

**О.О. Фролов, д.т.н., проф.
М.В. Дзьоба, аспірант**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Встановлення стійкості уступу кварцових пісків на кар'єрі Сихівського родовища

Наукова публікація висвітлює результати досліджень щодо визначення параметрів стійкості уступу кварцових пісків. Відповідно до проведеного аналізу попередніх досліджень встановлено, що переважно методи розрахунку стійкості укосів ґрунтуються на моделі гранично-напруженого середовища з використанням способів графічних побудов, пакетів прикладних програм для розрахунку стійкості схилів та чисельними методами.

Для умов розробки Сихівського родовища кварцових пісків здійснено розрахунок стійкості робочого уступу способами графічних побудов і програмним комплексом Rocscience Slide та проведено порівняльний аналіз поверхонь ковзання.

Способами графічних побудов (класичним та спрощеним), в основі яких закладено критерій міцності гірського масиву Кулона – Мора, з використанням Autodesk AutoCAD визначено круглоциліндричні поверхні ковзання можливого зсуву на робочому уступі кварцових пісків Сихівського родовища та усі необхідні параметри його стійкості. Поверхні ковзання, графічні та розрахункові показники обох способів виявилися ідентичними.

Визначення параметрів стійкості укосу у програмному комплексі Rocscience Slide здійснено програмою Slide 6. Критерієм міцності обрано Mohr – Coulomb (Мора – Кулона), а методами аналізу – Bishop, Janbu та Spencer. Для кожного методу встановлено: глобальну мінімальну поверхню ковзання та контури мінімального коефіцієнта стійкості; поверхню мінімального коефіцієнта стійкості, що згенерована в кожній точці сітки; усі можливі поверхні ковзання; поверхні ковзання для значень коефіцієнтів стійкості від 0,5 до 1,3 (нормативного показника).

Результати розрахунків показують, що, під час використання методу Janbu, уступ кварцового піску є більш небезпечним, ніж при методах Bishop та Spencer (на 4...6 % за наведеними показниками стійкості уступу). Порівняно з класичним методом графічних побудов, який на даний час є нормативним, отримані значення у Slide для усіх обраних методів аналізу суттєво різняться у меншу сторону (більшої небезпеки), особливо за показниками глобального мінімуму.

Ключові слова: кар'єр; кварцовий пісок; робочий уступ; зсув гірських порід; коефіцієнт стійкості; поверхня ковзання; методи граничної рівноваги; показники глобального мінімуму.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Сучасний стан ведення відкритих гірничих робіт з видобутку будівельних корисних копалин характеризується складністю геологічних і гідрогеологічних умов їх розробки, а також інтенсифікацією і концентрацією гірничих робіт. Ці особливості впливають на стійкість укосів уступів та бортів кар'єрів, які у свою чергу визначають ефективність та повноту відпрацювання родовища, а також техніко-економічні показники роботи підприємства. Тому одним з основних завдань гірництва є визначення оптимальних параметрів укосів для забезпечення їхньої тривалої стійкості при мінімальних обсягах гірничих робіт. Завищені кути укосів неминуче призводять до розвитку зсувних явищ, що завдають великої матеріальної шкоди гірничим підприємствам. Зокрема, під зсувом опиняються підготовлені до виїмки запаси корисних копалин, а також порушуються безпечні умови праці. Занижені кути укосів спричиняють різке збільшення обсягів розкривних робіт і призводять до втрат корисних копалин у бортах кар'єру.

На стійкість кар'єрного укосу та на його напружений стан впливає сукупність різних факторів [1, 2]. Усі фактори можна умовно поділити на дві основні групи – природні та гірничо-технічні. До природних факторів належать: кліматичні (температура повітря, кількість опадів, режим вітрів, температурний режим масиву гірських порід); геологічні (склад, структурна будова, стан та властивості гірських порід); гідрогеологічні (наявність поверхневих вод та водоносних горизонтів, обводненість контактів та структурних порушень) [3, 4]. Гірничо-технічні фактори характеризуються способом розкриття кар'єрного поля, системою розробки, способом підготовки гірничої маси до виїмання, технологією ведення гірничих робіт та геометричними параметрами кар'єру [5].

Для обґрунтування безпечних параметрів стійких укосів у кар'єрі потрібно детальне вивчення усіх факторів, які впливають на процеси зсуву гірських порід. Крім того, важливе значення має вибір способу

розрахунку, який відповідав би конкретним гірничо-геологічним і технологічним умовам та фізико-механічним властивостям порід, з яких складається гірничий масив кар'єру.

Таким чином, можна зазначити, що стійкість укосів кар'єру, головним чином, визначається напруженим станом прибортового масиву та фізико-механічними властивостями порід, що складають цей масив. Напружений стан масиву характеризується діючими навантаженнями (статичними та динамічними), а фізико-механічні властивості гірського масиву – міцністю порід по можливій поверхні ковзання. Для кількісної оцінки стійкості укосів використовують поняття коефіцієнта стійкості [6]. Тому, одним з основних завдань дослідження механізму деформування масиву гірських порід є виявлення форми і розташування поверхні ковзання, а також розрахунок коефіцієнта стійкості укосу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Напружено-деформований стан гірського масиву зазвичай досліджується лінійно-деформованою або гранично-напруженою моделями середовища [7]. Як зазначають науковці, застосування моделі лінійно-деформованого середовища для вирішення задач стійкості дає завищені значення граничних параметрів укосу, які не підтверджуються практичними даними. Це пов'язано з тим, що масив гірських порід є складною структурною формою і для опису його напружено-деформованого стану необхідні складніші в'язко-пружні, пружно-пластичні, реологічні моделі або їх комбінації. Побудова таких моделей та їх розв'язання є дуже складним математичним завданням. Тому, на сьогодні відсутні закінчені математичні рішення завдань забезпечення стійкості кар'єрних укосів, виходячи з моделі лінійно-деформованого середовища.

