

ГІРНИЦТВО MINING

УДК 622.274.4:622.831

<https://doi.org/10.31474/1999-981x-2021-1-7-18>

М.В. Петльований
К.С. Сай

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЗАКЛАДНОГО МАСИВУ ПРИ РІЗНИХ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЯХ

Мета. Аналітичні дослідження напруженого стану закладного масиву очисних камер з різними фізико-механічними властивостями за допомогою чисельного моделювання для визначення вірогідних зон втрат стійкості та прогнозу їх руйнування.

Методи. Чисельне моделювання формування напружень навколо високої очисної камери виконувалося для умов відпрацювання запасів залізних руд в інтервалах глибин 740-1040 м Південно-Білозерського родовища, де активно ведуться гірничі роботи, методом кінцевих елементів у програмному пакеті SolidWorks 2016 з достовірним обґрунтуванням параметрів розробленої геомеханічної моделі.

Результати. Виконано чисельні розрахунки напруженого стану закладного масиву при змінних величинах модуля його пружності та глибини розробки. Встановлено, що при існуючих фактичних фізико-механічних властивостях закладного масиву при відпрацюванні Південно-Білозерського родовища небезпека його руйнування прогнозується при глибинах розробки більше 890 м. Виявлено, що в закладному масиві, що оточує камеру другої черги, що відпрацьовується, з підвищенням його пружності у покрівлі та центрі закладного масиву величини напружень змінюються за лінійним характером, а в місці з'єднання покрівлі з боком закладеної камери – поліноміально. Встановлено, що підвищення модуля пружності закладного масиву дозволяє зменшити стискаючі напруження тільки в місці з'єднання покрівлі з боком закладеної камери до величини 800 МПа.

Наукова новизна. Встановлено, що зі збільшенням глибини розробки, незважаючи на підвищення модуля пружності закладки, величини напружень збільшуються, що нівелює сенс його підвищення з глибини розробки.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють скорегувати технологію формування закладного масиву в очисних камерах першої черги, що враховує формування напружень на його контурі, та зі збільшенням глибини розробки формувати закладний масив із в'язкопластичними властивостями.

Ключові слова: закладний масив, напруження, модуль пружності, чисельне моделювання, стійкість, зони руйнування.

Вступ.

Сучасні світові тенденції підземної розробки рудних родовищ свідчать про поширення систем розробки із закладанням виробленого простору, що обумовлено перш за все природоохоронними аспектами (утилізація промислових відходів) та підвищенням повноти і якості вилучення запасів руд з надр [1-3]. Так, в закладних сумішах, що зазвичай готуються у поверхневих закладних комплексах, успішно як компоненти використовуються металургійні шлаки, хвости збагачення, відвальні породи, золи теплових електростанцій, відходи флюсового виробництва тощо [4, 5]. Це є дуже важливим аспектом з позиції охорони довкілля у гірничопромислових регіонах, адже щорічно великі шахти утилізують сотні тисяч тон промислових відходів. Внаслідок застосування твердіючого закладання з'являється можливість повністю запобігти втратам запасів у природних рудних ціликах, що залишаються для підтримання

товщі порід від обвалення, замінивши їх на штучні цілики [6, 7].

Проте, для ефективного застосування систем розробки із закладанням до закладного масиву висуваються високі вимоги, насамперед – міцність та економічність. Відомо, що фізико-механічні властивості закладного масиву залежать від якісного підбору компонентів закладної суміші, їх гранулометричного та хімічного складу [8, 9]. Певний компонентний склад закладної суміші призводить до формування штучного масиву з певними фізико-механічними властивостями і відповідно до різної картини розподілу полів напружень при його навантаженні від товщі порід.

В Україні камерні системи розробки з твердіючим закладанням застосовуються на двох підприємствах – уранова шахта ДП «Східний ГЗК» та залізорудна шахта ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат» [10, 11]. Запорізький залізорудний комбінат розробляє багаті поклади залізних руд Південно-Білозерського родовища у

поверхах 740-840 та 840-940 м, де посилюються прояви гірського тиску. Відпрацювання рудного покладу ведеться у дві черги. Камери другої черги відпрацьовуються після того, коли закладка в камерах першої черги набере необхідну міцність до відслонення та стійкість до сейсмічного впливу. При вилученні запасів руди з камер другої черги спостерігаються випадки руйнування закладного масиву раніше заповнених камер першої черги – у напрямку як за простяганням, так і вхрест простягання покладу, що призводить до потрапляння штучного масиву у відбиту руду та її засмічення [12-14].

В умовах посилення гірського тиску дослідження формування напруженого стану при різних властивостях закладного масиву представляє інтерес як для запобігання руйнувань і засмічення руди закладкою, так і економічності закладних робіт, що є актуальним для підприємств, які застосовують технологію видобутку руд із твердіючим закладанням. Досвід вивчення фізико-механічних властивостей показує, що на низці гірничорудних підприємств модуль пружності закладного масиву змінюється в широких межах і складає, залежно, від компонентного складу від 300 до 1500 МПа.

Аналіз останніх праць та публікацій.

Питанням стійкості рудопородного та закладного масивів при освоєнні залізрудних родовищ займалися багато вчених-фахівці гірничої науки. У роботах [15, 16] наведені результати впливу форми очисних камер на напружений стан рудопородного масиву і стійкість відслонення. Питанням сейсмічного впливу на закладний масив, а також виявлення зон втрати стійкості закладного масиву присвячені роботи закордонних вчених [17, 18]. Дослідженню впливу очисного простору камер на формування напруженого стану масиву гірських порід, а також порядку відпрацювання очисних камер на показники засмічення руди присвячені роботи [19, 20].

Значні дослідження проведені щодо встановлення параметрів транспортування закладних сумішей на значні відстані [21, 22]. Результати дослідження кількісних параметрів напруженого стану масиву, що дозволило характеризувати стан масиву в

зоні ведення або впливу гірничих робіт, наводяться у роботі [23].

Незважаючи на проведені численні дослідження, питанню формування напруженого стану закладного масиву при різних його фізико-механічних властивостях, не приділено належної уваги в літературних та інформаційних джерелах.

Формулювання мети статті.

