

© М.В. Дзьоба¹, О.О. Фролов¹¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КУТА УКОСУ РОБОЧОГО УСТУПУ КВАРЦОВИХ ПІСКІВ НА КОЕФІЦІЄНТ ЙОГО СТІЙКОСТІ

© М. Dzoba¹, O. Frolov¹¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE SLOPE ANGLE OF THE WORKING LEDGE OF QUARTZ SANDS ON THE COEFFICIENT OF ITS STABILITY

Мета. Метою досліджень представленої наукової публікації є встановлення закономірності впливу кута укосу робочого уступу кварцових пісків на коефіцієнт його стійкості в умовах Сихівського родовища.

Методика дослідження. Застосовано комплексний методичний підхід, який складається з аналізу минулих результатів досліджень з визначення параметрів стійкості укосів гірських масивів, застосування порівняльного аналізу отриманих власних даних, графоаналітична методика встановлення залежності між коефіцієнтом стійкості уступу та кутом його відкосу.

Результати дослідження. Встановлено, що характер зміни графічних залежностей коефіцієнту стійкості робочого уступу від кута укосу є однаковим як для методів аналізу у Rocscience Slide, так і для нормативного методу графічних побудов (за Г.Л. Фісенко). Отримані залежності з високим ступенем достовірності описуються поліномом 2-го порядку.

Доведено, що нормативне мінімальне значення коефіцієнту стійкості робочого уступу ($K_{st} = 1,2$), залежно від методу аналізу, досягається при різних кутах укосу. Чисельні значення коефіцієнту стійкості, що розраховані за методом графічних побудов, вищі за методи аналізу у Slide. Зокрема, значення коефіцієнтів стійкості більші на 6...11% у порівнянні з їх значеннями, що отримані методами аналізу Bishop і Spencer та на 9...14% у порівнянні зі значеннями Janbu при зміні кута укосу з 25° до 50°.

Наукова новизна. Отримані графічні залежності зміни коефіцієнту стійкості укосу кварцових пісків Сихівського родовища від кута робочого уступу з використанням нормативного методу графічних побудов та методів граничної рівноваги у Rocscience Slide.

Практичне значення. Встановлені відмінності у чисельних значеннях коефіцієнту стійкості укосу, розрахованих методом графічних побудов, зі значеннями, які отримані методами аналізу Bishop, Janbu та Spencer у програмі Slide. Зазначені межі існуючих похибок залежно від кута укосу уступу.

Ключові слова: коефіцієнт стійкості укосу, кар'єр, кварцовий пісок, робочий уступ, поверхня ковзання, зсувний клин, метод графічних побудов, гранична рівновага.

Вступ. Переважна більшість розробок відкритих гірничих робіт супроводжуються деформаційними процесами в бортах та уступах кар'єрів. Ці процеси можуть бути як тривалими у часі, так і короткочасними або навіть миттєвими. У будь-якому випадку деформації кар'єрних укосів знижують ефективність відкритих робіт та завдають значної матеріальної шкоди гірничому підприємству.

Зокрема, порушується правильне і безпечно проведення гірничих робіт, а також збільшуються втрати корисних копалин [1]. Тому проблема забезпечення стійкості кар'єрних укосів є завжди актуальною. Для її вирішення необхідно знати причини можливих деформацій гірських масивів та наслідки їх проявів.

До основних причин прояву деформацій (осипи, обвалення, зсуви та ін.) відносять: недостатню вивченість гірничо-геологічних умов (структурні особливості гірського масиву та його фізико-механічні властивості); невідповідність кутів нахилу кар'єрних укосів нормативним вимогам; невірне уявлення про характер деформацій (його недооцінка); неправильне проведення гірничих робіт; відсутність (або неефективність) інженерних протизсувних заходів на кар'єрі; застосування неправильного методу розрахунку та аналізу безпечних параметрів стійкості укосу [2–4]. Зважаючи на це, оцінку стійкості бортів та уступів варто здійснювати на постійно доступними (інженерними або комп'ютерними) методами контролю на основі достовірних даних про стан гірського масиву та використовувати технологію ведення гірничих робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В однорідному гірському масиві пухких порід у разі виникнення деформацій форму поверхні ковзання зазвичай приймають близькою до кругло-циліндричної. Положення її можливої поверхні рекомендовано знаходити способом Г.Л. Фісенко, який розроблений на основі теорії граничної рівноваги сипучого середовища [5]. На даний час цей метод залишається нормативним, оскільки характеризується простотою інженерних розрахунків і які легко підлягають контролю.

