

УДК 622.234.4: 622.349.5: 622.831

М.І. СТУПНІК, В.О. КАЛІНІЧЕНКО, доктори техн. наук, професори, М.Б. ФЕДЬКО, Ю.О.МАЛІНОВСЬКИЙ, кандидати техн. наук, доценти, О.В. КАЛІНІЧЕНКО, канд. екон. наук, доц. Криворізький національний університет
В.М. ПУХАЛЬСЬКИЙ, канд. техн. наук, Б.І. КРИВОХІН
ДП «Східний гірничо-збагачувальний комбінат»

ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ СТЕЛИН ПРИ ПІДЗЕМНОМУ ВИЛУГОВУВАННІ УРАНОВИХ РУД З ЇХ ВІДПРАЦЮВАННЯМ СПАРЕНИМИ ПО ВИСОТІ БЛОКАМИ

Мета. Метою даної роботи є розробка методики визначення мінімально допустимої безпечної товщини міжповерхового цілика-стелини при підземному блоковому вилуговуванні уранових руд з відпрацюванням покладів спареними по висоті блоками.

Методи дослідження. Для визначення несучої здатності стелин було застосовано аналітичні методи теорії пружності гірських порід та законів гірничої механіки. Це дає змогу в умовах відсутності практичного досвіду застосування на шахтах Державного підприємства «Східний гірничо-збагачувальний комбінат» технології відпрацювання покладів спареними по висоті блоками при підземному блоковому вилуговуванні уранових руд визначити для конкретних умов виймальних блоків необхідну товщину стелин, яка забезпечує їх стійкість.

Наукова новизна. На вітчизняних шахтах та у світовій практиці відсутній досвід відпрацювання покладів уранових руд шляхом їх підземного блокового вилуговування спареними по висоті блоками. Тому уперше запропонована методика визначення безпечної товщини стелин для конкретних гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов при застосуванні вищезазначеної технології видобування уранових руд.

Практична значимість. Запропонована методика визначення товщини стелин при застосуванні підземного блокового вилуговування уранових руд з відпрацюванням покладів спареними по висоті блоками дає змогу на етапі виконання проектних робіт визначити їх необхідну для конкретних гірничо-геологічних умов товщину. Це дає можливість уникнути можливого руйнування стелин, забезпечити їх стійкість і безпеку робіт.

Результати. На підставі виконаних досліджень та встановлених залежностей опрацьований алгоритм визначення товщини стелин для конкретних умов очисних блоків шахт Державного підприємства «Східний гірничо-збагачувальний комбінат». Визначення безпечної товщини стелини згідно запропонованої методики дає змогу реалізувати при застосуванні підземного блокового вилуговування уранових руд технології відпрацювання покладів спареними по висоті блоками. Це дозволяє забезпечити безпеку робіт та зменшити собівартість видобутку уранових руд за рахунок скорочення обсягів проведення гірничих виробок.

Ключові слова: уранові руди, підземне блокове вилуговування, товщина стелини, стійкість, безпека.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-46-3-9

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Запаси уранових руд в надрах нашої держави складають близько 4% від світових. Їх видобування в Україні здійснює Державне підприємство «Східний гірничо-збагачувальний комбінат» (ДП «СхідГЗК»), яке забезпечує близько третини від паливних потреб вітчизняних атомних електростанцій. Відпрацювання покладів уранових руд на шахтах ДП «СхідГЗК» здійснюється переважно камерними системами з наступною закладкою виробленого простору твердіючими сумішами.

Така технологія внаслідок дуже складної морфології залягання покладів є вельми затратною і її економічно доцільно застосовувати для відпрацювання руд з підвищеним вмістом урану. Проте поклади на шахтах Східного ГЗК представлені в основному бідними урановими рудами. Тому відпрацювання найменш цінних ділянок доцільно здійснювати з використанням технології підземного блокового вилуговування. Ця технологія дає можливість, з одного боку, підвищити вилучення корисного компоненту, а з іншого – виключити з виробничого ланцюга низку трудомістких та екологічно небезпечних операцій, а саме приготування твердіючих сумішей та закладку ними виробленого простору, утилізацію пустих порід та забалансових руд.