Метою статті є дослідження напруженого стану закладного масиву очисних камер з різними фізико-механічними властивостями за допомогою чисельного моделювання для визначення вірогідних зон втрат стійкості та прогнозу їх руйнування.

Методика досліджень.

Чисельне моделювання формування напружень навколо високої очисної камери виконувалося для умов відпрацювання запасів залізних руд в інтервалах глибин 740-1040 м Південно-Білозерського родовища, де активно ведуться гірничі роботи, в програмному пакеті SolidWorks 2016. Для моделювання обрана центральна частина рудного покладу, гірничо-геологічні умови, які враховують особливості як південного, так і північного крила родовища.

Модель складалася з чотирьох блоків:

– структура й механічні характеристики порід лежачого та висячого боків у межах впливу гірського тиску, викликаного відпрацюванням камери другої черги;

– механічні характеристики закладного масиву камер першої черги в поперсі 740-1040 м і в покрівлі закладеного поверху 640-740 м;

– механічні характеристики рудного покладу в поперсі 740-1040 м;

– технологічні параметри ведення очисних робіт (геометричні параметри камер, глибина ведення гірничих робіт, черговість відпрацювання камер, розташування гірничих виробок та ін.).

За кожною з блоків моделі проведено обґрунтування параметрів елементів розглянутої геомеханічної системи для максимально реального відображення процесів, що виникають в гірському масиві при відпрацюванні камер другої черги.

У першому блоці розглядалися механічні характеристики порід висячого та лежачого боків. У межах рудного покладу 740-1040 м вміщуючі породи лежачого боку представлені сланцями хлорит-серіцитового складу з прошарками метопісковиків потужністю від 5 до 15-20 м. Міцність сланців коливається в межах $f=6-7$ до $f=7-9$, середньої тріщинуватості та стійкості. Вміщуючі породи висячого боку представлені сланцями кварц-хлорит-серіцитового складу міцністю від $f=6-8$ до $f=8-10$ і гематито-мартитовими кварцитами середньої тріщинуватості та стійкості міцністю $f=14-16$.

У другому блоці моделі встановлено, що закладний масив камер першої черги відпрацювання в поверсі 740-1040 м має міцність на стиск 8 МПа. Штучний масив даної міцності прирівнюється до міцності гірського масиву з коефіцієнтом $f=5$ за шкалою М.М. Протод'яконова і відповідає міцності на стиск 50 МПа [24].

У третьому блоці моделі прийнято горизонтальну потужність рудного покладу

90 м. Середньозважений коефіцієнт міцності руди за шкалою М.М. Протод'яконова становить $f=6$.

У четвертому блоці моделі обґрунтовані технологічні параметри ведення очисних робіт. Дослідження формування полів напружень в масиві гірських порід виконано на прикладі середньостатистичної очисної камери в інтервалі глибин 740-1040 м. Прийнято усереднені геотехнічні умови (кут падіння покладу $\alpha=67^\circ$, висота камери – 100 м, ширина – 30 м, довжина – 50 м). Очисна камера розташована вхрест простягання і розглядалася на заключній стадії відпрацювання, контактуючи із закладним масивом.

Фізико-механічні властивості порід, руди та закладного масиву визначались за даними геологічної служби і технічного відділу Запорізького залізничного комбінату. Усереднені дані фізико-механічних властивостей наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Вихідні дані фізико-механічних властивостей для моделювання

Найменування	Гематито-мартитова руда	Кварцити	Сланці	Закладний масив
Модуль пружності E , МПа	$55 \cdot 10^4$	3500	2700	600
Коефіцієнт Пуасона, μ	0,25	15000	8000	0,15
Щільність γ , кг/м ³	3900	0,25	0,25	2300
Міцність на стиск σ_c , МПа	60	120	90	50
Міцність на розтяг σ_p , МПа	6,0	12,0	22,5	3,5

Розроблено розрахункову схему (Рис. 1а) для дослідження напруженого стану різномодульного масиву, яка включає такі елементи: масив гірських порід висячого та лежачого боків, рудний масив і закладний масив, що складається із закладених камер вище відпрацьованого поверху та камери висячого боку (першої черги). Загальний вигляд змодельованої мережі кінцевих елементів для камер другої черги із розташуванням вхрест простягання приведено на Рисунку 1б.

Для виключення впливу крайового ефекту на формування напружень навколо камери дотримані граничні умови. Вертикальний розмір моделі прийнятий 750 м, а горизонтальний розмір області досліджень склав 700 м, що відповідає не

менше трикратного розміру досліджуваного об'єкта (камери). До моделі прикладалося навантаження від тиску порід налягаючої товщі до глибини розташування камери.

У зв'язку з тим, що при відпрацюванні камер другої черги спостерігаються руйнування закладного масиву, для досягнення його стійкого стану передбачається дослідити зміну напруженого стану при різних фізико-механічних властивостях, а саме модуль пружності (Юнга), що суттєво впливає на формування поля напружень у закладному масиві. Крім того, необхідно також дослідити вплив глибини розробки задля раціонального проектування властивостей закладки при поглибленні гірничих робіт. Встановлення оптимального модуля

пружності дозволить підібрати склад закладної суміші та формувати нею закладний масив у зонах підвищених напружень задля протидії ним. З цієї позиції у комп'ютерній моделі змінними величинами є прикладене навантаження до моделі, що відображає тиск на певній глибині розробки (790 м – 20 МПа; 890 м – 22 МПа; 990 м – 24 МПа) та модуль пружності закладки (600, 800, 1000, 1200 МПа). Усього виконано 12 обчислювальних експериментів. Якщо максимальні напруження перевищують міцність закладки, відбувається її руйнування.