Однак, за останні десятиліття, завдяки суттєвому підвищенню науко-технічного рівня, у практику гірничих робіт було введено більш складне програмне забезпечення з можливістю використання різних моделей поведінки масивів гірських порід та критеріїв їх руйнувань. Це значно спрощує аналіз стійкості масиву, однак вимагає високої кваліфікації фахівців, які повинні розуміти фізичну сутність деформаційних процесів, правильно інтерпретувати отримані в результаті розрахунків значення та встановлювати їх відповідність існуючим інженерно-геологічним та гідрогеологічним умовам.

Отже, з'являється можливість одночасного застосування декількох методів аналізу стійкості укосу гірського масиву. Тому на етапах проектування та в процесі розробки родовища повинні обов'язково виконуватися перевірочні розрахунки стійкості бортів та уступів кар'єрів для конкретних гірничо-геологічних та гірничо-технічних умов.

У разі, якщо різними способами та методами аналізу одержані коефіцієнти запасу стійкості більші, ніж нормативні значення, то таке відхилення в результатах розрахунків допускається. Якщо ж отримано хоча б один коефіцієнт запасу менший нормативного значення, то відхилення між результатами розрахунків має бути мінімальним (за рекомендаціями вчених – не більш як на 0,05). При більшому відхиленні необхідно коригувати схил або розробляти заходи для забезпечення безпечних умов ведення гірничих робіт.

Як зазначено в [6], швидкий розвиток обчислювальних технологій зумовив розробку значної кількості інженерних комп'ютерних програм для розрахунку

стійкості схилів (Rocscience Slide, Slope, SCAD Soft «Откос», GeoStab 5 та ін.) [7] та пакетів обчислювальних програм для кінцево-елементного розрахунку напружено-деформованого стану гірських масивів та споруд (Plaxis, Solidworks та ін.) [8–10], які дозволяють виконати більш складні обчислення для особливих умов забезпечення стійкості укосів.

Однією з найбільш зручних професійних програм для визначення стійкості укосів гірського масиву методами граничної рівноваги в 2D вважається Slide. Її можна використовувати для аналізу природних та штучних схилів, які складені будь-якими типами ґрунтів та гірських порід, а також насипів і земляних дамб. Крім того, вона надає ймовірнісний аналіз поведінки природних та штучних схилів для різних умов напруженого стану та можливість моделювання і проектування різних типів підтримуючих споруд. Для аналізу стану гірського масиву застосовуються наступні методи граничної рівноваги: Bishop simplified, Corps of Engineers 1 та 2, GLE/Morgenstern-Price, Janbu simplified, Janbu correctod, Lowe-Karafath, Ordinary/Fellenius, Spencer [11]. В програмі реалізовані критерії руйнування Кулона-Мора, Хоека-Брауна, узагальнений критерій Хоека-Брауна та ін. Критична поверхня ковзання може бути як кругло-циліндричною, так і не кругло-циліндричною. Можливе врахування будь-яких додаткових зовнішніх навантажень, сейсмічного впливу та розрахунок стійкості із застосуванням різних штучних типів укріплень укосів.

Інші пакети прикладних програм також мають в своєму розпорядженні різні методи аналізу, які дозволяють на високому інженерному рівні і в достатній мірі провести оцінку стану укосу гірського масиву та виконати розрахунок коефіцієнту його стійкості [12].

Формулювання мети дослідження. З огляду на вищенаведене, відмічаємо, що для забезпечення стійкості укосів кар'єрів необхідно враховувати цілу низку факторів, які можуть стати причиною проявів зсувних явищ. Також варто забезпечити постійний моніторинг за дотриманням встановлених параметрів технології ведення гірничих робіт з прогнозуванням стану стійкості гірського масиву у випадку можливих їх порушень. На підставі цього сформульовано мету досліджень, яка полягає у встановленні закономірності впливу кута укосу робочого уступу кварцових пісків на коефіцієнт його стійкості в умовах Сихівського родовища.

Викладення основного матеріалу. У відповідності до робочого проекту розробки Сихівського родовища кварцових пісків кут відкосу робочого уступу повинен становити $\alpha = 30^\circ$. Такий кут відповідає необхідним умовам забезпечення стійкості уступу. Однак, в окремих випадках, значення кута відкосу робочого уступу може тимчасово не дотримуватися через певні технологічні причини (вихід з ладу видобувного обладнання, значна інтенсивність виконання гірничих робіт та ін.) (рис. 1). Таке порушення технології проведення гірничих робіт та правил безпеки праці може привести до утворення осипів, обвалень та зсувів [13]. Для попередження виникнення зсувних явищ на уступі та уникнення їх негативних наслідків потрібно знати коефіцієнт запасу стійкості уступу та можливо поверхню обвалення масиву.