Для зменшення втрат при застосуванні технології вилуговування можливо використати її варіант з відпрацюванням покладів спареними по висоті блоками. Його сутність полягає у тому, що під вже підготовленою та заповненою відбитою рудою камерою розташовують ще одну камеру, відокремлену міжповерховим ціликом-стелиною. Цю стелину обвалюють після відбитки усього камерного запасу нижче розташованого блоку, потім всю відбиту руду зрошують кислотним розчином з виробок, пройдених над камерою розташованого вище блоку. Оскільки така технологія є за своєю суттю новою для шахт Східного ГЗК, то в чинній інструкції [1], яка є нормативним документом, відсутня методика визначення товщини стелин. Це пов'язано з тим,

що традиційна технологія відпрацювання уранових руд камерними системами з наступною твердіючою закладкою виробленого простору не передбачає залишення стелин.

У нашому випадку термін існування стелин становитиме від 3...4 до 6 місяців і на цей період їх параметри (зокрема товщина), повинні забезпечувати їх стійкість для гарантування безпеки робіт. Тому розробка методики, яка б давала можливість розраховувати для конкретних умов безпечну товщину стелин, є актуальним питанням і складає, власне, предмет цих досліджень.

Аналіз досліджень і публікацій. Теоретичні засади та технологічні особливості застосування різноманітних геотехнологій видобування корисних копалин, у тому числі й підземного вилуговування уранових руд доволі детально викладено у багатьох працях, зокрема [2-6]. Більш детально технологія гірничих робіт при застосуванні підземного блокового вилуговування бідних уранових руд в умовах шахт Східного ГЗК приведена у роботі [7]. Але у вказаних джерелах розглядаються, так би мовити, «класичні» варіанти підземного блокового вилуговування уранових руд. У випадку реалізації відпрацювання покладів цих руд спареними по висоті блоками, як вже зазначалося, з'являється необхідність залишення поміж камерами стелини, безпечні параметри якої необхідно визначити на етапі виконання проектних робіт. Методика визначення товщини таких стелин відсутня як у діючій на шахтах ДП «СхідГЗК» інструкції [1], так і у відповідній науково-технічній літературі.

Постановка завдання. Умови відробки очисних блоків, де передбачається застосування технології підземного блокового вилуговування уранових руд з їх відпрацюванням спареними по висоті блоками є подібними до умов, що мають місце при відробці залізорудних покладів камерними системами розробки, зокрема у Криворізькому басейні. На шахтах Кривбасу для визначення проектних розмірів рудних стелин застосовують інструкцію НДГРІ [8], в основу якої покладений метод розрахункових функціональних характеристик. Цей метод є виключно емпіричним і базується на залежностях, отриманих шляхом статистичної обробки значного масиву зібраної виробничої інформації, щодо стійкості конструктивних елементів систем розробки, яка повністю відсутня на шахтах ДП «СхідГЗК». Тому визначення несучої здатності, а відповідно й мінімально допустимої товщини стелин в прийнятні терміни у даному випадку є доцільним шляхом аналітичних досліджень, тобто розробленням розрахункового інструментарію, що базується на законах гірничої механіки та теорії пружності для суцільних середовищ, якими власне є міцні руди та породи, що складають родовища шахт ДП «СхідГЗК».

Постановка завдання. Умови відробки очисних блоків, де передбачається застосування технології підземного блокового вилуговування уранових руд з їх відпрацюванням спареними по висоті блоками є подібними до умов, що мають місце при відробці залізорудних покладів камерними системами розробки, зокрема у Криворізькому басейні. На шахтах Кривбасу для визначення проектних розмірів рудних стелин застосовують інструкцію НДГРІ [8], в основу якої покладений метод розрахункових функціональних характеристик. Цей метод є виключно емпіричним і базується на залежностях, отриманих шляхом статистичної обробки значного масиву зібраної виробничої інформації, щодо стійкості конструктивних елементів систем розробки, яка повністю відсутня на шахтах ДП «СхідГЗК». Тому визначення несучої здатності, а відповідно й мінімально допустимої товщини стелин в прийнятні терміни у даному випадку є доцільним шляхом аналітичних досліджень, тобто розробленням розрахункового інструментарію, що базується на законах гірничої механіки та теорії пружності для суцільних середовищ, якими власне є міцні руди та породи, що складають родовища шахт ДП «СхідГЗК».

Викладення матеріалу та результати. Представимо стелину у вигляді плити рівномірної товщини, рівномірно привантаженої по всій своїй площі та жорстко прикріпленої по периметру камери до оточуючого масиву гірських порід (рис. 1). Прогини такої плити-стелини $w(x,y)$ та її напружено-деформований стан можна визначити з диференційного рівняння вигину пластини у С. Жермен-Лагранжа, яке отримане при відсутності подовжніх зусиль в її серединній площині [9]. Рівняння вигину стелини у такому випадку має вигляд

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D}, \quad (1)$$

де q – розподілене навантаження по поверхні стелини, т/м²; x, y – координати точок стелини, м; D – циліндрична жорсткість стелини, т·м;

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\mu^2)},$$

де h – товщина стелини (плити), m ; μ , E – відповідно, коефіцієнт Пуассона та модуль пружності (модуль Юнга) гірських порід, з яких складена стелина.