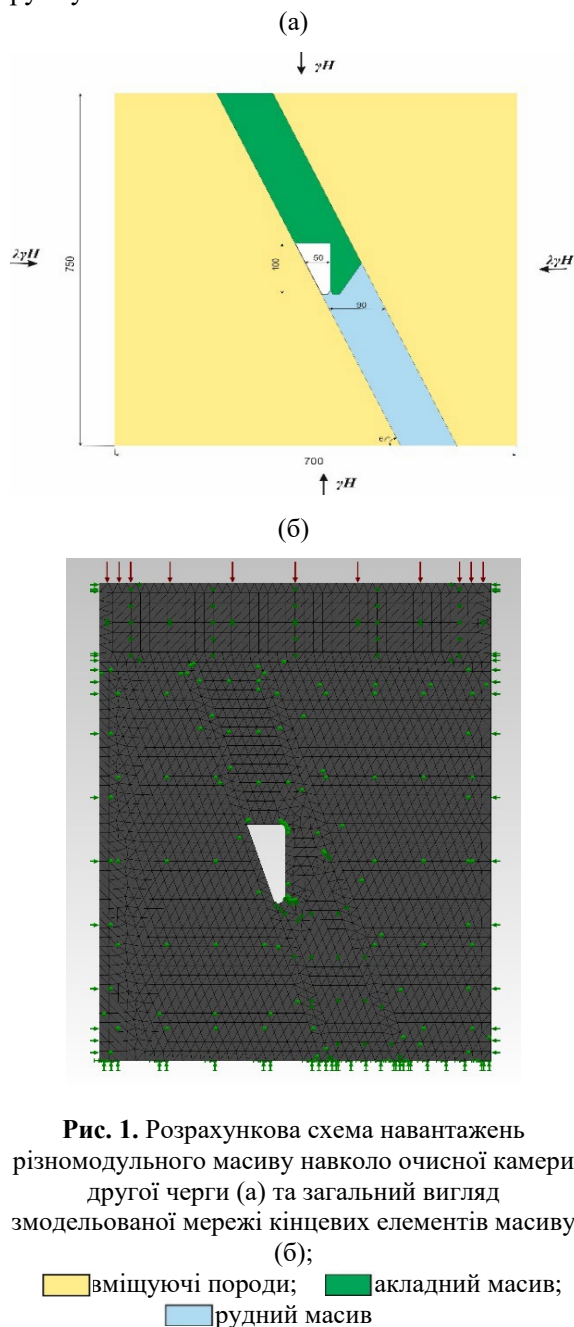


Рис. 1. Розрахункова схема навантажень різномодульного масиву навколо очисної камери другої черги (а) та загальний вигляд змодельованої мережі кінцевих елементів масиву (б);

В результаті моделювання отримані епюри вертикальних та горизонтальних компонент напружень – S_Y та S_X . Аналіз формування полів напружень в оточенні камер другої черги дозволить виявити нестійкі зони закладного масиву першої черги, які виникають при впливі відпрацювання камер другої черги. Далі в роботі ставиться наукове завдання дослідити напружений стан закладного масиву камери першої черги відпрацювання з висячого боку покладу вхрест простягання.

Результати досліджень.

В результаті виконання чисельних розрахунків отримані епюри вертикальних напружень S_Y на контурі камери другої черги, де покроково досліджувалася стійкість закладного масиву різної пружності та різної глибини розташування очисної камери. Як приклад, наведено епюри напружень S_Y у масиві, що містить очисну камеру, в поверсі 740-840 м, з усередненою глибиною 790 м (рис. 2).

Уздовж верхньої та нижньої меж моделі встановлюється рівномірний розподіл компонентів σ_y , відповідно, не перевищує і величини γH недоторканого масиву (16,3 – 25 МПа верхньої та нижньої межі), що вказує на достатність вжитих вертикальних розмірів моделі. У боках очисної камери напруження S_Y згасають на відстані набагато меншій у бічних меж моделі.

Для всіх випадків (епюр з різним модулем пружності) картина напруженого стану порід лежачого боку і днища камери є аналогічною (Рис. 2). Напруження в цих елементах камери не є небезпечними для засмічення руди, що видобувається, та далі в роботі не аналізуються. Увага приділяється напруженому стану закладного масиву у покрівлі та закладеної камери першої черги.

Аналіз епюр вказує, що вертикальна компонента гірничого тиску S_Y формує в закладному масиві ряд полів напружень:

– в центрі закладеної камери з'являється область незначних стискаючих напружень, значення яких збільшуються від контуру до центру закладеного масиву. Область поширюється на 1/3 довжини закладеної камери. Величина напружень у всіх розрахунках (різні модуль пружності та глибина розробки) знаходиться у межах 3,5-

7,7 МПа та руйнуванню закладному масиву не завдає;

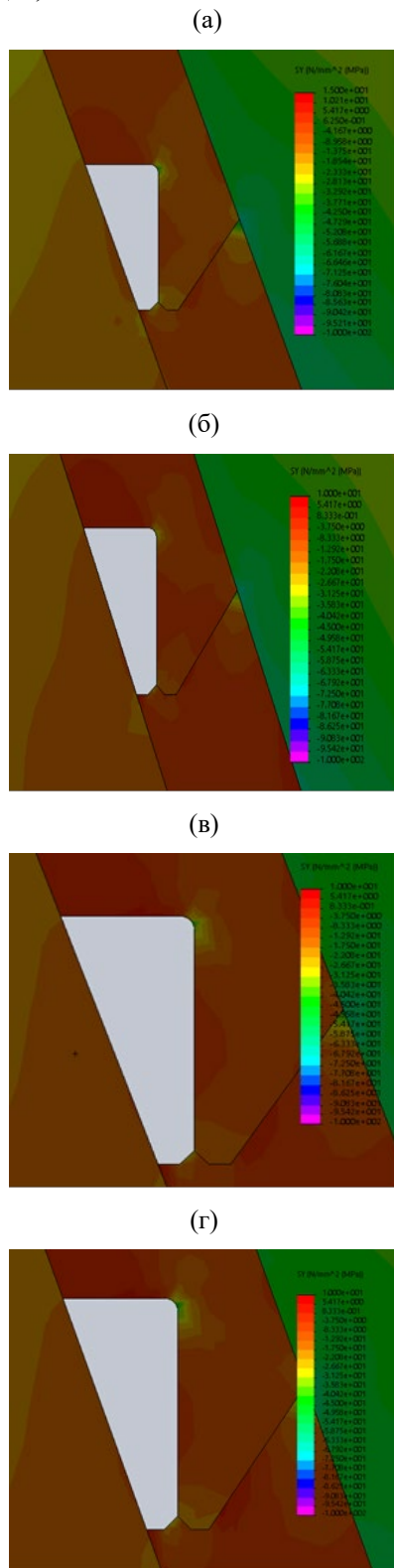


Рис. 2. Епюри вертикальних напружень S_Y , модель вхрест простягання при модулі пружності закладки 600, 800, 1000, 1200 МПа

– в покрівлі камери (днище закладеної камери верхнього поверху) формується зона підвищених розтягуючих напружень вглиб до 5 м, які у розрахунках коливаються від 0,8 до 3,5 МПа та представляють небезпеку щодо стійкості покрівлі (міцність закладки на розтяг становить 3,0 МПа);

– на з'єднанні покрівлі з боком камери першої черги відпрацювання формується зона підвищених стискаючих напружень, що здатні зруйнувати масив закладки.