Рис. 1. Загальний вигляд уступу кварцових пісків

На даний час нормативним способом визначення параметрів стійкості гірського масиву залишається метод графічних побудов (за Г.Л. Фісенко) [5]. Цей класичний метод розрахунку базується на фундаментальному рівнянні граничної рівноваги Кулона:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (1)$$

де σ , τ – нормальне та дотичне напруження, які діють уздовж лінії ковзання, МПа; C – зчеплення гірської породи, МПа; φ – кут внутрішнього тертя, град.

В однорідному гірському масиві елементарні поверхні ковзання починають виникати з глибини

$$H_{90} = \frac{\sigma_1}{\gamma} = \frac{2C}{\gamma} \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

де γ – об'ємна маса гірських порід, т/м³; σ_1 – головне напруження, при досягненні якого утворюються поверхні ковзання:

$$\sigma_1 = 2C \cdot \operatorname{ctg} \mu, \quad (3)$$

де μ – кут між напрямком дії головного напруження та елементарними поверхнями ковзання: $\mu = 45^\circ - (\varphi/2)$.

Схема побудови поверхні ковзання в однорідному масиві детально пояснена в нормативно-довідковій та науковій літературі [5].

Ширину призми можливого обвалення a встановлюють або графічно після побудови поверхні ковзання у певному масштабі, або визначають за формулою:

$$a = \frac{2H \left[1 - \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right) \right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right)}, \quad (4)$$

де α – кут відкосу робочого уступу кар'єру, град.

Після побудови поверхні ковзання встановлюють загальну довжину її поверхні L та ширину закладення зсувного клину B (рис. 2).

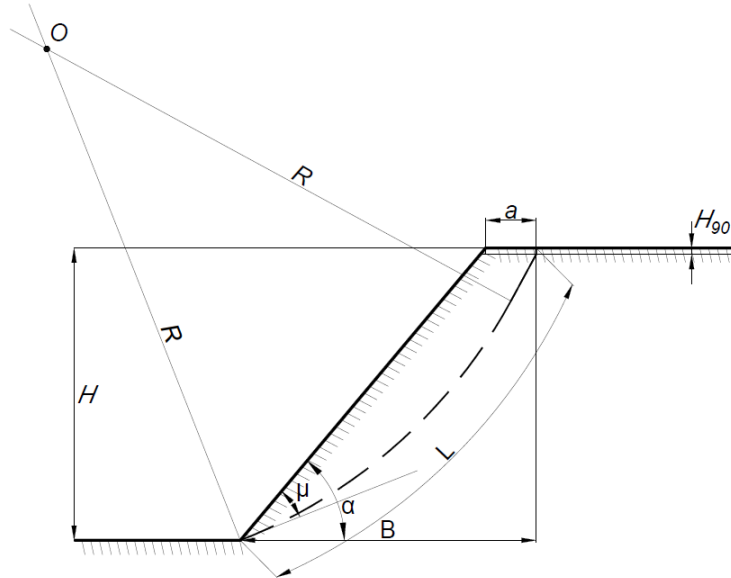


Рис. 2. Основні розрахункові та графічні параметри стійкості укосу уступу

Далі виконують перевірку стійкості уступу шляхом розрахунку коефіцієнту стійкості укосу. Для цього у масштабі будують зсувний клин і вертикальними лініями розбивають його на певну кількість призм приблизно однакової ширини (рис. 3). Згідно рекомендацій науковців, ширину блоків (призм) не варто приймати більше 2...3 м щоб не збільшувати похибку розрахунків. Далі, визначають площу кожного блоку S_i і розраховують масу гірської породи в кожному блоці на 1 погонний метр по довжині укосу (b):

$$Q_i = S_i \gamma b, \text{ т.} \quad (5)$$

В місцях перетину вертикальних ліній із поверхнею ковзання розкладають силу ваги породи в блоці на дві складові: нормальна N_i та дотична T_i маси блоку. Потім для кожної призми можливого обвалення виконують вимірювання кута δ_i між Q_i та N_i .