За умови прийнятого жорсткого защемлення стелини по її периметру, прогин та кут повороту нормального елемента дорівнюють 0. Так,

$$\text{для краю } x = 0; w = 0; \frac{\partial w}{\partial x} = 0;$$

$$\text{для краю } y = 0; w = 0; \frac{\partial w}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

У якості розв'язання рівняння (1), з урахуванням граничних умов (2), приймаємо тригонометричний ряд

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left(1 - \cos \frac{2m\pi x}{a}\right) \cdot \left(1 - \cos \frac{2n\pi y}{b}\right), \quad (3)$$

де A_{mn} – амплітудні значення прогину при різних значеннях m, n ; m, n – прості цілі непарні числа; a, b – розміри стелини в плані (її ширина та довжина), м.

У першому наближенні, з урахуванням рівномірно розподіленого навантаження q , будемо мати прогин (4) у довільній точці стелини (5)

$$w_{11} = A_{11} = \frac{q \cdot a \cdot b}{\frac{4D \cdot \pi^4 b}{a^3} [3 + 3\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 2\left(\frac{a}{b}\right)^2]}; \quad (4)$$

$$w_{11}(x, y) = \frac{q \cdot a \cdot b}{\frac{4D \cdot \pi^4 b}{a^3} [3 + 3\left(\frac{a}{b}\right)^4 + 2\left(\frac{a}{b}\right)^2]} \cdot \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \cdot \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right). \quad (5)$$

Перейдемо до визначення силових факторів (моментів та напружень) у стелині, зображених на рис. 1.

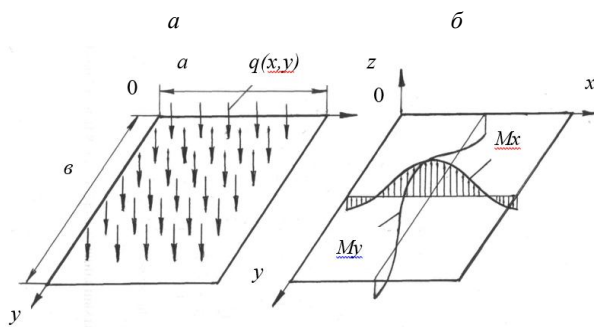


Рис. 1. Схематичне зображення стелини у вигляді «товстої» плити: а – схема навантаження стелини та її закріплення по контуру; б – схема розподілу вигинаючих моментів по зовнішній поверхні стелини

Зробимо припущення, що напруження в серединній площині стелини відсутні, тобто

$$\sigma_{xx}^0 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{xx}^0 + \mu \varepsilon_{yy}^0) = 0;$$

$$\sigma_{yy}^0 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{yy}^0 + \mu \varepsilon_{xx}^0) = 0;$$

$$\sigma_{xy}^0 = 2G\varepsilon_{xy}^0.$$

Тоді напруження в стелині можуть бути визначені з виразів

$$\sigma_{xx} = \frac{-Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \quad \sigma_{yy} = \frac{-Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); \quad \sigma_{xy} = \frac{Ez}{1+\mu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.$$

Нашу задачу про напружено-деформований стан стелини під дією рівномірно розподіленого навантаження q розв'язували у першому наближенні, виходячи з виразу (5).

Знаходимо вирази

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_{11}}{\partial x} &= A_{11} \frac{2\pi}{a} \sin \frac{2\pi x}{a} \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right); \\ \frac{\partial^2 w_{11}}{\partial^2 x^2} &= A_{11} \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right); \\ \frac{\partial w_{11}}{\partial y} &= A_{11} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \frac{2\pi}{b} \sin \frac{2\pi y}{b} = A_{11} \frac{2\pi}{b} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \sin \frac{2\pi y}{b}; \\ \frac{\partial^2 w_{11}}{\partial^2 y} &= A_{11} \frac{4\pi^2}{b^2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \cos \frac{2\pi y}{b}; \\ \frac{\partial^2 w_{11}}{\partial x \partial y} &= A_{11} \frac{2\pi}{a} \sin \frac{2\pi x}{a} \frac{2\pi}{b} \sin \frac{2\pi y}{b}. \end{aligned}$$