Ця зона простягається до 10 м, але від контуру стрімко напруження затухають. Величина напружень у всіх розрахунках (різні модуль пружності та глибина розробки) знаходиться у межі 29-55 МПа.

Основні небезпечні руйнівні зони, що формує компонента S_Y , наведена на рисунку 3.

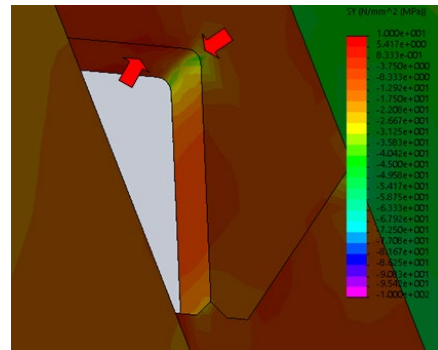


Рис. 3. Потенційно руйнівні зони в закладеному масиві під впливом S_Y

Всі зони концентрації напружень при зміні модуля пружності та глибини розробки мають схожу якісну картину розподілу напружень навколо камери другої черги відпрацювання, різниця лише в кількісних показниках напружень.

Аналізуються також горизонтальні напруження S_X , що також формують поля напружень навколо камери другої черги відпрацювання. Як приклад, наведено епюри напружень S_X у масиві, що містить очисну камеру, в поверхсі 740-840 м, з усередненою глибиною 790 м (Рис. 4.)

Аналіз епюр вказує, що горизонтальна компонента гірничого тиску S_X формує в закладному масиві ряд полів напружень, а саме:

– в центрі закладеної камери з'являється область рівноважних напружень, значення яких збільшуються від контуру до

центру закладеного масиву. Область плавно поширюється до центру закладного масиву.

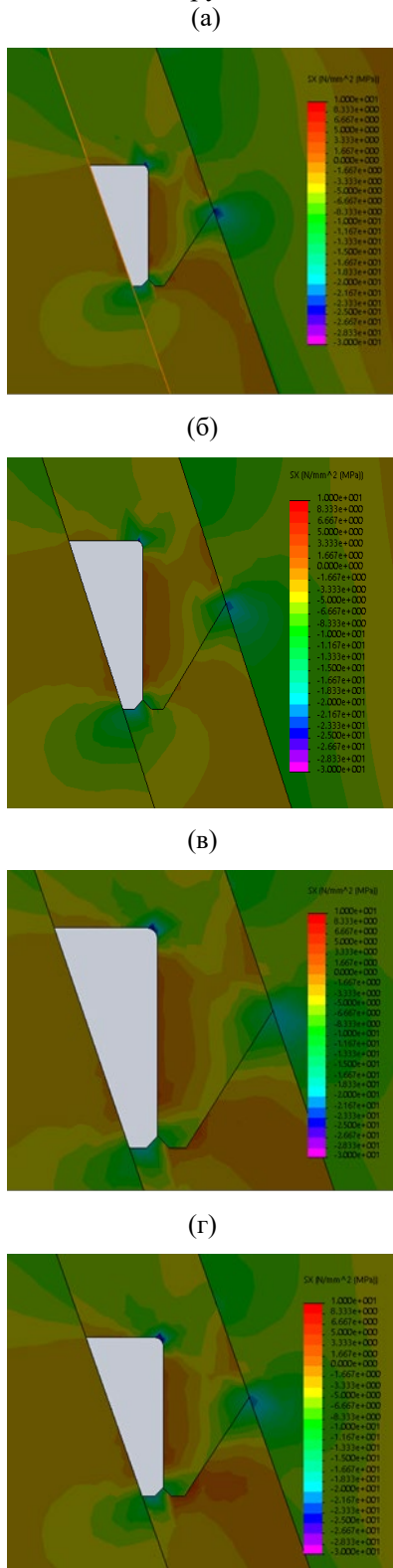


Рис. 4. Епюри горизонтальних напружень SX , модель вхрест простягання при модулі пружності закладки 600, 800, 1000, 1200 МПа

Величина напружень у всіх розрахунках (різні модуль пружності та глибина розробки) на контурі камери знаходиться у межі 0-0,1 МПа та руйнувань масиву не завдає;

– в покрівлі камери (днище закладеної камери верхнього поверху) формується зона розвантаження, де вглиб діють знакозмінні напруження від +0,8 до -2,5 МПа та не представляють небезпеку для стійкості покрівлі;

– на з'єднанні покрівлі камери та боку камери першої черги відпрацювання формується зона підвищених стискаючих напружень, що здатні зруйнувати масив закладки. Зона простягається до 10 м, але від контуру стрімко напруження затухають. Величина напружень у всіх розрахунках (різні модуль пружності та глибина розробки) знаходиться у межі 21-42 МПа;

– під впливом SX виникає ще одна зона концентрації розтягуючих напружень в закладному масиві камери першої черги, що співпадає з підповерхом 790-825 м. Величина напружень у всіх розрахунках (різні модуль пружності та глибина розробки) знаходиться у межі 1,8-3,3 МПа та представляє небезпеку щодо стійкості закладного масиву. Її розмір 5 м углиб масиву, та 7-10 м за висотою камери.

Основні потенційно небезпечні руйнівні зони, що формує компонента SX , наведено на рисунку 5.