Нормальна (утримуюча) складова N_i та дотична (зсувна) складова T_i маси блоку, т, розраховують за формулами:

$$\begin{aligned} N_i &= Q_i \cos \delta_i; \\ T_i &= Q_i \sin \delta_i. \end{aligned} \quad (6)$$

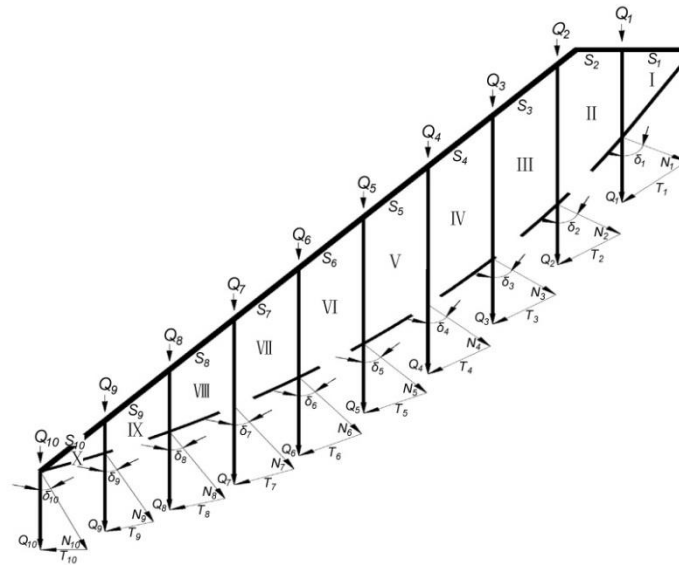


Рис. 3. Розрахункова схема (зсувний клин) для визначення коефіцієнту стійкості укосу уступу

Розрахунок коефіцієнту стійкості укосу уступу здійснюють за виразом:

$$K_{st} = \frac{tg\varphi \sum_{i=1}^n N_i + C \cdot L}{\sum_{i=1}^n T_i}, \quad (7)$$

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

Стійкість укосу робочого уступу вважається забезпеченою при $K_{st} \geq 1,2$.

Згідно робочого проекту розробки кварцові піски Сихівського родовища мають наступні фізико-механічні властивості: об'ємна вага – $\gamma = 1,66$ т/м³; зчеплення – $C = 2$ кПа; коефіцієнт розпушення – $K_p = 1,32$; природна вологість – $W = 2,83$ %; кут внутрішнього тертя – $\varphi = 33^\circ$; коефіцієнт пористості – $e = 0,65$.

Висота робочого уступу складає $H = 20$ м.

З метою встановлення впливу кута укосу робочого уступу на коефіцієнт стійкості в AutoCAD способом графічних побудов зображені поверхні ковзання можливого обвалення масиву для кутів укосу від 25° до 50° та визначені усі необхідні параметри. Для наведених властивостей піску, згідно формули (2), глибина виникнення поверхні ковзання рівна $H_{90} = 0,44$ м, а кут між напрямком головного напруження та елементарними поверхнями ковзання – $\mu = 28^\circ 30'$.

Зважаючи на рекомендації щодо розбивки можливого зсувного клину на певну кількість призм однакової ширини, було прийнято рішення орієнтуватися на менше чисельне значення для підвищення точності результатів розрахунків, тобто на 2 м. Зокрема, якщо для кута укосу уступу в 50° ширина закладення зсувного клину склала $B = 20,24$ м, то розбивку здійснюємо на 10 частин шириною 2,024 м кожна (див. рис. 3).

Для інших кутів укосів ширина призми (секції) також була зорієнтована на чисельне значення 2 м. Показники усіх розрахункових і графічних параметрів наведені у табл. 1.

Таблиця 1
Розрахункові та графічні параметри щодо визначення стійкості робочого уступу для різних значень кута відкосу

Кут відкосу уступу α , град	Ширина призми обвалення a , м	Радіус поверхні ковзання R , м	Загальна довжина поверхні ковзання L , м	Ширина закладення зсувного клину B , м	Кількість секцій n , штук	Ширина секцій b , м
50	3,46	36,13	29,28	20,24	10	2,02
45	2,54	35,76	31,18	22,54	11	2,05
40	1,49	36,18	33,57	25,32	12	2,11
35	0,23	37,46	36,64	28,80	14	2,06
30	-	39,83	39,62	32,92	16	2,06
25	-	43,76	43,54	37,85	18	2,10

Для кута відкосу робочого уступу кварцових пісків $\alpha = 50^\circ$ в таблиці 2 наведено результати розрахунку параметрів поверхні ковзання для подальшого визначення коефіцієнту стійкості укосу. Також, аналогічно визначені параметри поверхні ковзання і для інших значень кутів відкосів уступів.