Модель гранично-напруженого середовища є більш простою і в ній не розглядається деформований стан масиву. Рішення з визначення граничного напруженого стану для встановлення можливої поверхні ковзання дозволяють застосовувати їх в простих інженерних розрахунках для різних схем навантаження на гірський масив, які підтверджуються практичними даними. Тому сучасні методи розрахунку стійкості укосів, переважно, ґрунтуються на моделі гранично-напруженого середовища, так звані методи граничної рівноваги. Одним з найбільш розповсюджених є метод Г.Л. Фісенко, в основі якого закладена теорія граничної рівноваги сипучого середовища. Він вважається класичним, застосовується при нормативних розрахунках стійкості укосів та передбачає виконання умови граничної рівноваги по внутрішній межі прибортового масиву кар'єру.

Використання, в недалекому минулому, графічних побудов при розрахунках, застосування графіків і діаграм було досить зручним, простим та задовольняло інженерним вимогам. Однак такі розрахунки були обмежені в точності і багатоваріантності та не дозволяли виконати більш складні обчислення для особливих умов забезпечення стійкості укосів [8]. Розвиток інформаційних технологій зумовив розробку декількох пакетів прикладних програм для розрахунку стійкості схилів методами граничної рівноваги (SCAD Soft «Откос», Rocscience Slide, Slope, GeoStab 5 та ін.) та чисельних методів, що усувають зазначені недоліки [9, 10]. Однак для розуміння суті зсувних процесів необхідно володіти базовим класичним методом визначення параметрів стійкості, яким є метод Г.Л. Фісенко.

Методи граничної рівноваги при розрахунках стійкості укосів, як зазначено вище, реалізовані в значній кількості прикладних програм. На сьогодні, одним з найбільш зручних професійних програмних комплексів для розрахунку стійкості схилів методами граничної рівноваги в 2D є програма Rocscience Slide, яка призначена для аналізу природних і штучних схилів, складених усіма типами ґрунтів та гірських порід, насипів, земляних дамб та підпірних стін. Також вона підтримує аналіз фільтрації підземних вод, надає імовірнісний аналіз поведінки схилів у різних умовах, можливість різних варіантів моделювання та проектування підтримуючих споруд.

Методи чисельного моделювання (Plaxis, Solidworks та ін.) розширюють можливості оцінки стійкості укосів [11]. Чисельним моделюванням розв'язуються задачі механіки суцільного середовища (методи кінцевих елементів, кінцевих різниць, граничних елементів тощо), дискретних середовищ (метод дискретних елементів або його аналоги), перехідні задачі дискретно-суцільного середовища (метод кінцево-дискретних елементів) [12, 13].

Для моделювання прибортових масивів та укосів уступів можуть використовуватися різні моделі деформування масиву (пружна, пружно-пластична, зі зміцненням, з розміцненням) із застосуванням різних критеріїв міцності масиву (Кулона – Мора, Хоека – Брауна та ін.) [14]. Межі чисельних моделей за висотою та в плані мають бути віддалені за межі можливої зони деформування масиву.

Мета дослідження. Аналіз досліджень з питань вивчення стійкості природних і штучних укосів засвідчив, що на сьогодні існує значна кількість моделей, методів, критеріїв міцності масиву та способів розрахунку стійкості гірського масиву. Однак усі отримані результати розрахунків зводяться до встановлення форми і місця розташування поверхні ковзання та визначення коефіцієнта стійкості гірського масиву. Враховуючи це, метою досліджень є встановлення ступеня стійкості уступу кварцових пісків на кар'єрі Сихівського родовища способом графічних побудов та у програмному комплексі Rocscience Slide в 2D на основі методу граничної рівноваги.

Викладення основного матеріалу. Сихівське родовище пісків розташоване у Львівській області. Корисною копалиною є піски кварцові тонко-дрібнозерністі, ясно-сірі, жовто-сірі, сипучі та слабо

ущільнені. Фізико-механічні характеристики кварцових пісків Сихівського родовища визначені за даними лабораторних та польових досліджень і є такими: об'ємна маса – $\gamma = 1,66 \text{ т/м}^3$; коефіцієнт розпушення – $K_p = 1,32$; природна вологість пісків – $W = 2,83 \%$; зчеплення пісків у гірському масиві – $C = 2 \text{ кПа}$; кут внутрішнього тертя – $\varphi = 33^\circ$; коефіцієнт пористості – $e = 0,65$.

Згідно з робочим проектом розробки родовища висота робочого уступу має становити $H = 20 \text{ м}$, а кут відкосу – $\alpha = 30^\circ$. Однак в деяких випадках, через низку об'єктивних причин, технологічні параметри на кар'єрі можуть не дотримуватися. Зокрема, через вихід з ладу робочого обладнання та високу інтенсивність робіт, кут відкосу робочого уступу певний час може складати до 50° (рис. 1). Це, відповідно, порушує технологію видобування та безпеку праці, а також може спричинити осипи, обвалення та зсуви [15]. Для попередження і запобігання зсувних явищ на укосах уступів необхідно оперативно визначити стійкість гірського масиву та можливу поверхню обвалення (ковзання).



Рис. 1. Загальний вигляд робочого уступу з видобутку кварцових пісків

Для зазначених умов розробки виконані дослідження з визначення стійкості робочого уступу кварцових пісків способами графічних побудов (класичним і спрощеним) та програмним комплексом Rocscience Slide методом граничної рівноваги.

В основі класичного способу графічних побудов закладено рівняння граничної рівноваги Кулона:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C, \quad (1)$$

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 поверхні ковзання утворюються під час досягнення певного значення головного напруження σ_1 , що визначається формулою:

$$\sigma_1 = 2C \cdot \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (2)$$

Згідно з методом Г.Л. Фісенко, поверхні ковзання виникають з глибини

$$H_{90} = \frac{\sigma_1}{\gamma} = \frac{2C}{\gamma} \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3)$$

де γ – об'ємна маса порід, т/м^3 .

