

© М.В. Дзьоба¹, Т.В. Косенко¹, О.О. Фролов¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТИМЧАСОВО НЕРОБОЧОГО УСТУПУ КВАРЦОВИХ ПІСКІВ МЕТОДОМ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

М. Dzoba¹, <https://orcid.org/0000-0002-5159-0317>

Т. Kosenko¹, <https://orcid.org/0000-0001-9635-1427>

О. Frolov¹, <https://orcid.org/0000-0001-8053-2653>

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

STUDY OF THE STABILITY OF A TEMPORARILY INACTIVE QUARTZ SAND SLOPE USING NUMERICAL SIMULATION

Мета. Встановлення стійкості тимчасово неробочого уступу в кар'єрі Сихівського родовища кварцового піску при різних кутах укосу шляхом чисельного моделювання його стану у програмному комплексі PLAXIS 3D та порівняння отриманих результатів з даними, визначеними методом графічних побудов і методами граничної рівноваги.

Методика. Дослідження ґрунтується на застосуванні методу скінченних елементів для моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву в PLAXIS 3D. Розрахунок коефіцієнта стійкості здійснювався методом поступового зниження характеристик міцності ґрунту до моменту втрати його стійкості з визначенням параметра Reached safety factor. Додатково проведено порівняння отриманих результатів з даними, визначеними методами Bishop, Janbu та Spencer у програмному комплексі Rocscience Slide, а також методом графічних побудов.

Результати. Встановлено значення коефіцієнтів стійкості (Reached safety factor) уступу та максимально можливих переміщень гірського масиву для різних кутів укосу. Виявлено, що результати чисельного моделювання в PLAXIS 3D практично збігаються з показниками, отриманими методом графічних побудов, що підтверджує достовірність і ефективність застосованого підходу. Водночас встановлено, що при збільшенні кута укосу відбувається закономірне зниження коефіцієнта стійкості та зростання деформацій масиву.

Наукова новизна. Встановлено характер зміни параметрів стійкості уступу залежно від кута його укосу. Виконано комплексне порівняння результатів оцінки стійкості укосів кварцових пісків, отриманих методами чисельного моделювання в PLAXIS 3D та граничної рівноваги.

Практична значимість. Використання отриманих результатів дозволяє обґрунтувати безпечні параметри укосів уступів під час проектування та експлуатації кар'єрів, що розробляють кварцові піски, а також сприяють підвищенню рівня промислової безпеки гірничих робіт.

Ключові слова: *стійкість укосів, кварцові піски, кар'єр, метод скінченних елементів, чисельне моделювання, PLAXIS 3D, напружено-деформований стан, коефіцієнт стійкості, Reached safety factor, прибортовий масив.*

Вступ. Забезпечення стійкості уступів і бортів кар'єрів, що розробляють пухкі гірські породи, є однією з основних умов безпечного і ефективного ведення відкритих гірничих робіт. Від якісного формування укосів залежить надійність виконання усіх технологічних процесів у межах кар'єру, а також безпека експлуатації гірничотранспортного обладнання і персоналу. Порушення стійкості бортів може спричинити розвиток деформаційних процесів, що негативно впливає на виробничий процес. Згідно з вимогами Правил безпеки при розробці родовищ корисних копалин відкритим способом, формування тимчасових неробочих бортів кар'єру, зокрема, визначення граничних кутів укосів, та відновлення гірничих робіт на них повинно здійснюватися відповідно до технічного проекту розробки даного родовища, у якому передбачаються відповідні заходи безпеки [1]. Для оцінки стійкості уступів і бортів кар'єру використовується коефіцієнт стійкості укосу K_{st} [2, 3]. Граничні значення коефіцієнту стійкості для різних гірничо-геологічних умов наведено в нормативній та довідковій літературі [4, 5].

Класичним підходом до визначення стійкості укосів на кар'єрах є метод графічних побудов (за Г.Л. Фісенком), який ґрунтується на виконанні умови граничної рівноваги вздовж внутрішньої поверхні ковзання прибортового гірського масиву. Проте застосування цього методу вимагає значних витрат часу, а виконання розрахунків для складних гірничо-геологічних умов суттєво ускладнюється. У зв'язку з цим було розроблено низку спеціалізованих програмних комплексів для оцінки стійкості схилів методами граничної рівноваги, зокрема SCAD Soft «Откос», Rocscience Slide, Slope та інші, які дозволяють суттєво спростити та пришвидшити виконання розрахунків [6-8].