Таблиця 2
Результати розрахунку параметрів поверхні ковзання при куті відкосу $\alpha=50^\circ$

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

Згідно формули (7), розраховано коефіцієнти стійкості робочого уступу K_{st} для усіх досліджуваних значень кутів відкосів кварцових пісків (табл. 3).

Таблиця 3

Значення коефіцієнту стійкості робочого уступу залежно від його кута відкосу способом графічних побудов (за методом Г.Л. Фісенко)

Кут відкосу уступу α , град	25	30	35	40	45	50
Коефіцієнт стійкості уступу K_{st}	1,686	1,383	1,16	1,001	0,88	0,786

Аналогічні дослідження впливу кута відкосу уступу на значення коефіцієнту стійкості також проведено у програмному комплексі Rocscience Slide з використанням методу граничної рівноваги для умов розробки кварцових пісків Сихівського родовища. Для кожного значення кута відкосу уступу отримані критичні поверхні ковзання з найменшим значенням коефіцієнту стійкості за автоматичним пошуком по сітці. Методами аналізу прийнято найбільш поширені Bishop, Janbu та Spencer.

У спрощеному методі аналізу Bishop при розрахунку стійкості укосів задовольняються умови рівноваги загальних моментів та вертикальних сил (рівновага зсувних сил не дотримується) [10]. Незважаючи на те, що умови рівноваги задовольняються не повністю, метод Bishop забезпечує достовірні результати і рекомендується для проведення більшості практичних розрахунків, що проводяться по кругло-циліндричній поверхні.

Метод Janbu відрізняється від Bishop тим, що в ньому задовольняються умови рівноваги вертикальних та зсувних сил, при цьому не дотримується умова рівноваги моментів [10]. У зв'язку з цим, результати розрахунку по кругло-циліндричній поверхні ковзання за методом Janbu виходять дещо заниженими.

Метод Spencer розглядає відмінні від нуля сили між окремими блоками [10]. Він вважається найбільш точним, тобто задовольняє всім трьом умовам рівноваги: горизонтальних (зсувних) та вертикальних сил та рівноваги моментів. Метод Spencer по суті є модифікованою і розширеною версією методу Bishop.

На рис. 4 показано результати розрахунку глобальної мінімальної поверхні ковзання на уступі кварцових пісків та контури мінімального коефіцієнту стійкості з усіх аналізованих поверхонь, а також усі поверхні ковзання за методом Bishop для досліджуваних значень кута відкосу уступу, а в табл. 4 наведено значення мінімального коефіцієнта стійкості уступу для усіх розглянутих методів Rocscience Slide.