Кут між напрямком головного напруження та елементарними поверхнями ковзання μ дорівнює:

$$\mu = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}. \quad (4)$$

В однорідному масиві нахил окремих ділянок поверхні ковзання призми можливого обвалення плавно змінюється від напрямку μ до вертикалі у верхній частині поверхні ковзання до напрямку під кутом μ до поверхні укосу в нижній частині, утворюючи при цьому круглоциліндричну поверхню. Схема побудови поверхні ковзання показано на рисунку 2 та виконується в такій послідовності:

- на кресленні укосу проводять лінію BD , віддалену від поверхні укосу на відстані H_{90} , і лінію AB ;
- на лінії BD обирають довільну точку та через неї проводять лінію DC під кутом $45^\circ + \varphi/2$ до лінії BD . Під цим же кутом з точки B проводять лінію BC ;
- з нижньої точки укосу M під кутом $45^\circ - \varphi/2$ до лінії укосу проводять лінію MK ;
- на лінії MK від т. M відкладають рівні відрізки MP , $P'P$, $P''P''$, а на лінії DC від точки C вниз – відрізки CC' , $C'C''$ і $C''C_0$;

- з точок P, P', P'' проводять прямі лінії, паралельні лінії укосу MA , а з точок C', C'' і C_0 – лінії, паралельні BC . Перетин цих ліній дасть точки F, F_1, F_2, F_3 . Через одержані точки проводиться пряма FT до перетину з лінією MK ;
- з т. T проводять пряму, паралельну DC , до перетину з лінією BD у точці E ;
- з т. N проводять перпендикуляр до лінії TE , а з т. M – перпендикуляр до лінії MK . Перетин перпендикулярів дасть положення центра кола, що проходить через т. M та E .

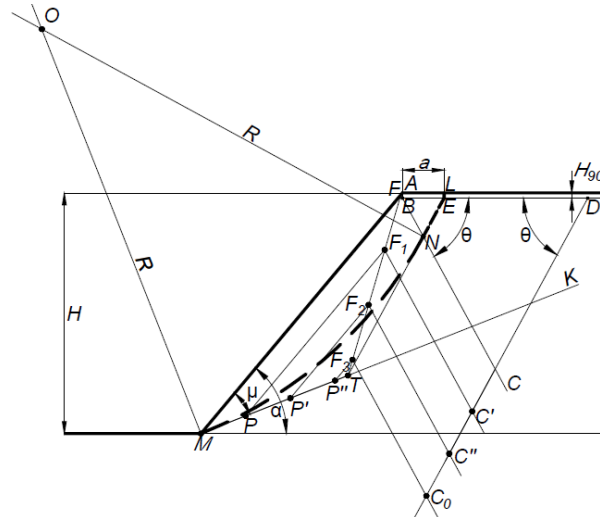


Рис. 2. Схема побудови поверхні ковзання в однорідному масиві (за методом Г.Л. Фісенко)

Після побудови лінії ковзання здійснюють перевірку стійкості укосу. Для цього у певному масштабі будують зсувний клин і вертикальними лініями розбивають його на певну кількість призм (рис. 3). Вимірюють площу кожного блока S_i і визначають масу породи в кожному блоці на $b = 1$ м укосу:

$$Q_i = S_i \gamma b, \text{ т.} \tag{5}$$

З точок перетину цих ліній з поверхнею ковзання проводять перпендикуляри. Для кожної призми визначають напрям дії Q_i та N_i , між якими вимірюють кут δ_i .

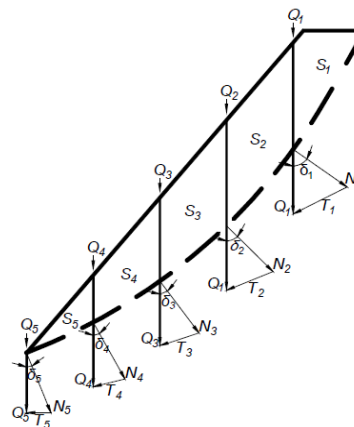


Рис. 3. Зсувний клин для розрахунку стійкості борту кар'єру

Чисельні значення складових ваги N_i і T_i розраховують за формулами, т:

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

Потім встановлюють загальну довжину поверхні ковзання L і визначають коефіцієнт стійкості укосу:

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

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

Якщо отриманий коефіцієнт стійкості більший або дорівнює допустимому значенню, то укіс вважається стійким, у протилежному разі – нестійким. У цьому випадку необхідне його виполювання, або проведення спеціальних заходів щодо забезпечення стійкості гірських порід у схилі.

Ширину призми можливого обвалення a визначають графічно з рисунка 2, виконаного у певному масштабі. Також для розрахунку значення a можна використовувати аналітичну формулу:

$$a = \frac{2H \left[1 - \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right) \right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right)}. \quad (8)$$

Для зазначених вище технологічно-небезпечних умов Сихівського родовища кварцових пісків ($\alpha = 50^\circ$) графічним способом в програмі AutoCAD компанії Autodesk побудована поверхня ковзання можливого обвалення гірських порід на уступі та розраховані усі необхідні параметри, в тому числі і для обчислення коефіцієнта стійкості укосу. Глибина виникнення поверхні ковзання становить $H_{90} = 0,44$ м, а кут між напрямком головного напруження та елементарними поверхнями ковзання – $\mu = 28^\circ 30'$. Радіус круглоциліндричної поверхні ковзання склав $R = 36,3$ м. Усі інші результати, відповідно до рисунків 2–3, розраховані за формулами (5) та (6), наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку параметрів зсуву

№ блока	Площа блоку S , м ²	Маса породи в блоці Q_i , т	Кут між складовими навантаження δ_i , град	Нормальна (утримуюча) складова N_i маси блока, т	Дотична (зсувна) складова T_i маси блока, т
I	16,4	27,224	54°28'	15,821	22,155
II	27,2	45,152	44°35'	32,155	31,698
III	24,0	39,840	36°10'	32,162	23,513
IV	16,6	27,556	28°35'	24,198	13,182
V	6,1	10,126	21°30'	9,421	3,711
Σ	90,3	149,898		113,759	94,257

Коефіцієнт стійкості видобувного уступу кварцового піску, відповідно (7), становить $K_{st} = 0,845$. Згідно з нормативними вимогами мінімально припустиме значення коефіцієнта стійкості має становити 1,3. Тому при отриманих параметрах стійкості відкосу виїмка гірничої маси є небезпечною. Загальна довжина поверхні ковзання при цьому склала $L = 28,76$ м. Ширина призми можливого обвалення визначена графічно і дорівнює $a = 3,46$ м.