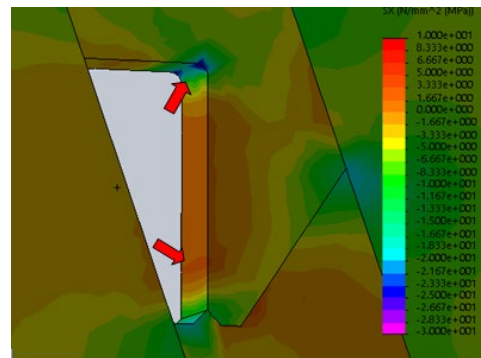


Рис. 5. Руйнівні зони в закладному масиві під впливом SX

Таким чином досліджено характер розподілу напружень у рудному, породному та закладному масивах, що оточують камеру другої черги відпрацювання, та встановлені основні небезпечні до руйнування області у закладному масиві.

За допомогою функції зондування в Simulation SolidWorks 2016 можливо зробити вимір напружень у будь-якій точці моделі. Таким чином, крім шкали напружень вдається проаналізувати важкодоступні, часто високо напружені елементи, такі як контур покрівлі камери, з'єднання покрівлі з боком камери. Зразок зондування напружень закладного масиву у небезпечних до руйнування місцях наведено на рисунку 6.

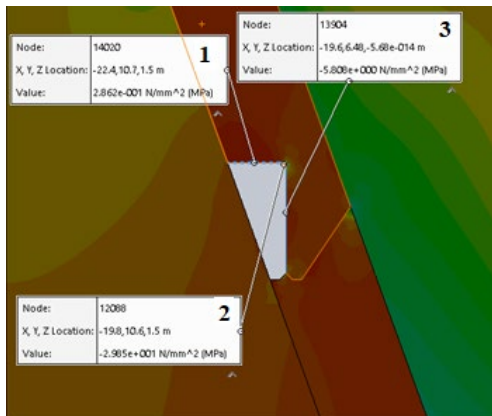


Рис. 6. Виконання зондування напружень по контуру очисної камери для оцінки їх величини: 1 – покрівля камери; 2 – з'єднання покрівлі з боком закладного масиву камери; 3 – центральна область закладного масиву

Отримані епюри напружень дозволили встановити, що компонента S_Y сприяє появі небезпечних руйнівних напружень в покрівлі камери та на з'єднанні покрівлі з боком камери, а компонента S_X формує зону розтягуючих напружень у інтервалі висоти закладного масиву 790-825 м. Тому далі розглядається вплив модуля пружності закладки та глибини її закладання на величину формування напружень на контурі очисної камери саме у точках, згідно рисунку 6.

За результатами зондування отриманих епюр напружень встановлені залежності зміни величини напружень на контурі камери від показника модуля пружності закладки на різній глибині розробки 790, 890 та 990 м (Рис. 7).

Аналіз величини напружень при відповідних пружностях дозволив встановити особливості їх зміни з глибиною:

- 790 м – величини розтягуючих напружень в покрівлі та в області закладного масиву камери I черги 790-825 м при значеннях пружності 600-1200 МПа

збільшуються з 1,3 до 2,8 МПа та з 2,3 до 2,8 МПа відповідно за лінійними залежностями; в місці з'єднання покрівлі з боком закладеної камери з підвищенням

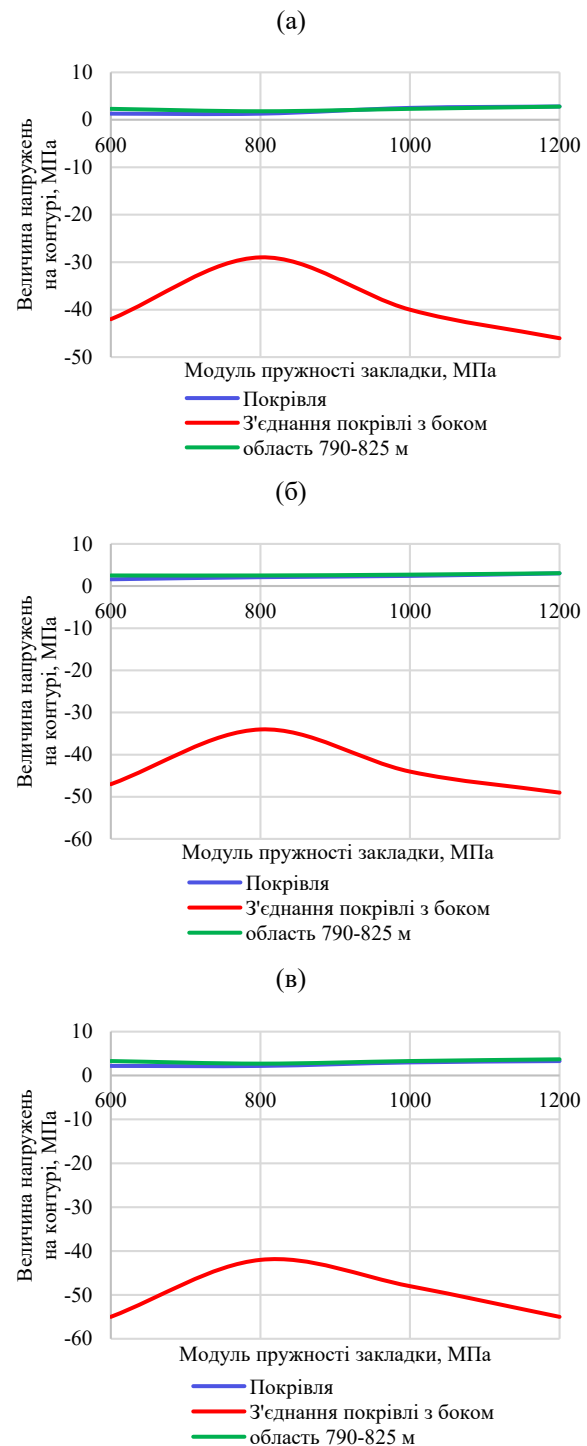


Рис. 7. Залежності зміни величини напружень у покрівлі, з'єднанні покрівлі з боком закладеної камери та області закладеної камери 790-825 м при різних модулях пружності закладки на глибинах: 790 м (а); 890 м (б); та 990 м (в)

модуля пружності закладки до 800 МПа стискаючі напруження знижуються з 42,0 до 29,0 МПа, а далі з підвищенням модуля до 1200 МПа стрімко зростають за поліноміальними залежностями;