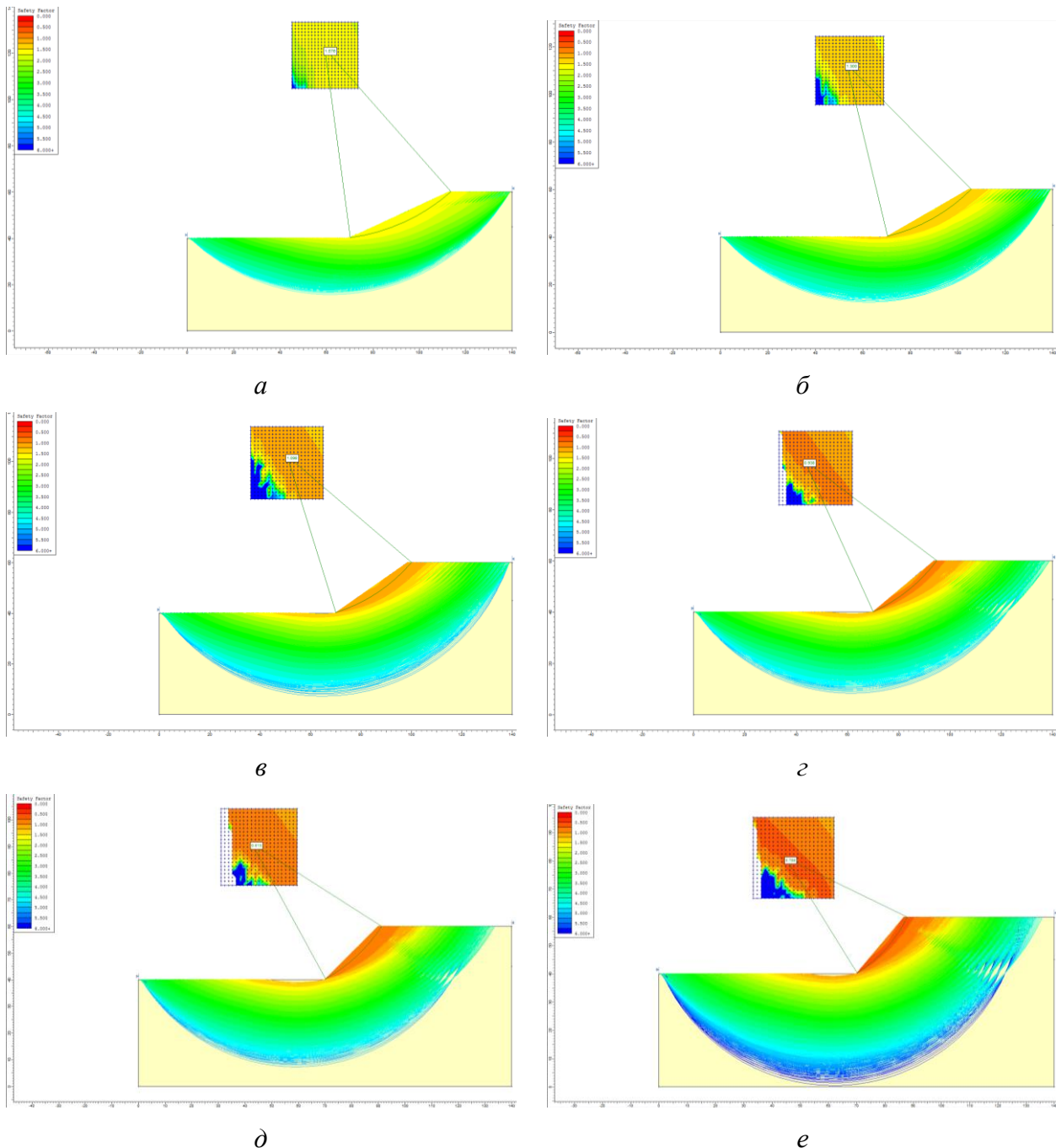


Рис. 4. Результати розрахунку критичної поверхні ковзання мінімального коефіцієнта стійкості уступу та усіх можливих поверхонь ковзання за методом аналізу Bishop для різних значень кута відкосу уступу: $a - \alpha=25^\circ$; $b - \alpha=30^\circ$; $в - \alpha=35^\circ$; $г - \alpha=40^\circ$; $д - \alpha=45^\circ$; $e - \alpha=50^\circ$

За результатами проведених розрахунків у Rocscience Slide (табл. 4) та методом графічних побудов (табл. 3) побудовані графічні залежності зміни коефіцієнту стійкості робочого уступу від кута укосу кварцових пісків на Сихівському родовищі (рис. 5).

Таблиця 4

Значення мінімального коефіцієнту стійкості K_{st} для різних методів аналізу програмного комплексу Rocscience Slide залежно від кута відкошу уступу α

Кут відкошу уступу α , град	Методи аналізу стійкості уступу		
	Bishop	Janbu	Spencer
25	1,576	1,540	1,575
30	1,300	1,267	1,297
35	1,098	1,066	1,093
40	0,938	0,908	0,933
45	0,813	0,783	0,809
50	0,708	0,678	0,702