На практиці широкого поширення набула спрощена схема побудови круглоциліндричної поверхні ковзання у схилі, що знаходиться в граничній рівновазі в однорідному масиві (рис. 4). Для цього від верхньої бровки укосу (т. A) в масштабі відкладають ширину призми обвалення a або AB . З точок A і B вертикально відкладають величину H_{90} , розраховану за (3), а з точок A' і B' проводять лінії під кутом $45^\circ + \varphi/2$ до горизонту. З отриманої при перетині цих ліній точки C відкладається перпендикуляр відносно напрямку $B'C$ до взаємного перетину в точці O з перпендикуляром, проведеним з точки M відносно напрямку MN , що становить з укосом кут $\mu = 45^\circ - \varphi/2$. Після цього радіусом $R = OC = OM$ проводять дугу кола MC з центром в точці O . Лінія $BB'CM$ є поверхнею ковзання на побудованому розрізі укосу уступу.

Для попередніх умов розробки кварцових пісків у програмі AutoCAD спрощеним графічним способом за наведеною вище методикою побудована також поверхня ковзання (рис. 4). Вона виявилася ідентичною класичній (за Г.Л. Фісенко), тобто радіус круглоциліндричної поверхні обвалення виявився таким самим: $R = 36,3$ м. Ширина призми можливого обвалення гірничої маси розрахована за формулою (8) і становить $a = 3,46$ м. Її значення також співпадає з визначеним графічно.

Крім того, розрахунок стійкості уступу кварцових пісків при $\alpha = 50^\circ$ виконано в програмі Slide 6 методами граничної рівноваги з використанням критерію міцності Mohr – Coulomb [16]. Модель уступу будується у вигляді замкненої полілінії, в якій верхня межа являє собою поверхню уступу, а всі інші межі задано з таким розрахунком, щоб можна було зробити повний аналіз і виключити негативний вплив крайових ефектів. Методами аналізу для даної моделі гірського масиву обрані Bishop, Janbu та Spencer.

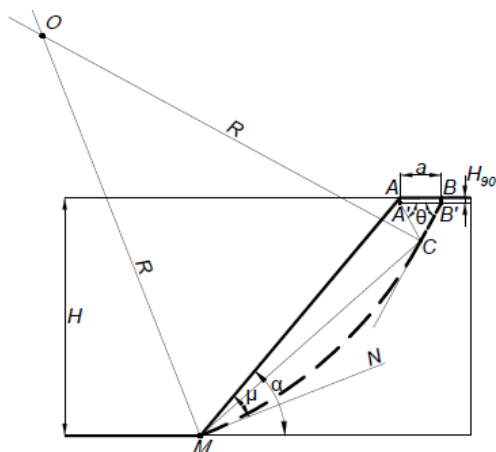


Рис. 4. Побудова поверхні ковзання в однорідному масиві спрощеним способом

Пошук критичної поверхні ковзання з найменшим коефіцієнтом стійкості виконано з застосуванням методу пошуку по сітці. Сітка центрів поверхонь ковзання у даному випадку створена автоматично. Кількість центрів у сітці: $21 \times 21 = 441$. Кожен центр у сітці є центром обертання серії кіл ковзання. Slide автоматично визначає радіуси кіл у кожній точці сітки на основі меж нахилу та приращення радіуса.

Після розрахунку отримано такі результати. Для спрощеного методу аналізу Bishop, маємо: глобальну мінімальну поверхню ковзання та контури коефіцієнта стійкості у центральній сітці ковзання з мінімальним коефіцієнтом стійкості з усіх аналізованих поверхонь (рис. 5, а); поверхню мінімального коефіцієнта стійкості, що згенерована в кожній точці сітки (рис. 5, б); усі поверхні ковзання (рис. 5, в); поверхні ковзання зі значеннями коефіцієнта стійкості від 0,5 до 1,3 (нормативного) (рис. 5, г).

На рисунках 6 та 7 зображено результати розрахунку за методами аналізу Janbu і Spencer. Як бачимо, зображення поверхонь ковзання аналогічні попередньо розглянутому методу Bishop.