Водночас встановлено, що чисельні значення коефіцієнту стійкості, отримані методом графічних побудов, істотно відрізняються від результатів, визначених за допомогою вищезазначених прикладних програм [9, 10]. Крім того, коефіцієнти стійкості, розраховані в програмних комплексах, також відрізняються між собою залежно від використаного методу аналізу (Bishop, Spencer, Janbu та ін.), що ускладнює визначення дійсного значення K_{st} .

Аналіз попередніх досліджень. Широке впровадження методів чисельного моделювання стало можливим завдяки розвитку сучасної обчислювальної техніки і спеціалізованого програмного забезпечення. Це дало змогу виконувати моделювання складних за структурою та формою зсувонебезпечних схилів у взаємодії з будь-якими інженерними конструкціями, розташованими на цих схилах. Висока точність розрахунків забезпечується реалізацією спеціалізованих алгоритмів, які дозволяють мінімізувати ймовірність похибок. У зв'язку з цим методи чисельного моделювання все частіше розглядаються дослідниками як основний інструмент оцінки стійкості схилів і укосів [11].

У наукових дослідженнях зазначається, що методи чисельного моделювання є особливо ефективними, коли характер деформування укосів відрізняється від типових розрахункових схем, при прогнозуванні розвитку деформацій та напружень у масиві, при нелінійній поведінці гірських масивів у різних напружених станах та при оцінці динамічного впливу технологічного обладнання на уступи кар'єру. Як правило, у чисельному моделюванні, коефіцієнт за-

пасу стійкості укосів визначають шляхом поетапного зниження міцності порід на зсув до моменту виникнення пластичних деформацій. Отримане значення коефіцієнту у більшості випадків є еквівалентним коефіцієнту запасу стійкості, визначеному методами граничної рівноваги.

При моделюванні поведінки прибортових масивів кар'єрів можуть бути використані різні моделі деформування гірських порід, зокрема пружні, пружно-пластичні, а також моделі зі зміцненням та розміцненням матеріалу. Для оцінювання граничного стану масиву використовують різні критерії міцності, серед яких найбільш поширеними є Кулона-Мора, Хоека-Брауна та інші [12].

Як зазначено в [13], метод скінченних елементів дає можливість виконувати розрахунки стійкості укосів з урахуванням значно більшої кількості факторів, а розрахункову модель розбивати на велику кількість дискретних елементів. Використання таких підходів також дозволяє суттєво скоротити час повторних розрахунків при зміні інженерно-геологічних або гідрогеологічних умов на об'єкті моделювання. Крім того, у сучасних програмних комплексах реалізовано процедуру поетапного зниження міцнісних характеристик гірських порід для визначення критичних значень коефіцієнту стійкості схилу [14].

В [15] наведено детальний аналіз існуючих методів оцінки стійкості гірських масивів. Автори зазначають, що розрахункові методи, засновані на теорії граничної рівноваги, ґрунтуються на низці припущень, зокрема щодо форми поверхні ковзання, неврахування взаємодії між окремими секціями масиву, а також розгляду лише вузької смуги схилу. За наявності значної кількості підпірних або огорожувальних конструкцій такі розрахунки стають досить трудомісткими, а отримані результати не завжди повною мірою відображають реальний стан масиву.

Автори [16] зазначають, що методи чисельного моделювання ґрунтуються на послідовному зниженні або підвищенні зсувних характеристик ґрунтів, а саме зчеплення та кута внутрішнього тертя. Руйнування масиву настає у випадку, коли умова рівноваги системи не виконується. В даному методі поверхня ковзання не є вихідним параметром, а визначається в процесі розрахунку.

Перевагою чисельного моделювання є відсутність необхідності вводити спрощення щодо роботи окремих секцій масиву та їх взаємодії між собою, оскільки масив розбивається на окремі дискретні елементи. Завдяки цьому ймовірна поверхня руйнування визначається більш обґрунтовано та наближено до реальних умов.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Таким чином, методи чисельного моделювання, що реалізовані в програмних комплексах Plaxis, Midas GTS NX, Autodesk Inventor Nastran, Solidworks та інших, суттєво розширюють можливості оцінки стійкості укосів уступів і бортів кар'єрів, оскільки дозволяють розв'язувати широкий спектр задач механіки суцільного, дискретного і дискретно-суцільного середовищ. У зв'язку з цим результати чисельних розрахунків можуть використовуватись для підтвердження даних, отриманих іншими методами.