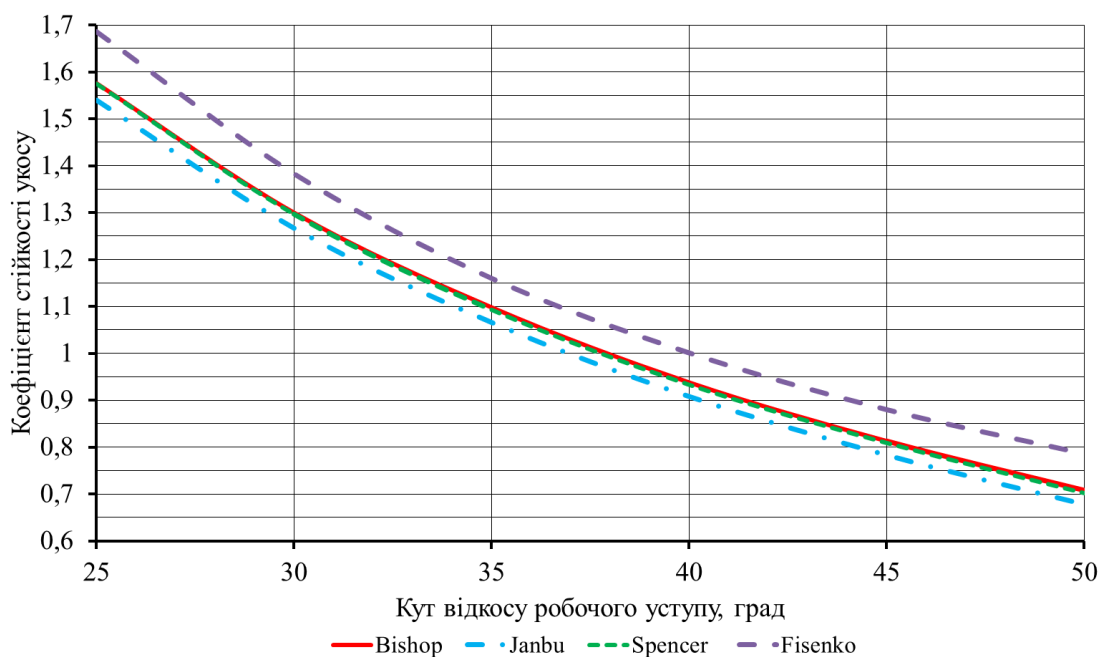


Рис. 5. Значення коефіцієнту стійкості K_{st} укошу залежно від кута відкошу уступу α для різних методів аналізу

Аналіз залежностей рис. 5 показує, що характер їх зміни є однаковим як для методів аналізу Slide, так і для нормативного методу графічних побудов (за Г.Л. Фісенко). Зокрема, для методу графічних побудов залежність коефіцієнту стійкості K_{st} укошу від кута відкошу уступу α з високою точністю (достовірність апроксимації $R^2=0,999$) можна описати поліномом 2-го порядку:

$$K_{st} = 3,8549 - 0,1131\alpha + 0,001\alpha^2. \quad (8)$$

Однак, метод графічних побудов надає вищі результати розрахунків коефіцієнту стійкості уступу, ніж методи аналізу Rocscience Slide. У порівнянні з методами Bishop та Spencer значення K_{st} більше на 6...11%, а у порівнянні з Janbu – на 9...14% при зміні кута укошу з 25° до 50° відповідно. У той же час за Bishop та Spencer графіки майже збігаються, а метод Janbu надає дещо занижені результати значень коефіцієнту стійкості відносно їх в межах 2...4%.

Висновки. Результати досліджень, що викладені в даній статті, дозволили встановити вплив кута укосу робочого уступу на коефіцієнт його стійкості для умов Сихівського родовища кварцових пісків при використанні різних методів аналізу, в тому числі і нормативного.

Встановлено, що характер зміни графічних залежностей коефіцієнту стійкості робочого уступу від кута укосу є однаковим як для методів аналізу у Rocscience Slide, так і для методу графічних побудов (за Г.Л. Фісенко). Вони з високим ступенем достовірності описуються поліномом 2-го порядку.

Показано, що мінімальне нормативне значення коефіцієнту стійкості робочого уступу ($K_{st}=1,2$) досягається при кутах укосу: 34° – при використанні методу аналізу графічних побудов; 32° – при використанні методів аналізу Bishop і Spencer; 31° – при використанні методу аналізу Janbu.

Отже, чисельні значення коефіцієнту стійкості, що розраховані за методом графічних побудов для певного кута укосу, вищі ніж значення методів аналізу у Slide. Так, значення коефіцієнтів стійкості більші на 6...11% у порівнянні з K_{st} , що отримані методами аналізу Bishop і Spencer та на 9...14% у порівнянні зі значеннями методу Janbu при зміні кута укосу в межах 25° - 50° . Janbu надає зменшенні результати K_{st} відносно методів Bishop та Spencer на 2...4%.

У зв'язку з цим, в подальших дослідженнях, необхідно виявити причини таких розбіжностей для встановлення найбільш достовірного методу аналізу.

