

М.В. Дзьоба, аспірант
І.Д. Литвинчук, аспірант
О.О. Фролов, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Встановлення закономірностей впливу ширини блоків розбивки зсувного клина на значення коефіцієнта стійкості укосу уступу кварцових пісків

У науковій статті наведено результати досліджень зі встановлення впливу ширини блоків (секцій), на які розбивається зсувний клин, на значення коефіцієнта стійкості укосу уступу кварцових пісків в умовах Сихівського родовища. За результатами аналізу попередніх досліджень зауважено, що під час визначення коефіцієнта стійкості методом граничних побудов немає чітких вимог та рекомендації щодо значень ширини блоків розбивки зсувного клину. Вказується лише на необхідність дотримання однакової ширини блоків.

Попередні дослідження авторів щодо визначення ступеня стійкості робочого уступу на кар'єрі Сихівського родовища виявили безпосередній вплив ширини блоків розбивки зсувного клину на чисельне значення коефіцієнта стійкості уступу. А також показано суттєву різницю між чисельними значеннями коефіцієнтів стійкості укосу уступу, розрахованих за нормативним методом та методами аналізу в пакетах прикладних програм.

Під час досліджень встановлено закономірність впливу кількості блоків розбивки (а відповідно і ширини блоків) зсувного клину на чисельні значення коефіцієнта стійкості укосу.

Встановлено, що для кута укосу уступу кварцового піску $\alpha = 50$ та висоти уступу $H = 20$ м збільшення кількості блоків розбивки зсувного клину з 5 до 25 (тобто зменшення ширини блоків з 4,05 до 0,81 м) призводить до зменшення чисельного значення коефіцієнта стійкості укосу з 0,85 до 0,75 та наближає його до даних, розрахованих прикладними методами аналізу.

Отримано графічну залежність впливу ширини блоків розбивки зсувного клину поверхні ковзання на коефіцієнт стійкості укосу уступу для умов розробки кварцових пісків Сихівського родовища. Ця залежність має лінійний характер у цьому діапазоні досліджень та описується відповідною функцією.

Ключові слова: зсувний клин; поверхня ковзання; блок розбивки; кварцовий пісок; робочий уступ; коефіцієнт стійкості укосу; метод графічних побудов; методи аналізу прикладних програм.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Ефективність та стабільність роботи гірничого підприємства з видобутку корисних копалин відкритим способом залежить насамперед від дотримання зазначених у проєктах на розробку технологічних параметрів кар'єру. Одним з таких параметрів є кути укосу уступів та бортів кар'єру. Правилами безпеки регламентується дотримання певних значень укосів для забезпечення їх стійкості. Критерієм оцінки стійкості укосів і схилів є коефіцієнт стійкості укосу K_{st} , який дорівнює відношенню сум усіх утримуючих сил до зсуваючих сил [1, 2]. Граничні значення K_{st} , залежно від умов розробки, наведено в нормативній та довідковій літературі [3, 4]. В теперішній час для його визначення існує значна кількість методів. Зокрема, це інженерні методи графічних побудов (класичні та спрощені), ціла низка розрахункових методів, які реалізовані в пакетах прикладних програм, та методи чисельного моделювання [5, 6]. Однак нормативним методом визначення стійкості укосу гірського масиву до цього часу залишається метод графічних побудов за Г.Л. Фісенко.

Науковці, які досліджують стійкість схилів масиву гірських порід, зазначають, що чисельні значення коефіцієнтів стійкості укосів при методі графічних побудов істотно відрізняються від результатів, які отримані під час використання відомих розрахункових програмних комплексів за різних методів аналізу [7, 8]. Крім того, отримані коефіцієнти стійкості методів граничних побудов також різняться між собою при розбивці визначеного зсувного клину на різну кількість блоків (секцій) [9].

У зв'язку з цим, у статті проведено дослідження з виявлення причин зазначених розбіжностей під час визначення коефіцієнтів стійкості укосів масивів та встановлення найбільш достовірного значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У методичних вказівках з визначення кутів нахилу бортів, укосів уступів та відвалів кар'єрів зазначається, що під час розрахунку коефіцієнта стійкості борта (укосу) методом алгебраїчного складання сил потенційна призма обрушення масиву гірських порід, яка обмежується найбільш напруженою поверхнею ковзання, розбивається вертикальними лініями на декілька блоків однакової ширини. Кількість цих блоків та їх параметри при цьому не вказуються.