Одним з найбільш поширених програмних комплексів для таких досліджень є PLAXIS 3D, у якому реалізовано метод поступового зниження міцності масиву, що дозволяє виконувати оцінку стійкості як альтернативу методам граничної рівноваги.

Аналіз наукових досліджень і публікацій в сфері моделювання поведінки укосів гірських масивів свідчить, що чисельні методи, які є відносно новими, здатні найбільш точно прогнозувати стан природних і штучних укосів за будь-яких гірничо-геологічних умов та за умови застосування різноманітних укріплюючих конструкцій. Враховуюче зазначене, **метою** наукової статті є встановлення стійкості тимчасово неробочого уступу в кар'єрі Сихівського родовища кварцового піску при різних кутах укосу шляхом чисельного моделювання його стану у програмному комплексі PLAXIS 3D.

Основна частина (Результати). Встановлення стійкості уступів і бортів кар'єрів у PLAXIS 3D базується на чисельному аналізі напружено-деформованого стану гірського масиву із використанням методу зниження міцнісних параметрів Strength Reduction Method (SRM). Суть підходу полягає у поступовому зниженні параметрів міцності ґрунту – зчеплення та кута внутрішнього тертя – до досягнення граничного стану, за якого система втрачає стійкість і порушується її рівновага. Критичне значення коефіцієнта редукції відповідає коефіцієнту стійкості укосу [17]. Поверхня потенційного руйнування (поверхня ковзання) формується автоматично в процесі розрахунку залежно від напруженого стану та геометрії укосу.

Відповідно до проекту розробки Сихівського родовища, висота уступу становить $H = 20$ м, а кут відкосу – $\alpha = 30^\circ$. Проте, через об'єктивні причини, кут відкосу може порушуватися і тимчасово зростати до 50° . Це підвищує ризик розвитку зсувних процесів. Тому для запобігання зсувам необхідно своєчасно виявляти можливі поверхні обвалення (ковзання).

Для побудови тривимірної розрахункової моделі спочатку задаються геометричні параметри робочої області, розміри якої повинні забезпечувати охоплення всієї потенційної зони деформування гірського масиву. В даному дослідженні розміри розрахункової області приймаємо такими: $X_{\max} = 140$ м; $Y_{\max} = 30$ м; $Z_{\max} = 30$ м. Далі призначаємо тип гірської породи, яка буде застосована в моделі, та вводимо її фізико-механічні характеристики, необхідні для подальшого моделювання напружено-деформованого стану масиву. В даній роботі як досліджуване середовище розглядаються кварцові піски (рис. 1).

В межах робочої області спочатку будуємо за заданими координатами плоску модель, а потім її переводимо у тривимірний вигляд. Після створення розрахункової сітки виконуємо розрахунки для встановлення напружено-деформованого стану гірського масиву (рис. 2).

За результатами розрахунку отримуємо значення коефіцієнта стійкості K_{st} , що відповідає Reached safety factor (рис. 3). У даному випадку, для моделі з кутом укосу уступу 50° , значення Reached safety factor становить $K_{st} = 0,7828$, що свідчить про втрату стійкості системи та неспроможність масиву витримати задані навантаження.

Soil - Mohr-Coulomb - Fine Grained Quartz Sand		
Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Fine Grained Quartz Sand
Soil model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Drained
Colour		RGB 250, 248, 143
Comments		
Unit weights		
γ_{unsat}	kN/m ³	16,60
γ_{sat}	kN/m ³	19,50
Void ratio		
e_{init}		0,6500
n_{init}		0,3939

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'_{ref}	kN/m ²	35,00E3
ν (nu)		0,3000
Alternatives		
G_{ref}	kN/m ²	13,46E3
E_{ped}	kN/m ²	47,12E3
Depth-dependency		
E'_{inc}	kN/m ² /m	0,000
z_{ref}	m	0,000
Wave velocities		
V_s	m/s	89,19
V_p	m/s	166,9
Strength		
Shear		
c'_{ref}	kN/m ²	2,000
ϕ' (phi)	°	33,00
ψ (psi)	°	3,000