– 890 м – величини розтягуючих напружень в покрівлі та в області закладного масиву камери I черги 790-825 м при значеннях пружності 600-1200 МПа збільшуються з 1,6 до 3,0 МПа та з 2,6 до 3,1 МПа відповідно за лінійними залежностями; в місці з'єднання покрівлі з боком закладеної камери з підвищенням модуля пружності закладки до 800 МПа стискаючі напруження знижуються з 47,0 до 34,0 МПа, а далі з підвищенням модуля до 1200 МПа стрімко зростають за поліноміальними залежностями;

– 990 м – величини розтягуючих напружень в покрівлі та в області закладного масиву камери I черги 790-825 м при значеннях пружності 600-1200 МПа збільшуються з 2,2 до 3,3 МПа та з 3,3 до 3,7 МПа відповідно за лінійними залежностями; в місці з'єднання покрівлі з боком закладеної камери з підвищенням модуля пружності закладки до 800 МПа стискаючі напруження знижуються з 55,0 до 42,0 МПа, а далі з підвищенням модуля до 1200 МПа стрімко зростають за поліноміальними залежностями.

Враховуючі фактичні фізико-механічні властивості закладного масиву в натурних умовах при відпрацюванні Південно-Білозерського родовища та результати моделювання, можна відзначити, що на глибині 790 м руйнування закладного масиву маловірогідні; на глибині 890 м початок тріщиноутворення в місці з'єднання покрівлі камери, що відпрацьовується, з боком закладеної камери; на глибині 990 м – тріщиноутворення в покрівлі, руйнування закладного масиву в місці з'єднання покрівлі камери, що відпрацьовується з боком закладеної камери та в області закладного масиву камери I черги 790-825 м.

Обговорення.

Слід відзначити високу достовірність апроксимації аналітичних даних за результатами моделювання (рис. 7), що складає 0,95-1,0. Аналіз характеру зміни величини напружень залежно від модуля пружності та глибини розташування закладного масиву (рис. 7) дозволяє виділити наступні відмінності в потенційно

небезпечних зонах, де може відбуватись руйнування закладного масиву:

– характер зміни величини розтягуючих напружень як у покрівлі очисної камери, так і в області закладного масиву камери I черги 790-825 м фактично аналогічний, де величини напруження повільно збільшуються в межах значень модуля пружності від 600 до 1200 МПа;

– характер зміни величини стискаючих напружень в місці з'єднання покрівлі камери з боком закладеної камери показує стрімке зниження величини напружень в межах модуля пружності закладки 600-800 МПа та його збільшенням в межах 800-1200 МПа;

– на напружений стан закладки доцільно впливати лише в місці з'єднання покрівлі камери, що відпрацьовується, з боком закладеної камери, підвищуючи модуль її пружності з 600 до 800 МПа шляхом корегування складу закладної суміші та збільшення крупнокускового інертного заповнювача.

Встановлені залежності показують, що зі збільшенням глибини розробки, незважаючи на підвищення модуля пружності закладки, величини напружень збільшуються, тобто немає сенсу з глибиною підвищувати пружні властивості закладки.

Як відомо, закладний масив в ранні терміни твердіння має властивості пружно-пластичного середовища. Закладний масив, як пружно-пластичне середовище, спочатку деформується пружно. Далі спостерігаються пластичні деформації, які переходять в крихке або в'язке руйнування. Чим вище набрана міцність закладного масиву, тим більше проявляються пружні властивості і менше – пластичні. У міру набору міцності з часом затвердіння пластичність закладки знижується [4]. Міцний закладний масив може характеризуватися можливістю крихкого руйнування при малих деформаціях, що призводить до раптового його відшарування, в той час як менш міцний закладний масив, але більш пластичний, витримує великі деформації. Тому, з точки зору забезпечення безпечних умов ведення гірничих робіт і найменшого руйнування закладного масиву, при вийманні руди в суміжних камерах доцільно використовувати закладку із в'язким характером руйнування.

Висновки.

Розроблено розрахункову схему для дослідження напруженого стану різномодульного закладного масиву, яка включає такі елементи: масив гірських порід висячого та лежачих боків, рудний масив і закладний масив, що складається із закладених камер вище відпрацьованого поверху і закладеної камери першої черги відпрацювання.

Враховуючі існуючі фактичні фізико-механічні властивості закладного масиву в натурних умовах при відпрацюванні Південно-Білозерського родовища та результати моделювання, можна відзначити, що значні руйнування закладного масиву в місці з'єднання покрівлі камери, що відпрацьовується, з боком закладеної камери та в області закладного масиву камери I черги 790-825 м прогноуються на глибині 990 м.

Встановлено, що на напружений стан закладного масиву доцільно впливати лише в місці з'єднання покрівлі камери, що відпрацьовується, з боком закладеної камери, підвищуючи модуль її пружності з 600 до 800 МПа. Дослідження напруженого стану закладного масиву при різних значеннях модуля пружності та різній глибині розробки показали, що підвищення пружних властивостей закладки з глибиною не призведе до підвищення стійкості закладного масиву, закладний масив потрібно забезпечити в'язкопластичними властивостями.