Також у пропозиціях щодо розрахунку стійкості укосів високих насипів та глибоких виїмок вказується, що для визначення коефіцієнта стійкості гірського масиву отриманий при побудові зсувний клин розділяють вертикальними перерізами на декілька блоків, які повинні мати приблизно однакову ширину. При цьому ширина цих блоків не має бути більшою за 2–3 м для зменшення похибки у розрахунках. Однак у навчально-методичному посібнику Р.Р. Хасанова щодо розрахунку стійкості грантового укосу вказано, що масив сповзаючого ґрунту необхідно розбивати вертикальними лініями на блоки шириною не більше 3–4 м.

У рекомендаціях по кількісній оцінці стійкості зсувного ухилу зазначається, що кількість відсіків (блоків) і відстані між їх боковими гранями в однорідному гірському масиві варто обирати таким чином, щоб ломана лінія, яка утворюється підшвами відсіків, найбільше відповідала б дузі кола. Якщо ж гірський масив є неоднорідним та складним за будовою, то величина і кількість відсіків обираються відповідно до геологічної будови, морфології схилу і форми поверхні зміщення. В межах кожного відсіку поверхня ковзання приймається пласкою.

При оцінці стійкості бортів кар'єрів (розрізів) та відвалів дослідники О.А. Григор'єв, О.В. Горбунова та О.М. Дев'яткіна вказують на те, що призму можливого обвалення в масиві порід, яка приймає до укосу та обмежена найбільш напруженою поверхнею, варто розбивати вертикальними лініями на ряд блоків. При цьому ширину першого (починаючи від верхньої брівки) блоку для зручності розрахунків можна приймати як таку, що дорівнює ширині призми можливого обвалення, а решту – 10...20 м.

У [10] зазначено, що для встановлення коефіцієнта стійкості уступу методом графічних побудов зону можливого обрушення розділяють на окремі блоки: перший блок дорівнює ширині призми можливого обвалення a , тобто $b_1 = a$; ширину наступних блоків варто визначати як $b_i = 0,1R$ (R – радіус кругло-циліндричної поверхні ковзання). В той же час автор зазначає, що чим більша кількість блоків у зсувному клині, тим нижче похибка у розрахунках.

У правилах забезпечення стійкості відкосів на вугільних розрізах зазначено, що якщо потенційна поверхня ковзання має вигляд плавної кривої (кругло-циліндричної), то під час її побудови зазвичай використовується метод алгебраїчного складання сил. Цей метод не враховує реакції між блоками, тобто призма можливого обвалення деформується як єдине ціле. Це призводить до того, що коефіцієнт запасу, розрахований методом алгебраїчного складання сил, явно менший від фактичного, а ступінь цієї невідповідності залежить від висоти укосу, його кута і кутів внутрішнього тертя порід і може коливатися від 3 до 20 %. За невеликої висоти укосів (до 100 м) та невеликих значеннях кутів внутрішнього тертя порід ($\varphi < 20^\circ$) цей метод дає досить надійні результати.

На проблеми, які виникають під час визначення коефіцієнта запасу стійкості за різних методів його визначення, вказано також і в публікації [11].

Мета дослідження. Аналіз досліджень з питань визначення показників стійкості укосів гірських масивів методом графічних побудов виявив, що до теперішнього часу не існує чітких вимог чи рекомендацій щодо вибору ширини блоків (секцій), на які розбивається зсувний клин для розрахунку коефіцієнтів стійкості. В той же час попередні дослідження авторів цієї статті вказують також на безпосередній вплив ширини блоків зсувного клину на чисельне значення коефіцієнта стійкості уступу. Зважаючи на це, метою наукового дослідження є встановлення закономірності впливу ширини блоків розбивки зсувного клину на розрахункове значення коефіцієнта стійкості укосу уступу кварцових пісків кар'єру Сихівського родовища під час використання методу графічних побудов.