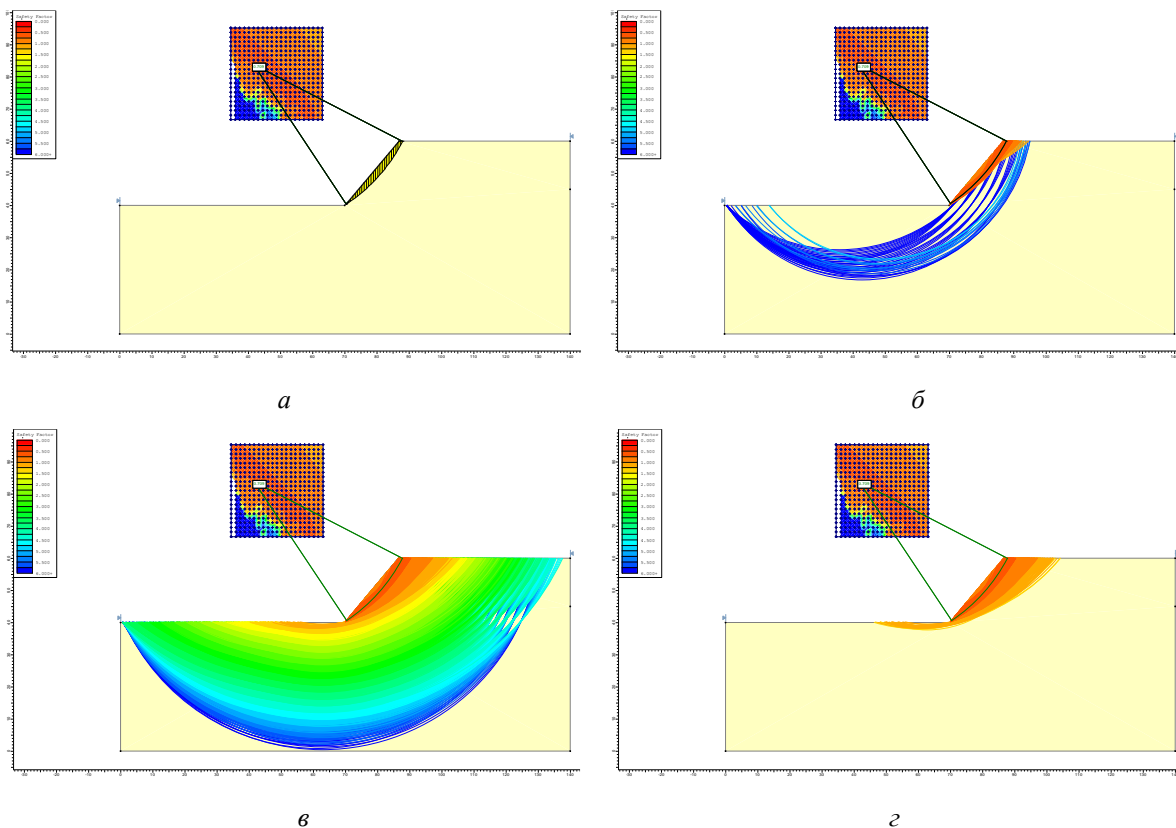


Рис. 5. Результати розрахунку стійкості уступу методом аналізу Bishop:

а – глобальна мінімальна поверхня ковзання та контури коефіцієнта стійкості у центральній сітці ковзання; б – поверхня мінімального коефіцієнта стійкості; в – усі поверхні ковзання; г – поверхні ковзання з коефіцієнтом стійкості від 0,5 до 1,3

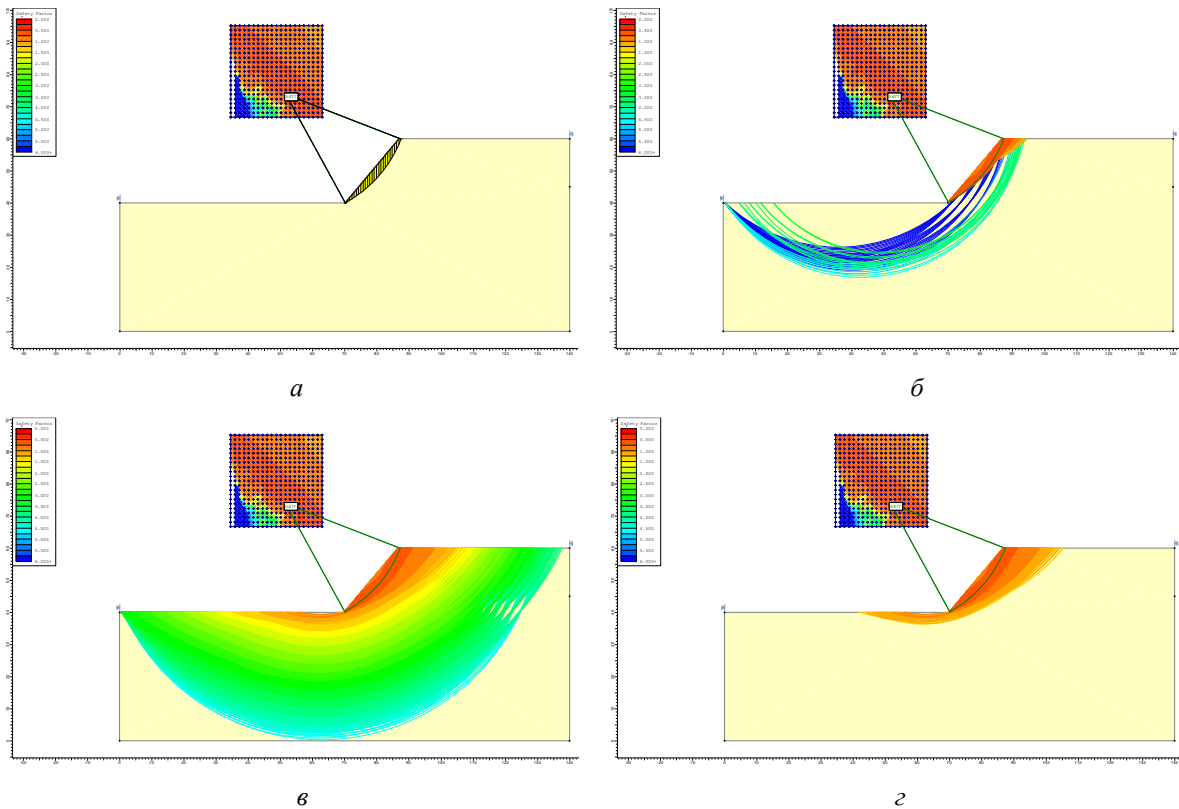


Рис. 6. Результати розрахунку стійкості уступу методом аналізу Janbu:
 а – глобальна мінімальна поверхня ковзання та контури коефіцієнта стійкості у центральній сітці ковзання; б – поверхня мінімального коефіцієнта стійкості, що згенерована в кожній точці сітки;
 в – усі поверхні ковзання; г – поверхні ковзання зі значеннями коефіцієнта стійкості від 0,5 до 1,3