Знаходимо вигинаючі моменти у стелині на підставі [9,10] у наступному вигляді

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = -DA_{11} \left(\frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right) + \mu \frac{4\pi^2}{b^2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \cos \frac{2\pi y}{b} \right); \quad (6)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = -DA_{11} \left(\frac{4\pi^2}{b^2} \cos \frac{2\pi y}{b} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) + \mu \frac{4\pi^2}{a^2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \cos \frac{2\pi y}{b} \right); \quad (7)$$

$$M_x = -D(1-\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = -D(1-\mu) A_{11} \frac{4\pi^2}{ab} \sin \frac{2\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b}. \quad (8)$$

Знаходимо нормальні напруження в стелині для точок на зовнішній або внутрішній повер-

хні, використовуючи залежності

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{-E \cdot h}{2(1-\mu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = \\ &= \frac{-E \cdot h}{2(1-\mu^2)} \left(A_{11} \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} (1 - \cos \frac{2\pi y}{b}) + \mu A_{11} \frac{4\pi^2}{b^2} (1 - \cos \frac{2\pi x}{a}) \cos \frac{2\pi y}{b} \right) = \\ &= -\frac{E \cdot h}{2(1-\mu^2)} A_{11} \left(\frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} (1 - \cos \frac{2\pi y}{b}) + \mu \frac{4\pi^2}{b^2} (1 - \cos \frac{2\pi x}{a}) \cos \frac{2\pi y}{b} \right); \\ \sigma_{yy} &= \frac{-E \cdot h}{2(1-\mu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = -\frac{E \cdot h}{2(1-\mu^2)} A_{11} \left(\frac{4\pi^2}{b^2} (1 - \cos \frac{2\pi x}{a}) \cos \frac{2\pi y}{b} + \mu \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} (1 - \cos \frac{2\pi y}{b}) \right); \\ \sigma_{xy} &= \frac{E \cdot h}{2(1+\mu)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = \frac{Eh}{2(1+\mu)} A_{11} \frac{4\pi^2}{ab} \sin \frac{2\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b}.\end{aligned}$$

У приведених виразах для переміщень (3)-(5) та напружень, записаних через вигинаючі моменти (6)-(8), нами було використане одне (перше) наближення. Згідно даних [10], похибка при визначенні прогинів стелени по першому наближенню $w_{(x,y)} = w_{11(x,y)}$ не перевищує 2%. Оперуючи чотирма наближеннями згідно [11], отримані вирази для вигинаючих моментів прямокутної стелени, при цьому похибка обчислень не перевищує 1%.

З метою отримання більш достовірних результатів використаємо дані [11], які ґрунтуються на чотирьох наближеннях при отриманні кінцевих розрахункових формул. Схему спирання та навантаження стелени, згідно інтерпретації [11], представлено на рис. 2.

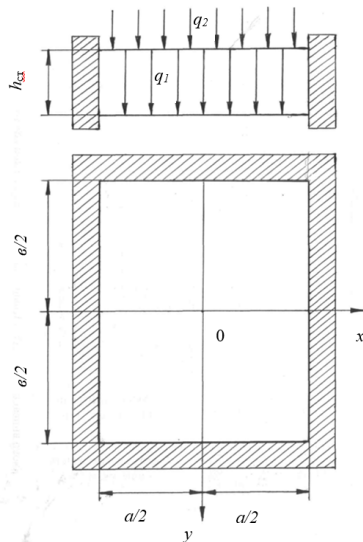


Рис.2. Розрахункова схема стелени для уточнення розрахунків прогинів та напружень (вигинаючих моментів) при дії рівномірно розподіленого навантаження та наявності жорсткого защемлення по усьому периметру

При цьому розрахункові формули можна використати у вигляді

$$\sigma_{xx} = \frac{M_x}{h^3/12} Z; \sigma_{yy} = \frac{M_y}{h^3/12} Z; \sigma_{xy} = \frac{M_{xy}}{h^3/12} Z.$$

Виходячи з прийнятої схеми стелени та даних [11], отримані розрахунки залежності прогинів та вигинаючих моментів для різних точок стелени при різних співвідношеннях її сторін b/a . Для більшої зручності виконання практичних розрахунків, розрахункові формули представлені у табличній формі (табл. 1).

