepted: 30 April 2016

Available online: 30 June 2016

## **ABOUT AUTHORS**

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](mailto:koordin@rudana.in.ua)

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](mailto:kmn211179@gmail.com)

Maksym Danylchenko, Student of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/58, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: [maximdanilchenko@gmail.com](mailto:maximdanilchenko@gmail.com)