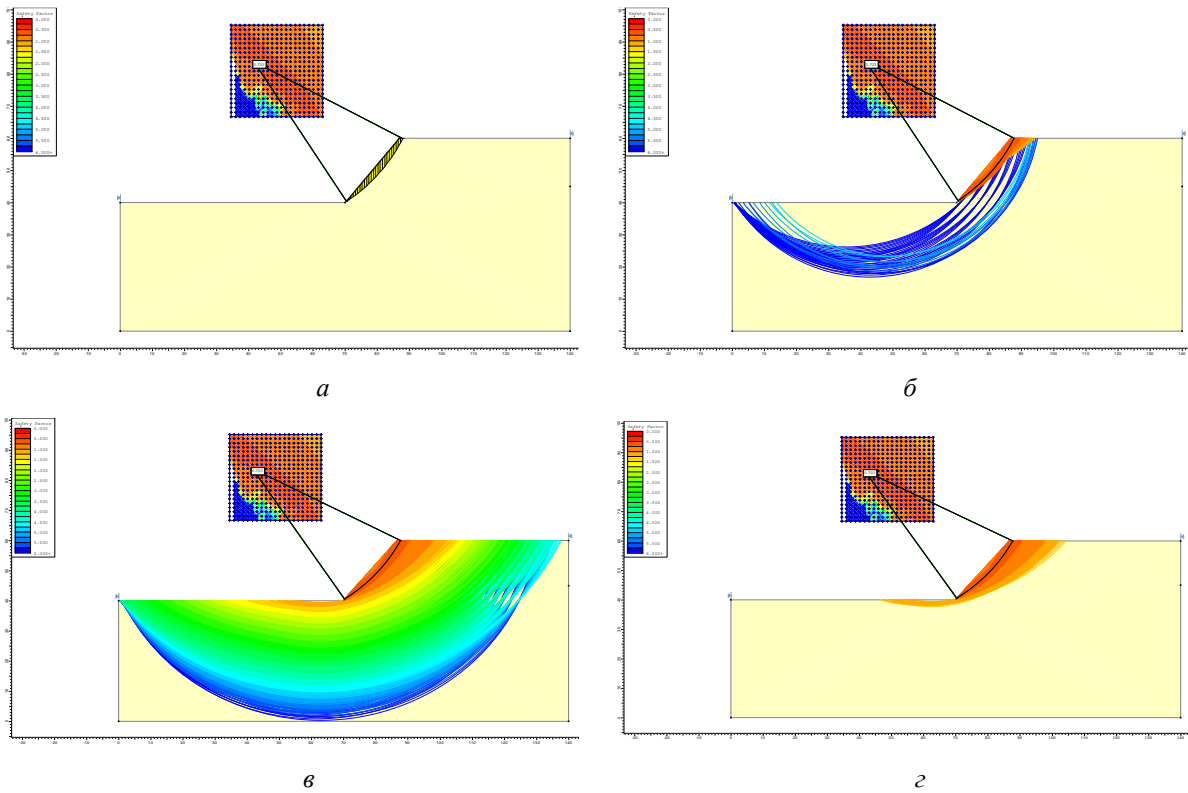


Рис. 7. Результати розрахунку стійкості уступу методом аналізу Spencer:
 а – глобальна мінімальна поверхня ковзання та контури коефіцієнта стійкості у центральній сітці ковзання; б – поверхня мінімального коефіцієнта стійкості, що згенерована в кожній точці сітки;
 в – усі поверхні ковзання; г – поверхні ковзання зі значеннями коефіцієнта стійкості від 0,5 до 1,3

В таблиці 2 наведено результати обчислень поверхонь ковзання та коефіцієнтів стійкості на зазначених вище методах аналізу у Slide 6.

Таблиця 2

Результати розрахунку показників стійкості уступу в програмі Slide 6

№ з/п	Розрахункові показники стійкості уступу	Методи аналізу		
		Bishop	Janbu	Spencer
Показники глобального мінімуму				
1	Коефіцієнт стійкості уступу K_{st}	0,709	0,677	0,703
2	Координати центру круглоциліндричної глобальної поверхні ковзання $(x; y)$, м	41,540; 83,872	51,538; 73,874	41,540; 83,872
3	Координати лівої кінцевої точки поверхні ковзання $(x; y)$, м	70,333; 40,397	70,067; 40,080	70,333; 40,397
4	Координати правої кінцевої точки поверхні ковзання $(x; y)$, м	87,900; 60,000	87,495; 60,000	87,900; 60,000
5	Радіус круглоциліндричної глобальної поверхні ковзання R , м	52,145	38,54	52,145
6	Момент опору, кН·м	18476,6	–	18321,1
7	Зсувний момент, кН·м	26067,5	–	26067,5
8	Горизонтальна сила опору, кН	–	271,394	236,066
9	Зсувна сила, кН	–	401,075	335,877
10	Загальна площа зсуву S_r , м ²	40,649	48,643	40,649
11	Ширина призми обвалення a_r , м	1,02	0,61	0,95
Параметри зон зсуву				
12	Площа поверхні мінімальних значень коефіцієнтів стійкості S_m , м ²	85,72	80,21	77,89
13	Площа поверхні ковзання з коефіцієнтами стійкості 0,5...1,3, м ²	305,06	377,15	306,12
14	Ширина призми можливого обвалення поверхні для мінімальних значень коефіцієнта стійкості a_m , м	7,98	7,55	7,01
15	Ширина призми небезпеки на поверхні уступу, м	17,1	18,28	17,33

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами аналізу останніх наукових досліджень і публікацій зазначено, що, зазвичай, методи розрахунку стійкості укосів кар'єрів ґрунтуються на моделі гранично-напруженого середовища (граничної рівноваги). Визначення стійкості борта або уступу кар'єру можна виконувати способами графічних побудов (класичним і спрощеним), прикладними програмами для розрахунку стійкості схилів методами граничної рівноваги та чисельними методами. Для умов кар'єру Сихівського родовища кварцових пісків виконано розрахунок стійкості робочого уступу з використанням способу графічних побудов та програмою Slide 6.

Класичним способом графічних побудов (за Г.Л. Фісенко), в основі якого покладено критерій міцності Кулона – Мора, в програмі AutoCAD побудована круглоциліндрична поверхня ковзання, радіус якої склав $R = 36,3$ м. Глибина початку поверхні ковзання, становить $H_{90} = 0,44$ м, кут між напрямком головного напруження та елементарними поверхнями ковзання – $\mu = 28^\circ 30'$, ширина призми можливого обвалення – $a = 3,46$ м, коефіцієнт стійкості уступу кварцового піску – $K_{st} = 0,845$.