Рис. 1. Фізико-механічні характеристики кварцового піску

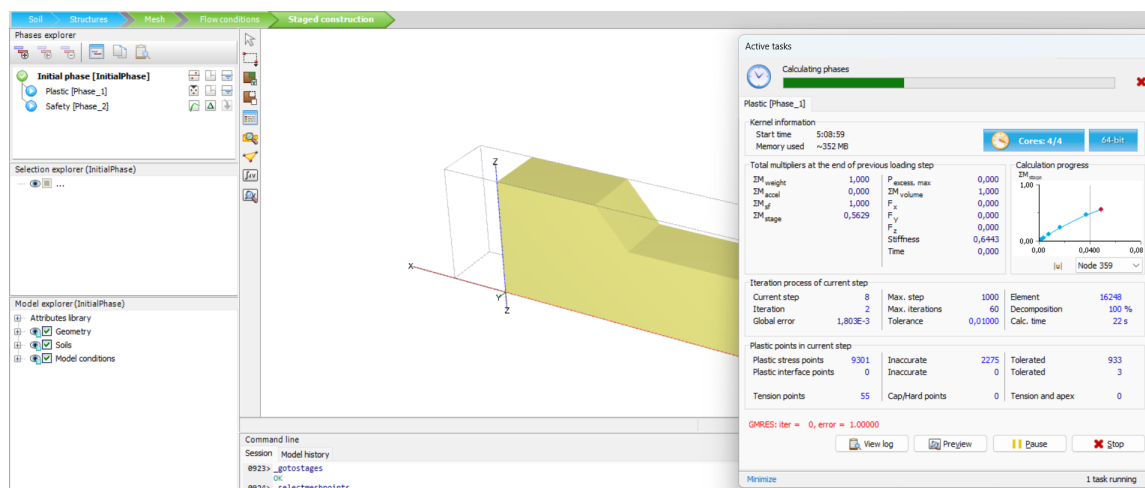


Рис. 2. Розрахунок напружено-деформованого стану гірського масиву

Phases		
Initial phase [InitialPhase]	Name	Value
Plastic [Phase_1]	Tolerated error	0,01000
Safety [Phase_2]	Over-relaxation factor	1,200
Consolidation [Phase_3]	Max number of iterations	60
	Desired min number of iterations	6
	Desired max number of iterations	15
	Arc-length control type	On
	Use subspace accelerator	☐
	Subspace size	3
	Use line search	☐
	Reached values	
	Reached total time	0,000 day
	CSP - Relative stiffness	0,01809E-3
	ForceX - Reached total force	0,000 kN
	ForceY - Reached total force	0,000 kN
	ForceZ - Reached total force	0,000 kN
	Pmax - Reached max pp	0,000 kN/m ²
	ΣM_{stage} - Reached phase p	0,000
	ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
	ΣM_{sf} - Reached safety fact	0,7828

Рис. 3. Визначення коефіцієнту стійкості укусу (Reached safety factor)

Завершальним кроком є аналіз деформацій масиву в укосі уступу.

На рис. 4 представлено результат розрахунку напружено-деформованого стану кварцових пісків в уступі кар'єру для кута укосу 50° .

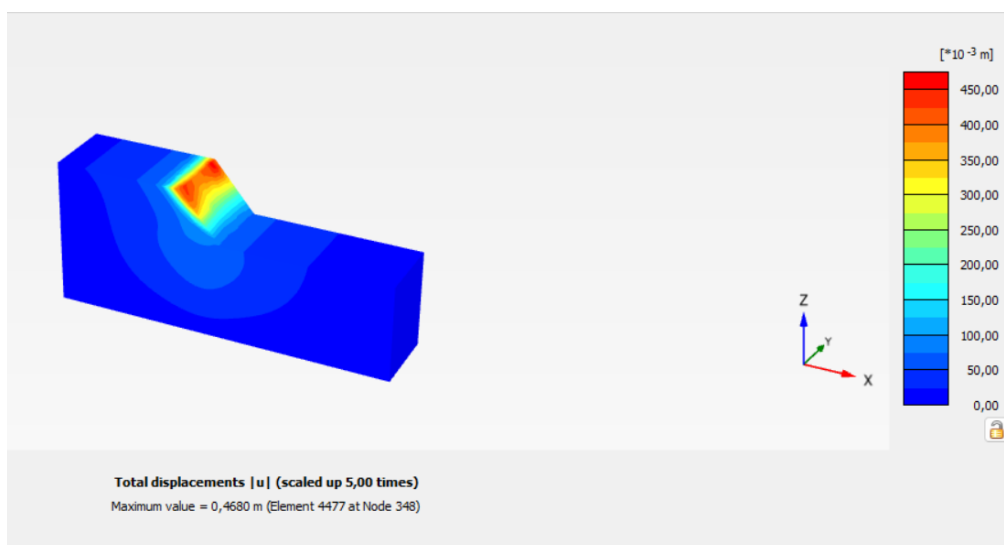


Рис. 4. Напружено-деформований стан уступу для кута укосу $\alpha = 50^\circ$

Аналогічні дослідження стану стійкості уступів кварцових пісків були проведені для інших значень кутів укосу. За результатами чисельного моделювання для кожного варіанта отримано значення коефіцієнта стійкості K_{st} (Reached safety factor) та ймовірні максимально можливі переміщення зсувного клину породи u (табл. 1).