Визначимо навантаження на поверхню стелени. Розподілене навантаження буде складатися з навантаження, яке визначається власною вагою стелени q_1 та навантаження, яке визначається вагою відбитої руди, що знаходиться у розташованій над стелиною камері q_2 , т/м²

$$q_1 = \gamma_1 \cdot \frac{a \cdot b \cdot h_{ст}}{a \cdot b} = \gamma_1 \cdot h_{ст}; \quad q_2 = \gamma_2 \cdot H_{вр},$$

де γ_1 – об'ємна вага гірських порід, що складають стелину, т/м³; $h_{ст}$ – товщина стелени, м; γ_2 – об'ємна вага відбитої руди, що знаходиться у розташованій над стелиною камері, т/м³; $H_{вр}$ – висота шару відбитої руди в камері, м.

Товщина стелени $h_{ст}$, яка повинна забезпечувати її стійкість (тобто унеможливити руйнування), повинна відповідати наступній вимозі

$$h_{ст} \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_{max} \cdot K_3}{[\sigma] \cdot K_{зм}}}, \quad (9)$$

де M_{max} – максимальний вигинаючий момент в стелині; $K_3 = 2 \dots 3$ – коефіцієнт запасу міцності стелени, долі од.; $[\sigma]$ – межа міцності гірських порід, що складають стелину, т/м²; $K_{зм} = K_{тр} \cdot K_{кр}$ – коефіцієнт, який враховує зменшення міцності порід стелени від дії різних факторів, долі од.

Оскільки у горизонтальній стелині найбільш небезпечними є розтягуючі напруження, то й відповідно необхідно керуватись межею міцності порід стелени на розтягування $[\sigma_p]$.

Основними факторами, які негативно впливають на міцність порід стелени, є тріщинуватість порід та вплив на них кислотного розчину, яким обробляють уранові руди при їх вилугуванні. Дослідженнями [12] встановлено ступінь впливу цих факторів можна через коефіцієнт тріщинуватості порід $K_{тр} = 0,8 \dots 1,0$ та коефіцієнт зменшення міцності порід від дії на них кис-

лотного розчину $K_{кр} = 0,6 \dots 0,65$.

З урахуванням вищезазначеного вираз (9) набуває вигляду

$$h_{ст} \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_{max} \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}}} \quad (10)$$

Максимальний вигинаючий момент в стеліні може бути визначений двома шляхами: з виразу $M_{max} = \beta \cdot (q_1 + q_2) \cdot a \cdot b$ за однією з формул (6-8) згідно [9], або за однією з формул, приведених у [11], наприклад $M_{max} = \beta_1 \cdot (q_1 + q_2) \cdot a^2$ (див. табл. 1). У цих виразах β, β_1 – постійні коефіцієнти вигинаючих моментів (див. формули (6), (7) та табл.1).

Таблиця 1

Прогини та вигинаючі моменти рівномірно навантаженої прямокутної стеліни, жорстко защемленої по периметру камери ($\mu = 0,3$)

b/a	(ω) $x=a/2, y=0$	M_x $x=a/2, y=0$	M_y $x=0, y=b/2$	M_x $x=0, y=0$	M_y $x=0, y=0$
1,0	0,00126 qa^4/D	-0,0513 qa^2	-0,0513 qa^2	0,0231 qa^2	0,0231 qa^2
1,1	0,00150 qa^4/D	-0,0581 qa^2	-0,0538 qa^2	0,0264 qa^2	0,0231 qa^2
1,2	0,00172 qa^4/D	-0,0639 qa^2	-0,0554 qa^2	0,0299 qa^2	0,0228 qa^2
1,3	0,00191 qa^4/D	-0,0687 qa^2	-0,0563 qa^2	0,0327 qa^2	0,0222 qa^2
1,4	0,00207 qa^4/D	-0,0726 qa^2	-0,0568 qa^2	0,0349 qa^2	0,0212 qa^2
1,5	0,00220 qa^4/D	-0,0757 qa^2	-0,0570 qa^2	0,0368 qa^2	0,0203 qa^2
1,6	0,00230 qa^4/D	-0,0780 qa^2	-0,0571 qa^2	0,0381 qa^2	0,0193 qa^2
1,7	0,00238 qa^4/D	-0,0799 qa^2	-0,0571 qa^2	0,0392 qa^2	0,0182 qa^2
1,8	0,00245 qa^4/D	-0,0812 qa^2	-0,0571 qa^2	0,0401 qa^2	0,0174 qa^2
1,9	0,00249 qa^4/D	-0,0822 qa^2	-0,0571 qa^2	0,0407 qa^2	0,0165 qa^2
2,0	0,00254 qa^4/D	-0,0829 qa^2	-0,0571 qa^2	0,0412 qa^2	0,0158 qa^2
∞	0,00260 qa^4/D	-0,0833 qa^2	-0,0571 qa^2	0,0417 qa^2	0,0125 qa^2