Поверхня ковзання кварцових пісків, яка побудована спрощеним графічним способом, є ідентичною класичному способу графічних побудов, тобто графічні та розрахункові параметри співпадають. При розрахунку стійкості укосу в Rocscience Slide обрано критерій міцності Mohr – Coulomb (Мора – Кулона) та методи аналізу – Bishop, Janbu та Spencer. Для кожного методу аналізу отримано: глобальну мінімальну поверхню ковзання та контури мінімального коефіцієнта стійкості; поверхню мінімального коефіцієнта стійкості; усі можливі поверхні ковзання; поверхні ковзання зі значеннями коефіцієнта стійкості від 0,5 до 1,3. Аналіз отриманих показників стійкості уступу показує, що методи Bishop та Spencer майже ідентичні. Так коефіцієнт стійкості уступу при Bishop становить $K_{st} = 0,709$, а при Spencer – $K_{st} = 0,703$; радіуси круглоциліндричної глобальної поверхні ковзання однакові і становлять $R = 52,145$ м; загальна площа зсуву при глобальному мінімумі для цих методів також однакова $S = 40,649$ м². Метод аналізу Janbu суттєво вирізняється показниками – $K_{st} = 0,677$, $R = 38,54$ м, $S = 48,643$ м².

Площі поверхонь ковзання для усіх значень мінімального коефіцієнта стійкості для зазначених методів різняться між собою в межах 7,83 м. Більш безпечні умови вимагає метод аналізу Janbu, за якого ширина призми небезпеки на поверхні уступу має становити 18,28 м. Це приблизно на 1 м більше, ніж за

іншими методами. Отже в цілому, метод аналізу Janbu на 4...6 % за наведеними показниками стійкості відрізняється від Bishop та Spencer.

Аналіз результатів досліджень показує, що показники стійкості робочого уступу на Сихівському родовищі кварцового піску, які отримані при класичному методі графічних побудов значно відрізняються від результатів, отриманих у програмному комплексі Rocscience Slide для усіх обраних методів аналізу (табл. 2). Найближчим за окремими показниками до класичного методу є метод аналізу Bishop. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на виявлення причин отриманих розбіжностей та на отримання найбільш достовірних результатів.

Список використаної літератури:

1. Study on the influence of the deformation zones of the quarry sides on the rock mass movement / V.Kadirov, S.Karimov, U.Qushshayev, D.Sharapova // *E3S Web of Conferences* (Vol. 304, p. 02002). EDP Sciences. ICECAE 202. – 2021. – 9 p.
2. Романенко А.О. Виділення факторів та їх параметрів для проведення оцінки стійкості бортів глеюватського кар'єру / А.О. Романенко // *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва : науково-виробничий збірник*. – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2019. – Вип. 1 (23). – С. 28–38.
3. Черкез Є.А. Вплив просторової мінливості властивостей ґрунтів на стійкість схилу / Є.А. Черкез, Д.В. Мелконян, В.І. Скальський // *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. – 2019. – Т. 24. – № 2 (35). – С. 115–129.
4. Ковров О.С. Оцінка впливу гідрогеологічних характеристик ґрунтів на стійкість природних схилів для прогнозу зсувів / О.С. Ковров // *Екологічна безпека : науковий журнал*. – 2013. – № 1 (15). – С. 72–76.
5. Черняєв О.В. Технологічні аспекти формування стійких приконтурних та внутрішніх відвалів при розробці нерудних родовищ / О.В. Черняєв // *Збірник наукових праць НГУ*. – 2017. – № 51. – С. 84–93.
6. Тютькін О.Л. Критичний огляд методів розрахунку стійкості укосів і схилів / О.Л. Тютькін, О.І. Дубінчик, В.Р. Кільдєєв // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. – 2023. – Вип. 23. – С. 79–87.
7. Захарова Л.М. Моделювання незворотного деформування ґрунтів і масивів гірських порід методами теорії пружності / Л.М. Захарова // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2017. – Т. 53. – № 5. – С. 78–84.
8. Ковров О.С. Управління зсувонебезпечністю природних схилів та техногенних укосів з неоднорідною структурою в мінливих геокліматичних умовах : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук. : 05.15.09; 21.06.01 / О.С. Ковров. – Дніпро, 2019. – 36 с.
9. Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation / S.H. Jiang, D.Q. Li, Z.J. Cao et al. // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2015. – № 141 (2). – 13 p.
10. Ягольник А.М. Оцінювання стійкості зсувонебезпечних схилів при зміні властивостей ґрунтів / А.М. Ягольник, В.І. Марченко // *Збірник наукових праць. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво*. – 2016. – Вип. 1 (46). – С. 164–173.
11. Аналіз методів розрахунку стійкості зсувонебезпечних схилів / О.Л. Тютькін, О.І. Дубінчик, В.Р. Кільдєєв, Р.Б. Новік // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. – 2022. – Вип. 22. – С. 85–92.
12. Морзун А.С. Нелінійні проблеми механіки ґрунтів : монографія / А.С. Морзун. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 135 с.
13. A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties / D.Q. Li, S.H. Jiang, Z.J. Cao et al. // *Engineering Geology*. – 2015. – № 187. – P. 60–72.
14. Винников Ю.Л. Вибір моделі ґрунтів основ відвалів гірничо-збагачувальної промисловості / Ю.Л. Винников, Р.О. Повзик // *Форум гірників – 2013 : матеріали міжнар. конф. (2–5 жовтня 2013 р.)*. – Дніпропетровськ, 2013. – Т. 2. – С. 233–242.
15. Дзьоба М.В. Проблема забезпечення стійкості укосів уступів і бортів кар'єрів / М.В. Дзьоба, А.А. Міщенко, О.О. Фролов // *Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки (15–19 травня)*. – Житомир : Житомирська політехніка. – 2023. – С. 154–155.
16. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.roscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/quick-start-tutorial>.