Таблица 1

Значення коефіцієнтів стійкості K_{st} і переміщень гірського масиву u при моделюванні напружено-деформованого стану уступу

Кут укосу уступу, град	25	30	35	40	45	50
Коефіцієнт стійкості укосу K_{st}	1,686	1,396	1,186	1,003	0,882	0,783
Переміщення гірничої маси u , м	0,099	0,112	0,124	0,162	0,461	0,468

На рис. 5 та 6 наведені графіки, відповідно, зміни коефіцієнту стійкості укосу K_{st} і максимально можливих переміщень призми можливого зсуву гірничої маси u залежно від кута укосу неробочого уступу α .

Графічна залежність, що наведена на рис. 5, описується поліномом 2-го порядку:

$$K_{st} = 3,7417 - 0,1059\alpha + 0,0009\alpha^2. \quad (1)$$

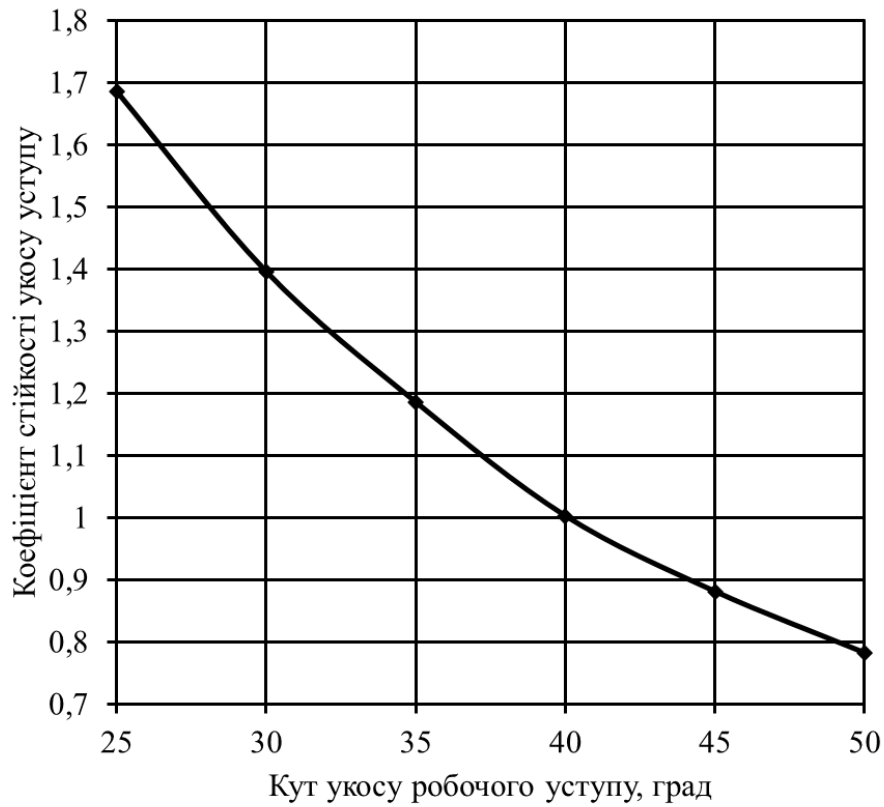


Рис. 5. Зміна коефіцієнту стійкості укосу уступу K_{st} від кута його укосу α

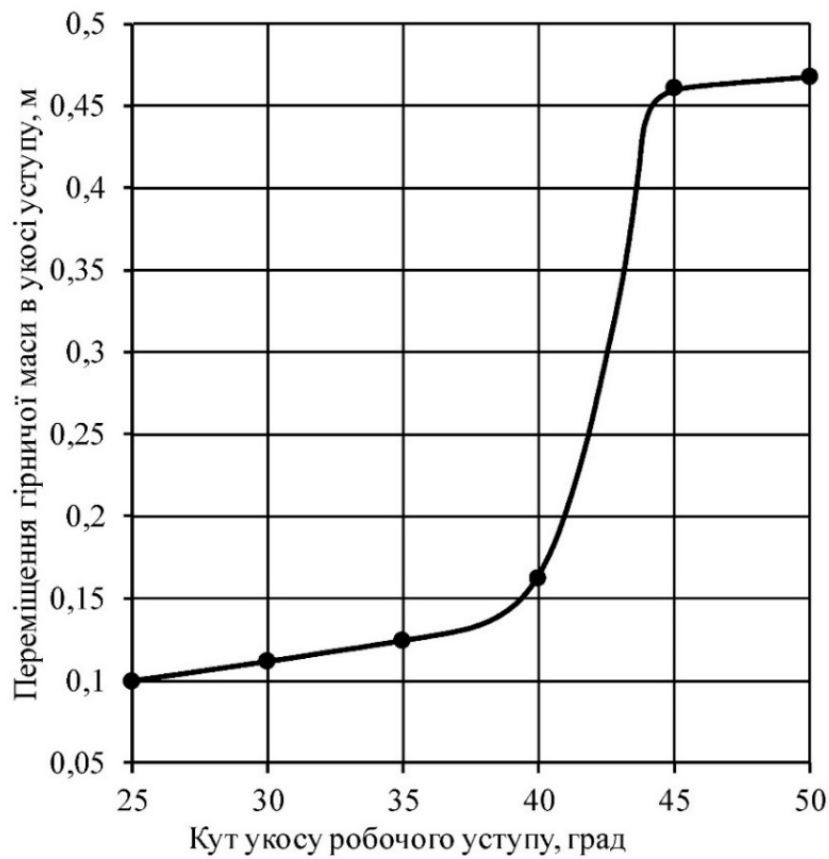


Рис. 6. Зміна переміщень гірничої маси u на уступі від кута його укосу α

Аналіз рис. 6 показує, що представлена залежність між переміщенням і кутом укошу має більш складний характер. Зокрема, при збільшенні кута неробочого уступу від 25° до 35° , ця залежність має лінійний характер з поступовим збільшенням переміщення в 1,25 рази. На ділянці від 35° до 50° спостерігається різке підвищення значень переміщень майже у 3,8 рази.

Графічна залежність рис. 6 апроксимується логістичною функцією виду:

$$u = 0,095 + \frac{0,385}{1 + e^{-1,3(\alpha - 42,5)}} \quad (2)$$

де α – кут укошу, град.; e – число Ейлера, основа натуральної експоненти.

Порівнюючи результати досліджень, наведених в [18], зі встановлення закономірностей зміни коефіцієнту стійкості від кута укошу уступу, бачимо, що результати моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву в PLAXIS 3D майже збігаються з даними, отриманими методом графічних побудов (за Г.Л. Фісенко). Графічні зміни коефіцієнту стійкості K_{st} , що отримані з використанням методу графічних побудов, методів аналізу в Rocscience Slide (Bishop, Janbu, Spencer) та моделювання в PLAXIS 3D при різних кутах укошу уступу кварцових пісків α наведено на рис. 7.