Список літератури

- Qi C., Fourie A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering*. 2019. №144. P. 106025. DOI:10.1016/j.mineng.2019.106025
- Emad M.Z., Vennes I., Mitri H., Kelly C. Backfill practices for sublevel stoping system. *Mine Planning and Equipment Selection*. 2014. P. 391-402. DOI:10.1007/978-3-319-02678-7_38
- Bazaluk O., Petlovanyi M., Lozynskyi V., Zubko S., Sai K., Saik P. Sustainable underground iron ore mining in Ukraine with backfilling worked-out area. *Sustainability*. 2021. №13(2). P. 834. DOI:10.3390/su13020834
- Битимбаев М.Ж., Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н. Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых. Алматы: Издательство Ассоциации ВУЗов РК, 2012. 624 с.
- Кузьменко А.М., Петлєваний М.В., Усатый В.Ю. Твердеющая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2015. 140 с.
- Yang P., Li L., Aubertin M. A new solution to assess the required strength of mine backfill with a vertical exposure. *International Journal of Geomechanics*. 2017. №17(10). P. 04017084. DOI:10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000975
- Petlovanyi M.V., Ruskykh V.V., Zubko S.A. Peculiarities of the underground mining of high-grade iron ores in anomalous geological conditions. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2019. №28(4). P. 706-716. DOI:10.15421/111966
- Габараев О.З., Тугуз Ш.М., Петрова О.В. Исследование состояния закладочного массива при различных свойствах твердеющей смеси. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. №11. С. 38-41.
- Petlovanyi M.V., Zubko S.A., Sai K.S., Khalymendyk O.V. Structural bonds development in the backfill mass when changing the dispersion of the binding material. *Energy and Resource-Saving Technologies of Developing the Raw-Material Base of Mining Regions: Multi-Authored Monograph*. Petroşani: Universitas Publishing, 2021. P. 294-312. DOI:10.31713/m1018
- Ляшенко В.И., Ткаченко А.А., Чистяков Е.П. Научно-технические основы определения геомеханических характеристик породных массивов при подземной разработке урановых месторождений. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. №1. С. 85-89.
- Petlovanyi M., Ruskykh V., Zubko S., Medianyuk V. Dependence of the mined ores quality on the geological structure and properties of the hanging wall rocks. *E3S Web of Conferences*. 2020. №201. P. 01027. DOI:10.1051/e3sconf/202020101027
- Henning J.G., Mitri H.S. Numerical modelling of ore dilution in blasthole stoping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007. №44(5). P. 692-703. DOI:10.1016/j.ijrmmms.2006.11.002
- Petlovanyi M., Mamaikin O. Assessment of an expediency of binder material mechanical activation in cemented rockfill. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. №14(20). P. 3492-3503.
- Liu G., Li L., Yang X., Guo L. Numerical analysis of stress distribution in backfilled stopes considering interfaces between the backfill and rock walls. *International Journal of Geomechanics*. 2017. №17(2). P. 06016014. DOI:10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000702
- Кузьменко А.М., Усатый В.В. Распределение напряжений в горном массиве вокруг высоких очистных камер при разработке рудных месторождений с твердеющей закладкой. *Геотехническая механика*. 2010. №94. С. 105-133.
- Капленко Ю.П., Цариковский В.В. Влияние напряженного состояния горного массива и горно-геологических условий на параметры обнажений и форму очистных камер. *Разработка рудных месторождений*. 2005. №88. С. 11-24.
- Emad M.Z., Mitri H.S., Henning J.G. Effect of blast vibrations on the stability of cemented rockfill. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2012. №26(3). P. 233-243. DOI:10.1080/17480930.2012.707527
- Yu T.R. Mechanisms of fill failure and fill strength requirements. *Proceedings of the 16th Canadian Rock Mechanics Symposium, Canada*. 1992. P. 43-46.

19. Калиниченко В.А. Исследования напряженно-деформированного состояния комбинированных искусственных массивов. *Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості*. 2006. С. 155-156.

20. Кузьменко А.М., Петлеваний М.В. Влияние структуры горного массива и порядка отработки камерных запасов на разубоживание руды. *Геотехническая механика*. 2014. №118. С. 37-45.

21. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dmitrak Y.V., Franchuk V.P. Rationale for the parameters of the vibration gravity transportation of solidifying filling mixtures to mines. *Vestnik of Novosibirsk State Technical University*. 2021. №19(1). P. 4-16. DOI:10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16

22. Stovmanenko A.Y., Volkov E.P., Anushenko A.N. Improving the efficiency of pipeline transport of stowage mixes in the conditions of underground mining of mineral deposits. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2019. №146(6). P. 33-41. DOI:10.26730/1816-4528-2019-6-33-41

23. Chistyakov E., Ruskih V., Zubko S. Investigation of the geomechanical processes while mining thick ore deposits by room systems with backfill of worked-out area. *Geomechanical Processes During Underground Mining*. 2012. P. 127-132. DOI:10.1201/b13157-23

24. Чистяков Е.П., Кулиш С.А., Мошинский В.И., Зубко А.Н. Инструкция по определению параметров очистной выемки при системах разработки с твердеющей закладкой на Запорожском железорудном комбинате. Кривой Рог: НИГРИ, 2011. 29 с.

References

1. Qi, C., & Fourie, A. (2019). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering*, 144, 106025. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025>

2. Emad, M.Z., Vennes, I., Mitri, H., & Kelly, C. (2014). Backfill practices for sublevel stoping system. *Mine Planning and Equipment Selection*, 391-402. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_38

3. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Zubko, S., Sai, K., & Saik, P. (2021). Sustainable underground iron ore mining in Ukraine with backfilling worked-out area. *Sustainability*, 13(2), 834. <https://doi.org/10.3390/su13020834>

4. Bitimbaev, M.Zh., Krupnik, L.A., & Shaposhnik, Yu.N. (2012). *Teoriya i praktika zakladochnykh robot pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh*. Almaty: Publishing House of the Association of Higher Education Institutions of the Republic of Kazakhstan. (in Russian).

5. Kuzmenko, A.M., Petlovanyi, M.V., Usaty, V.Yu. (2015). *Tverdeyushchaya zkladka pri otabotke rudnykh krutykh zalezhey v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh*. Dnipropetrovsk: National Mining University. (in Russian).

6. Yang, P., Li, L., & Aubertin, M. (2017). A new solution to assess the required strength of mine backfill with a vertical exposure. *International*

Journal of Geomechanics, 17(10), 04017084. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000975](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000975)

7. Petlovanyi, M.V., Ruskykh, V.V., & Zubko, S.A. (2019). Peculiarities of the underground mining of high-grade iron ores in anomalous geological conditions. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(4), 706-716. <https://doi.org/10.15421/111966>

8. Gabaraev, O.Z., Tuguz, Sh.M., & Petrova, O.V. (2008). Issledovanie sostoyaniya zakladochnogo massiva pri razlichnykh svoystvakh tverdeyushchey smesi. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 11, 38-41. (in Russian).