References:

1. Kadirov, V., Karimov, S., Qushshayev, U. and Sharapova, D. (2021), «Study on the influence of the deformation zones of the quarry sides on the rock mass movement», *E3S Web of Conferences* (Vol. 304, p. 02002). EDP Sciences. ICECAE 202, 9 p.
2. Romanenko, A.O. (2019), «Vydilennia faktoriv ta yikh parametriv dlia provedennia otsinky stiihosti bortiv hleiuvat'skoho kar'єru», *Suchasni resursozberihaiuchi tekhnologii himychoho vyrobnytstva*, Kremenchutskiy natsionalnyi universytet imeni Mykhaila Ostrohradskoho, Issue 1 (23), pp. 28–38.
3. Cherkez, Ye.A., Melkonian, D.V. and Skalskiy, V.I. (2019), «Vplyv prostоровoi minlyvosti vlastyvostei gruntiv na stiihost skhylyu», *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Heohrafichni ta heolohichni nauky*, Vol. 24, No. 2 (35), pp. 115–129.
4. Kovrov, O.S. (2013), «Otsinka vplyvu hidroheolohichnykh kharakterystyk gruntiv na stiihost pryrodnykh skhylyv dlia prohnozu zsuviv», *Ekolohichna bezpeka*, naukovyi zhurnal, No. 1 (15), pp. 72–76.
5. Cherniaiev, O.V. (2017), «Tekhnolohichni aspekty formuvannia stiiykh prykonturnykh ta vnutrishnikh vidvaliv pry rozrobtsi nerudnykh rodovyshch», *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, No. 51, pp. 84–93.

6. Tiutkin, O.L., Dubinchyk, O.I. and Kildieiev, V.R. (2023), «Krytychnyi ohliad metodiv rozrakhunku stiikosti ukosiv i skhylyv», *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, Issue 23, pp. 79–87.
7. Zakharova, L.M. (2017), «Modeliuvannia nezvorotnoho deformuvannia gruntiv i masyviv hirskykh porid metodamy teorii pruzhnosti», *Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv*, Vol. 53, No. 5, pp. 78–84.
8. Kovrov, O.S. (2019), «Upravlinnia zsvonebezpechnistiu pryrodnykh skhylyv ta tekhnohennykh ukosiv z neodnorodnoiu strukturoiu v minlyvykh heoklimatychnykh umovakh», Abstract of D.Sc. dissertation, 05.15.09; 21.06.01, Dnipro, 36 p.
9. Jiang, S.H., Li, D.Q. and Cao, Z.J. et al (2015), «Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation», *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, No. 141 (2), 13 p.
10. Yaholnyk, A.M. and Marchenko, V.I. (2016), «Otsiniuvannia stiikosti zsvonebezpechnykh skhylyv pry zmini vlastyvoستي gruntiv», *Zbirnyk naukovykh prats. Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, Vol. 1 (46), pp. 164–173.
11. Tiutkin, O.L., Dubinchyk, O.I., Kildieiev, V.R. and Novik, R.B. (2022), «Analiz metodiv rozrakhunku stiikosti zsvonebezpechnykh skhylyv», *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, Vol. 22, pp. 85–92.
12. Morhun, A.S. (2016), *Neliniini problemy mekhaniky gruntiv*, monohrafiia, VNTU, Vinnytsi, 135 p.
13. Li, D.Q., Jiang, S.H. and Cao, Z.J. et al. (2015), «A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties», *Engineering Geology*, No. 187, pp. 60–72.
14. Vynnykov, Yu.L. and Povzyk, R.O. (2013), «Vybir modeli hruntiv osnov vidvaliv hirnycho-zbahachuvalnoi promyslovosti», *Forum hirnykiv – 2013*, materialy mizhnar. konf. (2–5 zhovtnia 2013 r.), Dnipropetrovsk, Vol. 2, pp. 233–242.
15. Dzoba, M.V., Mishchenko, A.A. and Frolov, O.O. (2023), «Problema zabezpechennia stiikosti ukosiv ustupiv i bortiv karieriv», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi onlain-konferentsii aspirantiv, molodykh uchennykh ta studentiv, prysviachenoii Dniu nauky (15–19 travnia)*, Zhytomyska politekhnika, Zhytomyr, pp. 154–155.
16. [Online], available at: <https://www.roscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/quick-start-tutorial>

Фролов Александр Александрович – доктор технічних наук, професор кафедри геоінженерії 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.

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.

Frolov O.O., Dzoba M.V.

Establishing the stability of the quartz sand slopes at the Sykhivske deposit quarry

The scientific publication highlights the results of research on determining the parameters of stability of quartz sand slope. According to the analysis of previous studies, it was found that in the vast majority of cases, methods for calculating slope stability are based on a model of a boundary-stress environment using graphical construction methods, application software packages for calculating slope stability, and numerical methods.

For the conditions of development of the Sykhiv quartz sand deposit, the stability of the working slope was calculated using graphical methods and the Rocscience Slide software package, and a comparative analysis of sliding surfaces was carried out.

Using graphical construction methods (classical and simplified), based on the strength criterion of the Coulomb-Mor rock mass, and Autodesk AutoCAD, circular-cylindrical sliding surfaces of possible displacement on the working slope of the quartz sands of the Sykhivske deposit were determined and all the necessary parameters of its stability were determined. The sliding surfaces, graphical and calculated parameters of both methods were identical.

The slope stability parameters were determined in the Rocscience Slide software package using the Slide 6 programme. Mohr-Coulomb was chosen as the strength criterion, and Bishop, Janbu and Spencer were used as the analysis methods. For each method, the following were determined: the global minimum sliding surface and the contours of the minimum stability factor; the minimum stability factor surface generated at each point of the grid; all possible sliding surfaces; and sliding surfaces for stability factor values from 0.5 to 1.3 (the standard value).

The results of calculations show that when using the Janbu method, the quartz sand slope is more dangerous than when using the Bishop and Spencer methods (by about 4...6 % according to the given indicators of slope stability). Compared to the classical method of graphical construction, which is currently normative, the values obtained in Slide for all selected methods of analysis differ significantly in the direction of higher danger, especially in terms of global minimum.

Keywords: quarry; quartz sand; working slope; rock displacement; stability coefficient; sliding surface; limit equilibrium methods; global minimum indicators.

Стаття надійшла до редакції 19.09.2023.