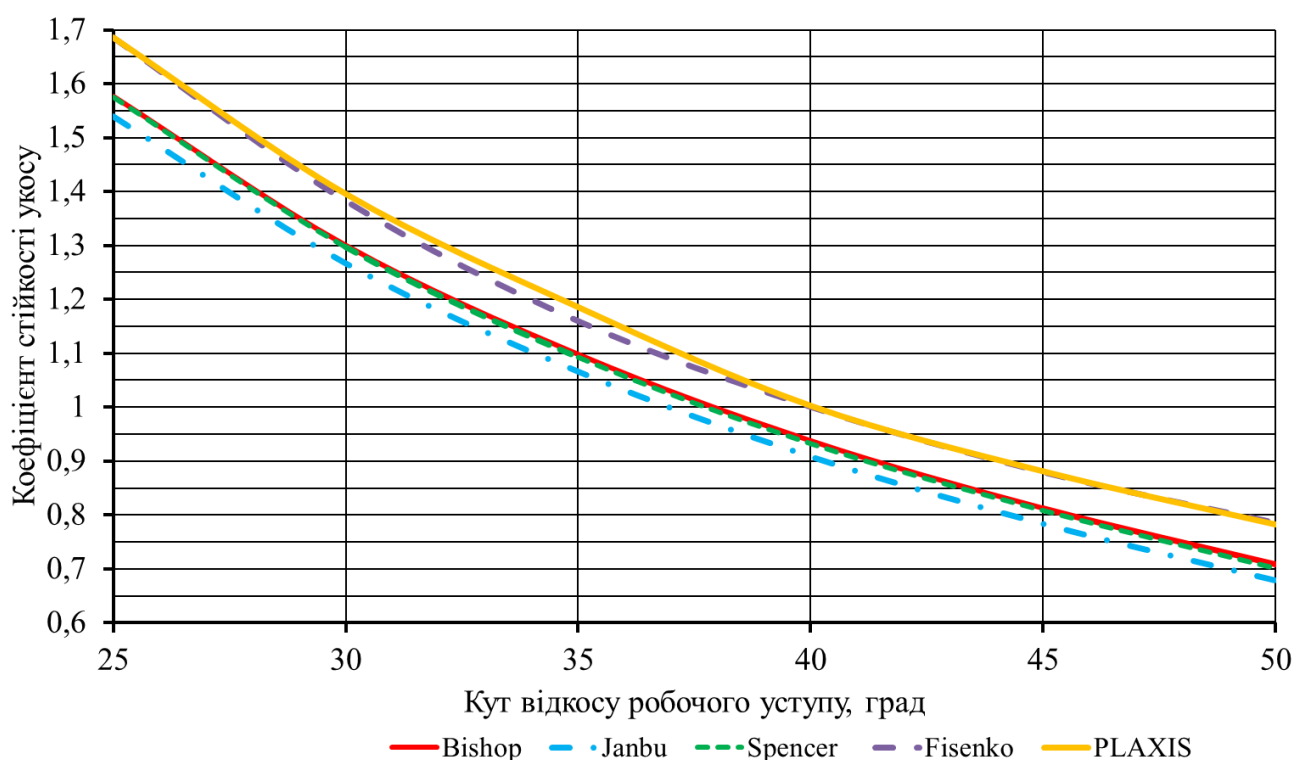


Рис. 7. Зміна коефіцієнту стійкості уступу залежно від кута укошу при різних методах аналізу

З рис. 7 видно, що при чисельному моделюванні напружено-деформованого стану неробочого уступу кварцових пісків на кар'єрі Сихівського родовища у PLAXIS 3D отримані значення коефіцієнта стійкості практично збігаються з результатами, визначеними методом графічних побудов.

Висновки. За результатами моделювання напружено-деформованого стану укосу неробочого уступу Сихівського родовища кварцових пісків у програмному комплексі PLAXIS 3D отримано значення коефіцієнтів стійкості укосів K_{st} (Reached safety factor) і максимально можливих переміщень гірського масиву в уступі. Встановлено, що значення коефіцієнтів стійкості для різних кутів укосів практично збігаються зі значеннями K_{st} , отриманими методом графічних побудов, що підтверджує достовірність виконаного чисельного моделювання.

Графічну залежність зміни коефіцієнту стійкості укосу K_{st} від кута укосу уступу α можна описати поліномом 2-го порядку.

Залежність між переміщенням гірського масиву в уступі і кутом укосу має більш складний характер, який апроксимується логістичною функцією. При збільшенні кута неробочого уступу від 25° до 35° ця залежність має лінійний характер і чисельні значення переміщення поступово збільшуються в 1,25 рази. В подальшому, при зміні кута укосу від 35° до 50° , спостерігається різке підвищення значень переміщень майже у 3,8 рази.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для обґрунтування безпечних параметрів укосів уступів під час проектування та експлуатації кар'єрів кварцових пісків, що сприятиме підвищенню рівня промислової безпеки під час ведення відкритих гірничих робіт, зменшенню ймовірності деформацій і обвалень уступів, зниженню виробничих ризиків для технологічного обладнання та виробничого персоналу.

Перелік посилань

1. Правила безпеки при розробці родовищ корисних копалин відкритим способом (НПАОП 0.00-1.33-94). (1994). Київ, Україна: Норматив.
2. Тютюкін, 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>
3. ДСТУ-Н В.1.1-37:2016. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. (2017). Київ, Україна: ДП «УкрНДНЦ».
4. СОУ-МПП 73.020-078-1:2007 *Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. Ч. 1-2. Гірничі роботи. Ліквідація гірничодобувних підприємств. Техніко-економічна оцінка та показники.* (2007). Міністерство промислової політики України.
5. *Методичні вказівки з визначення оптимальних кутів нахилу бортів укосів уступів і відвалів залізрудних та флюсових кар'єрів.* (2009). Мінполітики та ІППЕ НАН України.
6. Jiang, S. H., Li, D. Q., Cao, Z. J., Zhou, C. B., & Phoon, K. K. Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(2), 04014096. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001227](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001227)
7. Ягольник, А. М., & Марченко, В. І. (2016). Оцінювання стійкості зсувонебезпечних схилів при зміні властивостей ґрунтів. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*, 1(46), 164-173. <https://journals.nupp.edu.ua/znp/article/view/17>
8. Тютюкін, О. Л., Дубінчик, О. І., Кільдєєв, В. Р., & Новік, Р.Б. (2022). Аналіз методів розрахунку стійкості зсувонебезпечних схилів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 22, 85–92. <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268401>