9. Petlovanyi, M.V., Zubko, S.A., Sai, K.S., & Khalymendyk, O.V. (2021). Structural bonds development in the backfill mass when changing the dispersion of the binding material. *Energy and Resource-Saving Technologies of Developing the Raw-Material Base of Mining Regions: Multi-Author Monograph*, 294-312. <https://doi.org/10.31713/m1018>

10. Lyashenko, V.I., Tkachenko, A.A., & Chistyakov, E.P. (2006). Nauchno-tehnicheskie osnovy opredeleniya geomekhanicheskikh kharakteristik porodnykh massivov pri podzemnoy razrabotke uranovykh mestorozhdeniy. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 85-89. (in Russian).

11. Petlovanyi, M., Ruskykh, V., Zubko, S., & Mediany, V. (2020). Dependence of the mined ores quality on the geological structure and properties of the hanging wall rocks. *E3S Web of Conferences*, 201, 01027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101027>

12. Henning, J.G., & Mitri, H.S. (2007). Numerical modelling of ore dilution in blasthole stoping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), 692-703. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.11.002>

13. Petlovanyi, M., & Mamaikin, O. (2019). Assessment of an expediency of binder material mechanical activation in cemented rockfill. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(20), 3492-3503.

14. Liu, G., Li, L., Yang, X., & Guo, L. (2017). Numerical analysis of stress distribution in backfilled stopes considering interfaces between the backfill and rock walls. *International Journal of Geomechanics*, 17(2), 06016014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000702](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000702)

15. Kuzmenko, A.M., & Usaty, V.V. (2010). Raspredelenie napryazheniy v gornom massive vokrug vysokikh ochistnykh kamer pri razrabotke rudnykh mestorozhdeniy s tverdeyushchey zkladkoy. *Geotechnical Mechanics*, 94, 105-133. (in Russian).

16. Kaplenko, Yu.P., & Tsarikovsky, V.V. (2005). Vliyanie napryazhennogo sostoyaniya

gornogo massiva i gorno-geologicheskikh usloviy na parametry obnazheniy i formu ochistnykh kamer. *Development of Ore Deposits*, 88, 11-24. (in Russian).

17. Emad, M.Z., Mitri, H.S., & Henning, J.G. (2012). Effect of blast vibrations on the stability of cemented rockfill. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 26(3), 233-243. <https://doi.org/10.1080/17480930.2012.707527>

18. Yu, T.R. (1992). Mechanisms of fill failure and fill strength requirements. *Proceedings of the 16th Canadian Rock Mechanics Symposium, Canada*, 43-46.

19. Kalinichenko, V.A. (2006). Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kombinirovannykh iskusstvennykh massivov. *Sustainable Development of the Mining and Metallurgical Industry*, 155-156. (in Russian).

20. Kuzmenko, A.M., & Petlovanyi, M.V. (2014). Vliyaniye struktury gornogo massiva i poryadka otrabotki kamernykh zapasov na razubozhivaniye rudy. *Geotechnical Mechanics*, 118, 37-45. (in Russian).

21. Lyashenko, V.I., Golik, V.I., Dmitrak, Y.V., & Franchuk, V.P. (2021). Rationale for the

parameters of the vibration gravity transportation of solidifying filling mixtures to mines. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 19(1), 4-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16>

22. Stovmanenko, A.Y., Volkov, E.P., & Anushenkov, A.N. (2019). Improving the efficiency of pipeline transport of stowage mixes in the conditions of underground mining of mineral deposits. *Mining Equipment and Electromechanics*, 146(6), 33-41. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-6-33-41>

23. Chistyakov, E., Ruskih, V., & Zubko, S. (2012). Investigation of the geomechanical processes while mining thick ore deposits by room systems with backfill of worked-out area. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 127-132. <https://doi.org/10.1201/b13157-23>

24. Chistyakov, E.P., Kulish, S.A., Moshinskiy, V.I., & Zubko, A.N. (2011). Instruktsiya po opredeleniyu parametrov ochistnoy vyemki pri sistemakh razrabotki s tverdeyushchey zakladkoy na Zaporozhskom zhelezorudnom kombinatе. Kryvyi Rih: NIGRI. (in Russian).

Надійшла до редакції 10.05.2021

Рецензент канд. техн. наук, доц. А.В. Мерзлікін

Петльований Михайло Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна).

E-mail: petlyovany@ukr.net

Сай Катерина Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна).

E-mail: katernina.sai@gmail.com

MODELING THE STRESS STATE OF THE BACKFILLING MASS WITH DIFFERENT PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Purpose. Analytical researches of the stress state of the backfilling stopes with different physical and mechanical properties using numerical modeling to determine possible zones of stability losses and predict their failure.

Methods. Numerical modeling of the formation of stresses around a high stopes was carried out for the conditions of mining iron ore reserves in the depth intervals of 740-1040 m of the Pivdenno-Bilozerske deposit, where mining operations are actively carried out using the finite element method in the SolidWorks 2016 software package with reliable substantiation of the parameters of the developed geomechanical model.

Results. Numerical simulation of the stress state of the backfilling mass are carried out at variable values of the modulus of its elasticity and the mining depth. It was found that with the existing actual physical and mechanical properties of the backfilling mass during the development of the Pivdenno-Bilozerske deposit, the danger of its failure is predicted at depths of more than 890 m. In the center of the filling array, the stress values change linearly, and at the junction of the roof with the side of the backfilled stopes – polynomial. It was found that an increase in the modulus of elasticity of the backfilling mass allows to reduce the compressive stresses only at the junction of the roof with the side of the backfilled stopes to a value of 800 MPa.

Scientific novelty. With an increase in the depth of development, despite an increase in the elastic modulus of the fill, the values of stresses increase, which eliminates the need to increase it with a decrease in the mining depth it was found.

Practical significance. The results obtained make it possible to correct the technology of formation of a backfilling mass in the primary stopes, taking into account the formation of stresses on its contour and, with an increase in the mining depth, to form a backfilling mass with viscoplastic properties.

Keywords: embedded massif, stress, elastic modulus, numerical modeling, stability, fracture zones.

Petlovanyi Mykhailo Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining Engineering and Education, Dnipro University of Technology (19 Yavornytskoho Ave., 49005, Dnipro, Ukraine)

E-mail: petlyovany@ukr.net

Sai Kateryna Serhiivna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining Engineering and Education, Dnipro University of Technology (19 Yavornytskoho Ave., 49005, Dnipro, Ukraine)

E-mail: kateryna.sai@gmail.com