

УДК 622.271.33

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271118.83.370

СРАВНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА

РОМАНЕНКО А. А., *маркшейдер карьера*

ПАО «ЦГОК», Кривой Рог, Днепропетровская обл., Украина, тел. +38 (0564) 409-63-43, e-mail: alexrom14@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8381-8873.

Аннотация. *Цель исследования* - сравнение коэффициента запаса устойчивости и интегрального показателя, полученного с помощью набора экспериментальных статистических данных по факторам влияния на массив горных пород, и сведение их к безразмерным показателям. *Изложение основного материала.* Приводится метод определения веса факторов на основе данных, полученных опытным путем. Для примера взят фактор сейсмического воздействия буровзрывных работ на устойчивость участков бортов карьера. Далее выполняется сравнение значений интегрального показателя и коэффициента запаса устойчивости для условий Ингулецкого карьера. Для того, чтобы интегральный показатель рассмотреть в сравнении с коэффициентом запаса устойчивости массива, необходимо привести их к единой шкале, взяв за утверждение, что состояние предельного равновесия при интегральном показателе наступает, когда его значение равно 0, а для коэффициента запаса устойчивости состояние предельного равновесия характеризуется значением 1. Так, для сравнения этих величин необходимо из коэффициента запаса устойчивости вычесть единицу. Теперь можно сказать, что и запас устойчивости примет состояние предельного равновесия, когда его значение будет равно нулю. *Научная новизна.* Впервые проведено сравнение интегрального показателя с коэффициентом запаса устойчивости борта карьера, что позволило выявить степень уточнения устойчивости борта за счет выполнения многофакторного анализа, который положен в основу определения интегрального показателя. *Выводы.* Вес каждого отдельного фактора необходимо рассматривать, определяя его влияние на базовый коэффициент запаса устойчивости; интегральный показатель позволяет уточнять величину устойчивости бортов карьеров на 6-15 %, но при высоком КЗУ эта величина может увеличиваться, поскольку КЗУ не имеет границ по приобретенному значению, а ИП ограничен приведенной величиной, поскольку для его получения используется метод приведения значений влияния разноплановых факторов до безразмерных величин, которые характеризуют участок (сектор) в целом.

Ключевые слова: *районирование; интегральный показатель; карьер; фактор; коэффициент запаса устойчивости*

ПОРІВНЯННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗНИКА І КОЕФІЦІЄНТА ЗАПАСУ СТІЙКОСТІ БОРТІВ КАР'ЄРУ

РОМАНЕНКО А. О., *маркшейдер карьера*

ПАТ «ЦГОК», Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., Україна, тел. +38 (0564) 409-63-43, e-mail: alexrom14@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8381-8873.

Анотация. *Мета дослідження* - порівняння коефіцієнта запаса стійкості й інтегрального показника, отриманого за допомогою набору експериментальних статистичних даних за такими чинниками впливу на масив гірських порід і зведення їх до безрозмірних показників. *Виклад основного матеріалу.* Наводиться метод визначення ваги фактів на основі даних, отриманих дослідним шляхом. Для прикладу взято факторів сейсмічного впливу буропідричних робіт на стійкість ділянок бортів кар'єра. Далі виконується порівняння значень інтегрального показника і коефіцієнта запаса стійкості для умов Інгулецького родовища. Для того, щоб інтегральний показник розглянути порівняно з коефіцієнтом запаса стійкості масиву, необхідно привести їх до єдиної шкали, узявши за твердження, що стан граничної рівноваги при інтегральному показнику настає, коли його значення дорівнює 0, а для коефіцієнта запаса стійкості стан граничної рівноваги характеризується значенням 1. Для порівняння цих величин необхідно від коефіцієнта запаса стійкості відняти одиницю, тобто тепер можна сказати, що і запас стійкості набуде стан граничної рівноваги, коли його значення буде дорівнювати нулю. *Наукова новизна.* Вперше проведено порівняння інтегрального показника з коефіцієнтом запаса стійкості борту кар'єру, що дозволило виявити ступінь уточнення стійкості борту за рахунок виконання багатофакторного аналізу, який покладено в основу визначення інтегрального показника. *Висновки:* вагу кожного окремого фактора необхідно розглядати, визначаючи його вплив на базовий коефіцієнт запаса стійкості; інтегральний показник дозволяє уточнювати величину стійкості бортів кар'єрів на 6-15 %, але за високого КЗС ця величина може збільшуватися, оскільки КЗС не має меж за набутими значеннями, а ИП обмежений наведеною величиною, оскільки для його отримання використовується метод зведення значень впливу різнопланових чинників до безрозмірних величин, які характеризують ділянку (сектор) у цілому.