Викладення основного матеріалу. Під час дослідження стійкості робочого уступу на Сихівському кар'єрі кварцових пісків було встановлено, що коефіцієнт стійкості укосу, який визначено за допомогою методу графічних побудов (за Г.Л. Фісенко), значно перевищує чисельні значення коефіцієнтів, отриманих у програмному комплексі Rocscience Slide за різних методів аналізу [12]. Зокрема, для уступу висотою $H = 20$ м та з кутом відкосу $\alpha = 50^\circ$ коефіцієнт стійкості, що розрахований класичним нормативним методом, становить $K_{st} = 0,845$, а для методів аналізу програми Slide 6 – при Bishop становить $K_{st} = 0,709$; при Spencer – $K_{st} = 0,703$; при Janbu взагалі має значення $K_{st} = 0,677$. Таким чином, різниця у показниках коливається від 20 % (для Janbu) до 16 % (для Bishop). Як зазначають фахівці, така розбіжність отриманих результатів є неприпустимим з точки зору безпеки проведення гірничих робіт і потребує додаткових досліджень для виявлення причин таких невідповідностей з метою встановлення найбільш достовірних значень коефіцієнта стійкості укосу.

Згідно зі встановленою методикою визначення стійкості укосу гірських порід у класичному графічному методі (за Г.Л. Фісенко), після побудови потенційної кругло-циліндричної поверхні ковзання встановлюють загальну довжину її поверхні L , ширину закладення зсувного клину B (рис. 1) та здійснюють перевірку стійкості укосу. Для цього будують у масштабі зсувний клин і вертикальними лініями розбивають його на певну кількість блоків. Для кожного з цих блоків вимірюють площу S_i і визначають вагу гірського масиву Q_i на один метр укосу ($b = 1$ м). Далі з точок перетину вертикальних ліній з поверхнею ковзання опускають перпендикуляри і для кожного блоку позначають складові Q_i та N_i , між якими вимірюють кут δ_i (рис. 2).

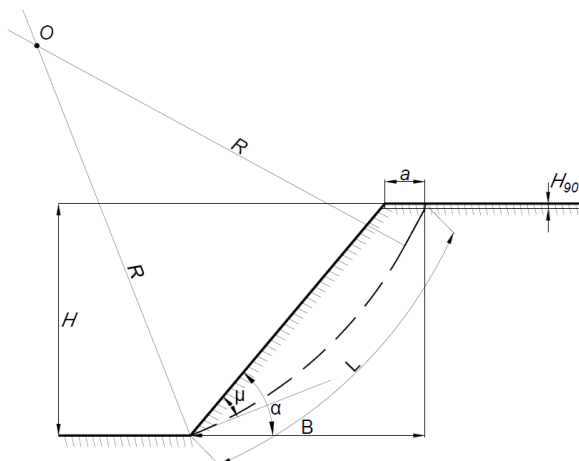


Рис. 1. Параметри стійкості укосу уступу при кругло-циліндричній поверхні ковзання

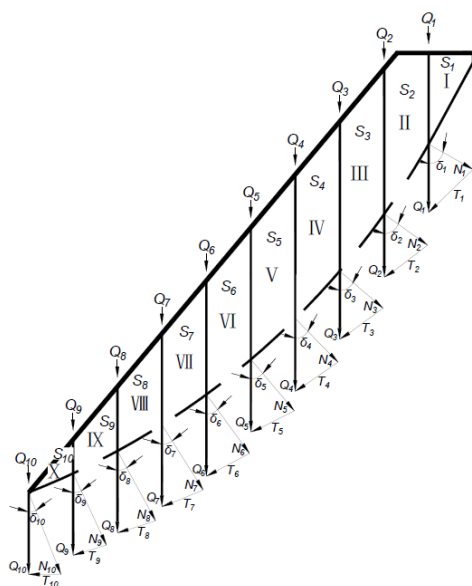


Рис. 2. Зсувний клин для визначення коефіцієнта стійкості укосу уступу

Нормальну (утримуючу) складову N_i та дотичну (зсувну) складову T_i маси кожного блоку визначають таким чином, т:

$$\begin{aligned} N_i &= Q_i \cos \delta_i; \\ T_i &= Q_i \sin \delta_i. \end{aligned} \tag{1}$$

Після цього розраховують коефіцієнт стійкості укосу гірського масиву:

$$K_{st} = \frac{tg \varphi \sum_{i=1}^n N_i + C \cdot L}{\sum_{i=1}^n T_i}, \tag{2}$$

де φ – кут внутрішнього тертя, градус; C – коефіцієнт зчеплення породи, т/м²; L – загальна довжина поверхні ковзання, м.