У результаті підстановки значень M_{max} та q_1, q_2 у вираз (10), що містить величину $h_{ст}$, отримуємо нерівність (11), з якої можливо визначити необхідну товщину стеліни для заданих умов

$$h_{ст}^2 \geq \frac{6\beta \cdot (\gamma_1 \cdot h_{ст} + \gamma_2 \cdot H_{вр}) \cdot a \cdot b \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}}, \quad (11)$$

де β – коефіцієнт, значення якого залежить від способу навантаження стеліни, умов її защемлення, співвідношення сторін (b/a) та фізико-механічних властивостей порід, що складають стеліну (постійна частина цього виразу).

У виразі (11) приймемо знак рівності, тоді

$$h_{ст}^2 - \frac{6\beta \cdot \gamma_1 \cdot a \cdot b \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} \cdot h_{ст} - \frac{6\beta \cdot a \cdot b \cdot H_{вр} \cdot \gamma_2 \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} = 0. \quad (12)$$

Якщо вигинаючі моменти в стеліні знаходимо згідно формул [11] для різних співвідношень a/b , тоді квадратне рівняння (12) набуває вигляду

$$h_{ст}^2 - \frac{6\beta_1 \cdot \gamma_1 \cdot a^2 \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} \cdot h_{ст} - \frac{6\beta_1 \cdot a^2 \cdot H_{вр} \cdot \gamma_2 \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} = 0, \quad (13)$$

де β_1 – коефіцієнт у виразах для вигинаючих моментів за даними [11], для визначення якого використовуємо табл. 1.

Необхідне значення товщини стеліни отримуємо шляхом розв'язування квадратного рівняння (12) відносно значення $h_{ст}$

$$h_{ст} \geq 3\beta \cdot \frac{\gamma_1 \cdot a \cdot b \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} + \sqrt{\frac{9\beta^2 \cdot \gamma_1^2 \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot K_3^2}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} + \frac{6\beta \cdot a \cdot b \cdot H_{вр} \cdot \gamma_2 \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}}}$$

Якщо вигинаючі моменти визначають згідно [11], то товщину стеліни отримуємо у результаті розв'язування квадратного рівняння (13)

$$h_{ст} \geq 3\beta_1 \cdot \frac{\gamma_1 \cdot a^2 \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} + \sqrt{\frac{9\beta_1^2 \cdot \gamma_1 \cdot a^2 \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} + \frac{6\beta_1 \cdot a^2 \cdot H_{вр} \cdot \gamma_2 \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}}} \quad (14)$$

Оскільки з практичної точки зору визначення вигинаючих моментів у стеліні при відомому співвідношенні її сторін b/a значнопростіше здійснювати керуючись даними табл. 1, то в кінцевому варіанті пропонується наступний алгоритм визначення товщини стеліни:

1. При відомому співвідношенні сторін стеліни b/a з табл. 1 визначаємо значення коефіцієнта β_1 (момент M_x при $x=0, y=0$).

2. Для цього значення β_1 визначаємо максимальний вигинаючий момент в стелині з виразу

$$M_{max} = \frac{6 \cdot \beta_1 \cdot a^2 \cdot (\gamma_1 \cdot h_{ст} + \gamma_2 \cdot H_{вп}) \cdot K_3}{[\sigma_p] \cdot K_{тр} \cdot K_{кр}} \quad (15)$$

3. Оскільки при визначенні M_{max} використовується ще невідоме значення товщини стелини $h_{ст}$, то в результаті розв'язання рівняння (14) ми будемо мати вираз

$$M_{max} = K_1 \cdot h_{ст} + K_2,$$

де K_1, K_2 – коефіцієнти, отримані для заданих умов.

4. Визначаємо необхідну товщину стелини, розв'язуючи квадратне рівняння (13), яке після перетворень набуває вигляду

$$h_{ст} = \frac{K_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{K_1}{2}\right)^2 + K_2}. \quad (16)$$

5. У випадку наявності в стелині пройдених виробок, коригуємо її необхідну товщину з урахуванням ослаблення масиву стелини цими виробками

$$h_{ст}^n = h_{ст} \cdot K_{нор}, \quad (17)$$

де $K_{нор}$ – коефіцієнт, який враховує ступінь порушеності стелини пройденими у ній виробками, долі од.