9. Dzoba, M. V., Lytvynchuk, I. D. & Frolov O. O. (2023). Study of the stability of the working bench of quartz sands. In *Book of Abstracts of 6nd International Scientific and Technical Internet Conference «Innovative Development of Resource-saving Technologies and Sustainable Use of Natural Resources»* (pp.151-154). Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing.
10. Дзьоба, М. В., Литвинчук, І. Д., & Фролов, О. О. (2024). Встановлення закономірностей впливу ширини блоків розбивки зсувного клина на значення коефіцієнта стійкості укосу уступу кварцових пісків. *Технічна інженерія*, 1(93), 325–331. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-325-331](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-325-331)
11. Li, D. Q., Jiang, S. H., Cao, Z. J., Zhou, W., Zhou, C. B., & Zhang, L. M. (2015). A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties. *Engineering Geology*, 187, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.12.003>
12. Винников, Ю. Л., & Повзик, Р. О. (2013). Вибір моделі ґрунтів основ відвалів гірничо-збагачувальної промисловості. *Форум гірників – 2013* (Т.2, с. 233-242). Дніпропетровськ, Україна: НГУ.
13. Ягольник, А. М., & Марченко В. І. (2017). Оцінювання стійкості зсувонебезпечних схилів при зміні властивостей ґрунтів. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*. 1(46), 164–173. <https://journals.nupp.edu.ua/znp/article/view/17>
14. Lim, K., Li, A., & Lyamin, A. (2015). Slope stability analysis for fill slopes using finite element limit analysis. In *Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 1597–1602). Edinburgh, UK.
15. Chubka, P. Yu., & Chubka, Yu. Sh. (2021). Comparison of methods for calculating the stability of soil arrays. *The Eurasian Scientific Journal*, 13(5).
16. Akopyana, V., & Akopyana, A. (2016). Experimental and Theoretical Investigation of the Interaction of the Reinforced Concrete Screw Piles with the Surrounding Soil. *Procedia Engineering*, 150, 2202–2207. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.264>
17. Griffiths, D. V. & Lane, P. A. (1999). Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Géotechnique*, 49(3), 387–403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
18. Дзьоба М. В., & Фролов, О.О. (2024). Дослідження впливу кута укосу робочого уступу кварцових пісків на коефіцієнт його стійкості. *Збірник наукових праць НГУ*, 76, 51–62. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.051>

ABSTRACT

Purpose. Determining the stability of a temporarily inactive bench in the Sikhivsky quartz sand deposit quarry at various bench angles by numerical modeling its state using the PLAXIS 3D software package and comparing the results with data obtained through graphical constructions and limit equilibrium methods.

The methods. The study is based on the application of the finite element method to model the stress-strain state of the rock mass in PLAXIS 3D. The stability factor was calculated by gradual reducing the soil strength characteristics until the point of instability, with the determination of the Reached safety factor. Additionally, the obtained results were compared with data determined using the Bishop, Janbu, and Spencer methods in the Rocscience Slide software package, as well as using graphical construction methods.

Findings. The values of the slope stability factors (Reached safety factor) and the maximum possible displacements of the rock mass for various slope angles were determined. It was found that the results of numerical modeling in PLAXIS 3D practically coincide with the indicators obtained by the graphical construction method, which confirms the reliability and effectiveness of the applied approach. At the same time, it was established that as the slope angle increases, there is a regular decrease in the stability factor and an increase in massif deformations.

The originality. The nature of changes in slope stability parameters as a function of the slope angle has been established. A comprehensive comparison was conducted of the results of assessing the stability of quartz sand slopes obtained using numerical modeling in PLAXIS 3D and the limit equilibrium method.

Practical implementation. The use of the obtained results allows justification of safe slope parameters for bench faces during the design and operation of quartz sands quarries, and also contributes to improving the level of industrial safety in mining operations.

Keywords: *slope stability, quartz sands, quarry, finite element method, numerical simulation, PLAXIS 3D, stress-strain state, stability factor, Reached safety factor, bench array.*

дата першого надходження статті до видання	16.04.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	22.05.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.06.2026