Варто зауважити, що під час визначення стійкості укосу робочого уступу Сихівського родовища кварцових пісків в [12] розбивка побудованого зсувного клину була виконана на 5 блоків однакової ширини. Враховуючи величину закладення уступу 16,78 м і ширину призми можливого обвалення $a = 3,46$ м, ширина закладення зсувного клину склала $B = 20,24$ м. Тоді відповідно ширина окремих блоків становила 4,048 м.

Результати проведення аналізу попередніх наукових досліджень у цій роботі показують, що така ширина блоків є завищеною з огляду забезпечення мінімальної величини похибки у розрахунках коефіцієнта стійкості.

У [9] авторами досліджувався вплив кута укосу робочого уступу кварцових пісків на коефіцієнт його стійкості. Для цього в AutoCAD графічним способом побудовано кругло-циліндричні поверхні ковзання

можливого обвалення масиву для уступів з кутами укосів від 25° до 50° та визначено параметри зсувного клину. Зважаючи на рекомендації щодо необхідності розбивки зсувного клину на блоки шириною не більше 2–3 м, розбивка зсувної поверхні була здійснена однаковими по ширині блоками в цих межах. Зокрема, якщо для кута укосу уступу $\alpha = 50^\circ$ ширина закладення зсувного клину і можливої призми обрушення склала $B = 20,24$ м, то розбивка виконана на 10 блоків шириною 2,024 м.

Однак за результатами досліджень також було виявлено, що чисельні значення коефіцієнта стійкості, які отримано за методом графічних побудов для певного кута укосу, вищі за значення, які отримано обраними методами аналізу у Slide. Зокрема, значення коефіцієнта стійкості укосу більші на 6...11 % порівняно з показниками методів аналізу Bishop і Spencer та на 9...14 % порівняно з чисельними значеннями в Janbu, відповідно, в межах зміни кута укосу від 25° до 50° (табл. 1) [9].

Таблиця 1

Значення коефіцієнта стійкості для різних кутів укосу уступу α [9]

Кут укосу уступу α , град.	Метод графічних побудов	Методи аналізу Rocscience Slide		
		Bishop	Janbu	Spencer
50	0,786	0,708	0,678	0,702
45	0,880	0,813	0,783	0,809
40	1,001	0,938	0,908	0,933
35	1,160	1,098	1,066	1,093
30	1,383	1,300	1,267	1,297
25	1,686	1,576	1,540	1,575

Як бачимо, збільшення кількості блоків розбивки зсувного клину з 5 до 10 зменшило похибку у показаннях коефіцієнта стійкості, розрахованого методом графічних побудов, з 20 до 14 % порівняно з методом аналізу Janbu та з 16 до 11 % – з Bishop та Spencer для кута укосу уступу $\alpha = 50^\circ$. Отже, кількість блоків розбивки зсувного клину суттєво вплинула на значення коефіцієнта стійкості укосу.

З метою виявлення впливу ширини блоків на коефіцієнт стійкості укосу гірського масиву для кута укосу уступу $\alpha = 50^\circ$ були проведені дослідження для різної кількості блоків розбивки зсувного клину. Зсувний клин був відповідно розбитий на 5, 10, 15, 20 та 25 блоків. Для кожного зсувного клину визначено усі необхідні параметри для розрахунку чисельних значень коефіцієнтів стійкості, тобто площа окремого блоку S_i , маса гірського масиву Q_i на один метр укосу, нормальна складова N_i маси блоку, дотична складова T_i маси блоку та кут між складовими навантаження δ_i .