Перелік посилань

1. Begalinov, A., Khomiakov, V., Serdaliyev, Y., Iskakov, Y. & Zhanbolatov, A. (2020) Formulation of methods reducing landslide phenomena and the collapse of career slopes during open-pit mining. *E3S Web of Conferences (Vol. 168). EDP Sciences. RMGET 2020*, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202016800006>
2. Дзьоба, М.В., Міщенко, А.А., & Фролов О.О. (2023). Проблема забезпечення стійкості укосів уступів і бортів кар'єрів. *Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки*, Житомирська політехніка, 154–155.
3. Романенко, А. О. (2019). Виділення факторів та їх параметрів для проведення оцінки стійкості бортів Глеюватського кар'єру. *Науково-виробничий збірник КрНУ «Сучасні ресурсо-енергозберігаючі технології гірничого виробництва»*, 1/2019(23), 28–38.
4. Черкез, С.А., Мелконян, Д.В., & Скальський, В.І. (2019). Вплив просторової мінливості властивостей ґрунтів на стійкість схилу. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*, 24(2 (35)), 115–129. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2019.2\(35\).183735](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2019.2(35).183735)
5. Фролов, О. О., & Дзьоба, М. В. (2023). Встановлення стійкості уступу кварцових пісків на кар'єрі Сихівського родовища. *Технічна інженерія*, 2(92), 258–267. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-258-267](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-258-267).
6. Dzoba, M.V., Lytvynchuk, I.D., & Frolov, O. O. (2023). Study of the stability of the working bench of quartz sands. *6nd International Scientific and Technical Internet Conference “Innovative development of re-resource-saving technologies and sustainable use of natural resources”*, Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 151–154. https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/Ukraine_2023_Book_of_Abstracts.pdf
7. Ковров, О.С. (2013). Оцінка впливу гідрогеологічних характеристик ґрунтів на стійкість природних схилів для прогнозу зсувів. *Екологічна безпека*, 1/2013(15), 72–76.

8. Jiang, S.H., Li, D.Q., Cao, Z.J., Zhou, C.B. & Phoon, K.K. (2015). Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(2), 1–13. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001227](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001227)
9. Ягольник, А.М., & Марченко, В.І. (2016). Оцінювання стійкості зсувонебезпечних схилів при зміні властивостей ґрунтів. *Збірник наукових праць ПолтНТУ. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*, 1(46), 164–173. <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/2084>
10. Albataineh, N. (2006). *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. The University of Akron, United States. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=akron1153719372
11. <https://www.roscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/quick-start-tutorial>
12. Тюткін, О.Л., Дубінчик, О.І., & Кільдєєв, В.Р. (2023). Критичний огляд методів розрахунку стійкості укосів і схилів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 79–87. <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281155>
13. Дзьоба, М.В., Чміленко, Д.Д., & Фролов, О.О. (2023). Встановлення ступеню стійкості уступу кварцових пісків. *Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, Житомирська політехніка, 22–24. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/01/22-2.pdf>

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the research presented in this scientific publication is to establish the regularity of the influence of the slope angle of the working ledge of quartz sands on the coefficient of its stability in the conditions of the Sykhivske field.

The methods. A comprehensive methodological approach was applied, consisting of an analysis of past research results on determining the parameters of stability of slopes, the use of comparative analysis of our data, and a graphical analytical method for establishing the relationship between the stability coefficient of the ledge and the angle of its slope.

Findings. It has been established that the nature of the change in the graphical dependencies of the stability coefficient of the ledge on the slope angle is the same for both the Rocscience Slide analysis methods and the normative method of graphical constructions (according to G.L. Fisenko). The obtained dependencies are described with a high degree of reliability by a 2nd-order polynomial. It has been proved that the normative minimum value of the stability coefficient of the working ledge, depending on the analysis method, is achieved at different slope angles. The numerical values of the stability coefficient calculated by the method of graphical constructions are higher than those of the Slide analysis method. In particular, the values of the stability coefficients are higher by 6...11% compared to their values obtained by the Bishop and Spencer methods and by 9...14% compared to the Janbu values when the slope angle is changed from 25° to 50°.

The originality. The graphical dependences of the change in the stability coefficient of the working ledge of the quartz sands of the Sykhivske deposit on the angle of its slope were obtained using the normative method of graphical constructions and methods of limit equilibrium in Rocscience Slide.

Practical implementation. The differences in the numerical values of the slope stability coefficient calculated by the method of graphical constructions with the values obtained by the Bishop, Janbu, and Spencer analysis methods in Slide software were determined. The limits of the existing errors depending on the slope angle of the ledge are indicated.

Keywords: *slope stability coefficient; quarry; quartz sand; working ledge; sliding surface; shear wedge; method of graphical constructions; limit equilibrium.*