Оскільки ступінь порушеності стелини буде залежати від кількості пройдених у ній виробок, геометричних розмірів (зокрема висоти) як кожної з цих виробок, так і загальної потужності стелини, згідно виконаних досліджень [12] числове значення коефіцієнта $K_{нор}$ ми пропонуємо визначати як добуток окремих коефіцієнтів K_i , кожен з яких диференційовано враховує вплив кожної з пройдених в стелині виробок, а саме

$$K_{нор} = K_{1e} \cdot K_{2e} \cdot \dots \cdot K_n, \quad (18)$$

де n – кількість пройдених в стелині виробок, шт.

Числове значення цих коефіцієнтів, які розраховуються для кожної виробки, визначаємо за формулою

$$K_i = \sqrt{1 + (h_i^e / h_{cm})^2}, \quad (19)$$

де h_i^e – висота i -тої виробки, м.

Наведемо у якості прикладу розрахунок товщини стелини у прив'язці до конкретних умов ш. «Інгульська» Східного ГЗК, а саме покладу 10 Мічуринського родовища для блоків "10-2" та "10-3", які розташовані в маркшейдерських осях 86-90+7 у поверсі 325-184м, в яких передбачається застосування технології підземного блокового вилуговування уранових руд спареними по висоті блоками. Стеліна камери блоку "10-3" представлена альбітитами по мігматитам об'ємною масою $\gamma_1 = 2,65 \text{ т/м}^3$ із коефіцієнтом міцності $f = 14-16$ балів за шкалою проф. М.М. Протодьяконова (приймаємо середнє значення $f = 15$). Розміри стелини в плані становлять: ширина $a = 35$ м, довжина $b = 47$ м. У стелині пройдено 3 горизонтальні виробки розміром 3×3 м кожна. Стеліна привантажена відбитою рудою, яка знаходиться у розташованій вище камері блока "10-2". Об'ємна маса відбитої руди γ_2 становить $1,9 \text{ т/м}^3$, а висота шару цієї руди $H_{вп}$ складає близько 60 м. Коефіцієнт запасу міцності стелини приймаємо $K_3 = 2,5$.

Згідно інструкції [13] межа міцності порід стелини на стискання при $f = 15$ балів складає 20310 т/м^2 , на розтягування – 1420 т/м^2 . З урахуванням виконаних нами досліджень [12], якими встановлено ступінь впливу кислотного розчину на міцність гірських порід, приймаємо, що при тривалості дії 4 місяці це зниження складе 38...39%. Тобто міцність порід такої стелини з урахуванням її ослаблення тріщинами (приймаємо $K_{тр} = 0,95$) та від дії кислотного розчину ($K_{кр} = 0,615$) становитиме, відповідно, на стискання $20310 \cdot 0,95 \cdot 0,615 = 11866 \text{ т/м}^2$, а на розтягування – $1420 \cdot 0,95 \cdot 0,615 = 830 \text{ т/м}^2$.

При співвідношенні сторін стелини $b/a = 47/35 = 1,343$ з табл. 1 визначаємо значення коефіцієнта $\beta_1 = 0,0336$. Максимальний вигинаючий момент в стелині згідно (15) складе

$$M_{max} = \frac{6 \cdot 0,0336 \cdot 35^2 \cdot (2,65 \cdot h_{ст} + 1,9 \cdot 60) \cdot 2,5}{1420 \cdot 0,95 \cdot 0,615} = 1,97 \cdot h_{ст} + 84,8.$$

Товщина стелини згідно виразу (16) становитиме, м

$$h_{ст} = \frac{1,97}{2} + \sqrt{\left(\frac{1,97}{2}\right)^2 + 84,8} = 10,24.$$

Оскільки стеліна порушена пройденими у ній виробками, її товщину коригуємо з

урахуванням поправочного коефіцієнта K_{nop} згідно виразів (17)-(19), м

$$K_i = \sqrt{1+(3/9,9)} = \sqrt{1,303} = 1,137;$$

$$K_{nop} = K_{1g} \cdot K_{2g} \cdot K_{3g} = 1,137 \cdot 1,137 \cdot 1,137 = 1,47;$$

$$h_{ст}^n = 10,24 \cdot 1,47 = 15,05 .$$

Таким чином необхідна товщина такої стелини в заданих умовах повинна становити 15 м.