Приклад побудови і розбивки зсувного клину уступу кварцового піску з кутом укосу $\alpha = 50^\circ$ на 10 окремих блоків наведено на рисунку 2, а в таблиці 2 зазначено результати розрахунку параметрів, необхідних для визначення коефіцієнта стійкості укосу. Аналогічним чином визначено також параметри і для зсувних клинів, що були розбиті на інші кількості блоків.

Таблиця 2

Розрахункові параметри окремих блоків розбивки зсувного клину при куті відкосу уступу $\alpha = 50^\circ$ [9]

№ секції	Площа окремого блоку S , м ²	Маса піску в блоці Q_i , т	Кут між напрямками дії сил навантаження δ_i , град.	Утримуюча складова N_i маси блоку, т	Зсувна складова T_i маси блоку, т
I	4,65	7,719	60°32'	3,798	6,720
II	11,5	19,09	54°33'	11,072	15,551
III	13,7	22,742	49°31'	14,815	17,254
IV	13,6	22,576	44°38'	16,067	15,860
V	12,75	21,165	40°17'	16,147	13,683
VI	11,35	18,841	36°12'	15,204	11,127
VII	9,5	15,77	32°19'	13,327	8,431
VIII	7,2	11,952	28°35'	10,496	5,718
IX	4,55	7,553	25°00'	6,845	3,192
X	1,6	2,656	21°30'	2,471	0,973
Разом	90,40	150,064		110,243	98,510

За формулою (2) визначено чисельні значення коефіцієнтів стійкості робочого уступу кварцових пісків K_{st} для усіх досліджуваних зсувних клинів з різною кількістю блоків розбивки і відповідно різною шириною окремого блоку (табл. 3).

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів стійкості уступу при різній ширині окремого блоку розбивки зсувного клину

Кількість блоків розбивки в зсувному клині, шт.	5	10	15	20	25
Ширина окремого блоку, м	4,048	2,024	1,349	1,012	0,810
Коефіцієнт стійкості укосу	0,846	0,786	0,766	0,756	0,75

На рисунку 3 наведено графічну залежність чисельних значень коефіцієнта стійкості укосу уступу K_{st} , визначеного методом графічних побудов, від ширини блоків розкриття зсувного клину b для умов Сихівського родовища кварцових пісків. Як ми бачимо, залежність має лінійний характер і в цьому діапазоні досліджень її можна описати такою формулою:

$$K_{st} = 0,0296b + 0,726. \quad (3)$$

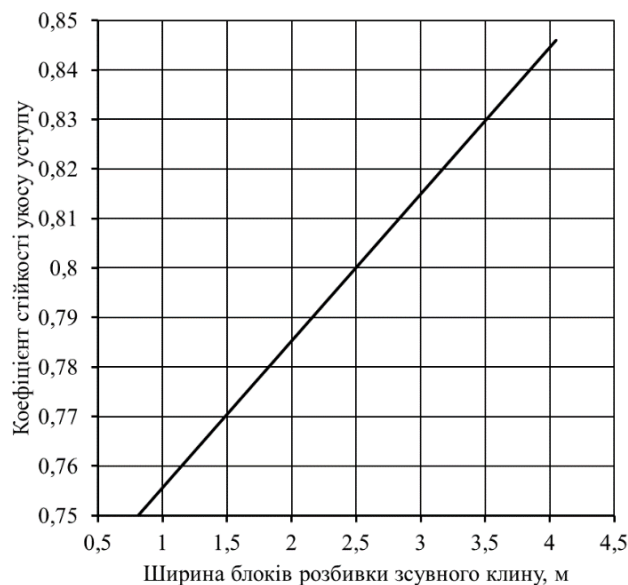


Рис. 3. Значення коефіцієнта стійкості K_{st} укосу залежно від ширини блоку розбивки b зсувного клину

Таким чином, виявлено безпосередній вплив ширини блоків розбивки зсувного клину на значення коефіцієнта стійкості укосу. Для цих умов встановлено, що при збільшенні кількості блоків (секцій) зсувного клину з 5 до 25, відповідно при зменшенні ширини блоків з 4,05 до 0,81 м, значення K_{st} зменшується з 0,85 до 0,75, тобто на 0,1. Це є суттєвим з точки зору забезпечення стійкості гірського масиву і наближає чисельні значення коефіцієнта стійкості, що визначені нормативним методом, до значень K_{st} , які визначені різними методами аналізу у прикладних розрахункових програмах, зокрема Rocsience Slide. Так, згідно з даними таблиці 1, якщо б у цих дослідках кількість блоків була більшою, тобто не на 10, а на 25 блоків, то значення K_{st} для кута укосу $\alpha = 50^\circ$ становило би не 0,786, а 0,75.

Як зазначено у [9], якщо під час розрахунків різними методами аналізу отримано хоча б одне значення коефіцієнта запасу менше за нормативне значення, то відхилення між результатами розрахунків має бути мінімальним (за рекомендаціями вчених – не більш як на 0,05). Отже, в цьому разі показники стійкості уступу кварцових пісків, отриманих як нормативним, так і прикладними методами аналізу, відповідають один одному (Bishop – 0,708; Spencer – 0,702; Фесенко – 0,75). Варто зауважити, що метод аналізу Janbu прогнозовано надає дещо занижені результати (близько 5 %).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз наукових досліджень у сфері забезпечення стійкості схилів ґрунтових масивів показав, що під час визначення коефіцієнта стійкості нормативним методом граничних побудов (за Г.Л. Фесенко) немає чітких рекомендацій щодо ширини блоків розбивки, на які поділяють зсувний клин. Зазначається лише, щоб усі блоки були однакової ширини. Щодо самого чисельного значення ширини блоків, то в рекомендаціях немає ніяких вимог.

Попередні дослідження авторів щодо встановлення ступеня стійкості робочого уступу на кар'єрі Сихівського родовища кварцових пісків показало, крім того, суттєву різницю між чисельними значеннями коефіцієнтів стійкості укосу уступу, розрахованих за нормативним методом та методами аналізу в пакетах прикладних програм. Значення останніх є меншими на 16–20 %. Це значно ускладнює прийняття остаточних рішень щодо встановлення безпечного кута укосу уступів.

За результатами наведених досліджень доведено безпосередній вплив кількості блоків розбивки (а відповідно і ширини блоків) зсувного клину на чисельні значення коефіцієнта стійкості укосу, розрахованого методом графічних побудов. Встановлено, що в умовах розробки Сихівського родовища для кута укосу робочого уступу $\alpha = 50^\circ$ та висоти уступу $H = 20$ м збільшення кількості блоків (секцій) розбивки зсувного клину з 5 до 25 (тобто зменшення ширини блоків з 4,05 до 0,81 м) зменшує значення коефіцієнта стійкості укосу з 0,85 до 0,75 і наближає його значення до даних, розрахованих прикладними методами аналізу.

Отримана графічна залежність між шириною блоків розбивки зсувного клину та коефіцієнтом стійкості укосу уступу для умов розробки кварцових пісків Сихівського родовища. Вона має лінійний характер у цьому діапазоні досліджень. Отже, чим менша ширина блоків зсувного клину, тим менше чисельне значення коефіцієнта стійкості укосу гірського масиву.

Подальші дослідження планується спрямувати на встановлення поведінки гірського масиву кварцових пісків при дії на нього статичних і динамічних навантажень.

Список використаної літератури:

1. Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення : ДБН В 1.1-46:2017. – Чинний від 01.11.2017. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. – 43 с.
2. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів : ДСТУ-Н В.1.1-37:2016. – Чинний від 01.04.2016. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 94 с.
3. Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. Ч. 1 та 2. Гірничі роботи. Ліквідація гірничодобувних підприємств. Техніко-економічна оцінка та показники : СОУ-МПП 73.020-078-1:2007. – К. : Міністерство промислової політики України, 2007. – 224 с.
4. Методичні вказівки з визначення оптимальних кутів нахилу бортів укосів уступів і відвалів залізородних та флюсових кар'єрів / Мінполітики та ІППЕ НАН України. – Дніпропетровськ, 2009. – 201 с.
5. *Albataineh N.* Slope stability analysis using 2D and 3D methods / *N.Albataineh.* – Ohio, United States : The university of Akron, 2006. – 126 p.
6. *Тютюкін О.Л.* Критичний огляд методів розрахунку стійкості укосів і схилів / *О.Л. Тютюкін, О.І. Дубінчик, В.Р. Кільдєєв* // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2023. – Вип. 23. – С. 79–87.
7. *Дзьоба М.В.* Встановлення ступеню стійкості уступу кварцових пісків / *М.В. Дзьоба, Д.Д. Чміленко, О.О. Фролов* // Сучасні проблеми гірництва та будівництва : тези Всеукраїнської науково-практичної конференції, 23 листопада. – Житомир : Житомирська політехніка, 2023. – С. 22–24.
8. *Frolov O.O.* Study of the stability of the working bench of quartz sands / *M.V. Dzoba, I.D. Lytvynchuk, O.O. Frolov* // Innovative development of re-source-saving technologies and sustainable use of natural resources : 6th International Scientific and Technical Internet Conference, November 16. – Petrosani : UNIVERSITAS Publishing, 2023. – P. 151–154.
9. *Дзьоба М.В.* Дослідження впливу кута укосу робочого уступу кварцових пісків на коефіцієнт його стійкості / *М.В. Дзьоба, О.О. Фролов* // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро : Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2024. – № 76. – С. 27–39.
10. *Yusupov J.M.* Justification of ledge stability in open-pit mining : thesis / *J.M. Yusupov.* – Almaty : Satbayev University, 2021. – 43 p.
11. Slope Sensitivity Analysis using Spencer's Method in Comparison with General Limit Equilibrium Method / *M.W. Agama, M.H.M. Hashima, M.I. Murada, H. Zabidia* // Procedia Chemistry : 5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP), 4–6 August 2015. – 2016. – № 19. – P. 651–658.
12. *Фролов О.О.* Встановлення стійкості уступу кварцових пісків на кар'єрі Сихівського родовища / *О.О. Фролов, М.В. Дзьоба* // Наук. видання державного ун-ту «Житомирська політехніка». Технічна інженерія. – 2023. – № 2 (92). – С. 258–267.

References:

1. *DBN V 1.1-46:2017 Inzhenernyi zakhyst terytorii, budivel i sporud vid zsuviv ta obvaliv. Osnovni polozhennia* (2017), Chynnyi vid 01.11.2017, Minrehionbud Ukrainy, Kyiv, 43 p.
2. *DSTU-N V.1.1-37:2016 Nastanova shchodo inzhenernoho zakhystu terytorii, budivel i sporud vid zsuviv ta obvaliv* (2017), Chynnyi vid 01.04.2016, DP «UkrNDNTs», Kyiv, 94 p.
3. *SOU-MPP 73.020-078-1:2007 Normy tekhnolohichnoho proektuvannia hirnychodobuvnykh pidpriemstv vidkrytom sposobom rozrobky rodovyshch korisnykh kopalyn.* Part 1 and 2. *Hirnychi roboty. Likvidatsiia hirnychodobuvnykh pidpriemstv. Tekhniko-ekonomichna otsinka ta pokaznyky* (2007), Ministerstvo promyslovoi polityky Ukrainy, K., 224 p.
4. *Minpolityky ta IPPE NAN Ukrainy* (2009), *Metodychni vkazivky z vyznachennia optymalnykh kutiv nakhylyu bortiv ukosiv ustupiv i vidvaliv zalizorudnykh ta fliusovykh karieriv*, Dnipropetrovsk, 201 p.
5. *Albataineh, N.* (2006), *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*, The university of Akron, Ohio, United States, 126 p.
6. *Tiutkin, O.L., Dubinchyk, O.I. and Kildieiev, V.R.* (2023), «Krytychnyi ohliad metodiv rozrakhunku stiiikosti ukosiv i skhyliv», *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, Issue 23, pp. 79–87.
7. *Dzoba, M.V., Chmilenko, D.D. and Frolov, O.O.* (2023), «Vstanovlennia stupeni stiiikosti ustupu kvartsovykh piskiv», *Suchasni problemy hirnyctva ta budivnyctva*, tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 23 lystopada, Zhytomyrska politehnika, Zhytomyr, pp. 22–24.