Висновки та напрямок подальших досліджень. В результаті виконаних досліджень запропонована методика визначення товщини стелини при застосуванні підземного блокового вибуговування уранових руд з відпрацюванням покладів спареними по висоті блоками. Методику у подальшому планується використати при розробленні інструктивно-методичних вказівок з визначення безпечних параметрів стелини в очисних блоках шахт ДП «СхідГЗК», де буде застосовуватись вищезазначена технологія. Визначення безпечної товщини стелини згідно запропонованої методики дасть змогу на етапі виконання проектних робіт визначити їх необхідну для конкретних умов товщину, що дозволить запобігти руйнуванню стелини, забезпечити їх стійкість і безпеку робіт, а реалізація такої технології сприятиме зменшенню собівартості видобутку уранових руд. Певне уточнення встановлених залежностей у майбутньому можливе з урахуванням практичного досвіду роботи шахт ДП «СхідГЗК».

Список літератури

1. Инструкция по обоснованию безопасных и устойчивых параметров очистных блоков на шахтах ГП «Вост-ГОК. – Желтые Воды: ГП «УкрНИПИИпромтехнологии», 2014. – 67с.
2. **Аренс В.Ж.** Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых / **В.Ж. Аренс , Ф.М. Гайдин.** – М.: Недра, 1978. – 215 с.
3. Добыча урана методом подземного выщелачивания: / под ред. **В.А. Мамилова.** – М.: Атомиздат, 1980. – 248с.
4. **Мосинец В.Н.** Строительство и эксплуатация рудников подземного выщелачивания / **В.Н.Мосинец, Д.П. Лобанов, М.Н. Тадеев** и др. – М.: Недра. 1987. – 304 с.
5. **Чернова А.П.** Добыча и переработка урановых руд в Украине / **А.П.Чернова., М.И. Бабак, Ю.И. Кошик, О.К. Авдеев** и др. – К.: АДЕФ-Украина, 2001. – 238 с.
6. **Мальцев Д.В.** Фізико-хімічна геотехнологія (видобуток урану): навч. посібник [Електронний ресурс] / **Д.В. Мальцев, О.Б. Владико.** - М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д. : НГУ, 2015. – 120 с.
7. **Куча П.М.** Технология подземных работ при горно-химической отработке бедных урановых руд в условиях шахт ГП «ВостГОК» / **П.М. Куча, Б.Н. Андреев** // «Форум гірників»: міжн. наук.-техн. конф. – Дніпропетровськ: РВК НГУ. – 2009. – С. 121 – 125.
8. Визначення та контроль допустимих розмірів конструктивних елементів систем розробки залізних руд. Інструкція по застосуванню / **Є. Бабець, В. Сакович, С. Сиротюк, В. Цариковський** та ін.- Кривий Ріг: Ротапринт ДП «НДГРІ», 2010. – 122с.
9. **Зубганинов В.Г.** Основы теории упругости и пластичности. – М.: «Высшая школа». 1990.
10. **Бояршинов С.В.** Основы строительной механики машин. - М.: «Машиностроение», 1973.
11. **Тимошенко С.П.** Пластинки и оболочки / **С.П.Тимошенко, С. Войновский-Кригер.** - М.: Наука, 1966. – 635с.
12. Дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву в зоні проведення гірничих робіт, розробка алгоритму розрахунку параметрів та стійкості очисних блоків під заповненими камерами (закл. звіт по договору № 370/02 від 24.04.2017 р.) / **М.Б.Федько, М.І. Ступнік, В.О. Калініченко.** – Кривий Ріг: АГН України, КП «Академічний дім», 2017.-115с.
13. Інструкція із визначення стійкості гірських порід при проходженні гірничих виробок в умовах уранових родовищ, що розробляються ДП «СхідГЗК» / **Є.П. Чистяков, Д.С. Чистяков, О.І. Федоренко, В.І. Мошинський.** - Кривий Ріг: НДГРІ ДВНЗ «КНУ», 2012. - 28 с.

Рукопис подано до редакції 18.04.2018

УДК 622.235

О.О. ФРОЛОВ, д-р техн. наук, проф., Ю.С. МАЛЬЦЕВА, студентка
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРУ СВЕРДЛОВИННОГО ЗАРЯДУ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ОЦІНКИ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ

Мета. Метою роботи є розробка найбільш ефективної методики визначення діаметра свердловинного заряду вибухової речовини в конкретних гірничо-геологічних умовах відпрацювання родовища.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети роботи використано метод комплексного аналізу – для узагальнення та аналізу досягнень попередніх наукових досліджень щодо встановлення найбільш раціональних діаметрів свердловинних зарядів вибухових речовин та аналітичний метод – для розробки найбільш ефективної методики визначення діаметра свердловинного заряду при проведенні буропідричних робіт на кар'єрах в конкретних