8. Frolov, O.O., Lytvynchuk, I.D. and Frolov, O.O. (2023), «Study of the stability of the working bench of quartz sands», *Innovative development of re-source-saving technologies and sustainable use of natural resources*, 6nd International Scientific and Technical Internet Conference, November 16, UNIVERSITAS Publishing, Petroşani, pp. 151–154.
9. Dzoba, M.V. and Frolov, O.O. (2024), «Doslidzhennia vplyvu kuta ukosu robochoho ustupu kvartsovykh piskiv na koefitsiient yoho stiiikosti», *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, Natsionalnyi TU «Dniprovska politekhnika», Dnipro, No. 76, pp. 27–39.
10. Yusupov, J.M. (2021), *Justification of ledge stability in open-pit mining*, thesis, Satbayev University, Almaty, 43 p.
11. Agama, M.W., Hashima, M.H.M., Murada, M.I. and Zabidia, H. (2016), «Slope Sensitivity Analysis using Spencer's Method in Comparison with General Limit Equilibrium Method», *Procedia Chemistry*, 5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP), 4–6 August 2015, No. 19, pp. 651–658.
12. Frolov, O.O. and Dzoba, M.V. (2023), «Vstanovlennia stiiikosti ustupu kvartsovykh piskiv na karieri Sykhivskoho rodovyshcha», *Nauk. vydannia derzhavnoho un-tu «Zhytomyr'ska politekhnika». Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 258–267.

Дзьоба Максим Вадимович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-5159-0317>.

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин;
- маркшейдерська справа.

E-mail: dzoba.maksym@gmail.com.

Литвинчук Ілля Дмитрович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0003-3702-173X>.

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин;
- маркшейдерська справа.

E-mail: Litvinchuk_ilya@icloud.com.

Фролов Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри геотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-8053-2653>.

Наукові інтереси:

- буропідривні роботи на кар'єрах;
- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: frolov@geobud.kiev.ua.

Dzoba M.V., Lytvynchuk I.D., Frolov O.O.

Establishing the regularities of the influence of the width of the shear wedge breaking blocks on the value of the stability coefficient of the slope of the quartz sand bench

The scientific article presents the research results to determine the influence of the width of the blocks (sections) into which the shear wedge is broken on the value of the stability coefficient of the slope of the quartz sand bench in the conditions of the Sykhivske field. Based on the results of the analysis of previous studies, it was noted that when determining the stability coefficient by the method of boundary constructions, there are no clear requirements and recommendations for the values of the width of the shear wedge breakdown blocks. Only the need to maintain the same width of the blocks is indicated.

The authors' previous studies to determine the degree of stability of the working bench face at the Sykhivske deposit quarry revealed a direct impact of the width of the shear wedge breakdown blocks on the numerical value of the stability coefficient of the face. Also, they showed a significant difference between the numerical values of the stability coefficients of the face slope calculated by the normative method and the analysis methods in application software packages.

The study established the regularity of the influence of the number of breakdown blocks (and, accordingly, the width of the blocks) of the shear wedge on the numerical values of the slope stability coefficient.

It is established that for the slope angle of the quartz sand bench $\alpha = 50^\circ$ and the height of the bench $H = 20$ m, an increase in the number of shear wedge breakdown blocks from 5 to 25 (i.e., a decrease in the width of the blocks from 4,05 to 0,81 m) leads to a decrease in the numerical value of the slope stability coefficient from 0,85 to 0,75 and brings it closer to the data calculated by applied analysis methods.

A graphical dependence of the influence of the width of the blocks of the shear wedge of the sliding surface on the stability coefficient of the slope of the bench for the conditions of development of quartz sands of the Sykhivske deposit was obtained. This dependence is linear in this range of studies and is described by the corresponding function.

Keywords: shear wedge; sliding surface; blocking unit; quartz sand; working face; slope stability coefficient; method of graphical constructions; methods of application analysis.

Стаття надійшла до редакції 02.05.2024.