Ключові слова: *районування; інтегральний показник; кар'єр; фактор; коефіцієнт запаса стійкості*

COMPARING INTEGRAL INDICATORS AND COTHE SAFETY FACTOR OF PIT'S SIDE

ROMANENKO A. O., *Surveyor of quarry*

Surveyor of quarry on watching for moving of rocks OJSC «TsGOK», Kryvyi Rig, Dnipropetrovsk region, Ukraine, phone. +38 (0564) 409-63-43, e-mail: alexrom14@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8381-8873.

Abstract. Purpose Comparing of the safety factor and the integral indicator obtained with the help of a set of experimental statistics on the factors influence on rock massif and their reduction to dimensionless indicators. **Statement of the main material.** The method for determining the weight of factors that basis on empirically obtained data is determined. For example, the seismic effect of drilling-blasting operations on the stability of the pit sections was taken. Further, the values of the integral indicator and the stability factor for the conditions of the Inguletskiy quarry are compared. In order to consider the integral indicator in comparison with the stability factor of the array, it is necessary to bring them to a single scale. Taking for the statement that the state of limiting balance with the integral indicator occurs when its value is 0, and for the stability factor, the state of limiting balance is characterized by a value of 1. So, to compare these quantities, we need to do the following, subtract one from the stability factor. Now we can say that the stability reserve will also take the state of limiting balance when it's value is 0. **Scientific novelty.** For the first time, the integral indicator was compared with the stability factor of the quarry's side, which made it possible to determine the refinement degree of the bead's stability due to the multifactorial analysis that is used as the basis for determining the integral indicator. **Conclusions:** the weight of each individual factor must be considered by determining its influence on the basic safety factor; the integral indicator allows us to clarify the stability of the quarries of quarries by 6-15%, but this value can be increased with a high RLD factor, because the RDL factor has no boundaries on the acquired value, and the integral indicator is limited by the reduced value, since it uses a method of reducing the influence of various factors up to dimensionless quantities, which characterize the sector as a whole.

Keywords: zoning; division into districts; integrated indicator; quarry; factor; stability inventory coefficient

Вступ. У процесі розв'язання задач оцінювання стійкості бортів кар'єрів виникає проблема ув'язки між собою різнопланових показників та їх урахування для такого оцінювання. Розроблення та проектування глибоких кар'єрів включає в себе з'ясування стану масиву, на який діють багато факторів, що ускладнює виконання максимально достовірного аналізу, який впливає на розрахунок основних параметрів відпрацювання родовища.

Урахування максимальної кількості факторів впливу допомагає не тільки визначити найбільш раціональні конструктивні параметри уступів і бортів кар'єрів, та, в деяких випадках, збільшити строки їх існування, а й забезпечити належний захист працівників.

Метою статті - проведення порівняння коефіцієнта запасу стійкості та інтегрального показника, отриманого за допомогою набору експериментальних статистичних даних щодо факторів впливу на масив гірських порід та зведення їх до безрозмірних показників.

Наукова новизна. Вперше проведено порівняння коефіцієнта запасу стійкості борту кар'єру з отриманими значеннями інтегрального показника, що дозволило

виявити ступінь уточнення стійкості борту за рахунок виконання багатофакторного аналізу, який покладено в основу визначення інтегрального показника.

Аналіз досліджень та публікацій. Стаття присвячена одному з напрямків розвитку в галузі геомеханіки, а саме – визначенню стійкості бортів глибоких кар'єрів на основі врахування різнопланових факторів.

Питанням визначення стійкості бортів кар'єрів займалось доволі багато вчених, і варіанти рішення цього питання знайшли відображення у працях: Г. Л. Фісенко, А. І. Арсентьева, А. В. Бішлопа, В. Феленіуса, В. В. Ржевського, А. Г. Шапара, Ю. І. Турінцева, П. С. Шпакова, Р. П. Окатова, А. І. Ільїна, Н. К. Звонарьова, Е. Л. Галустьяна та інших [3; 8-10].

Виклад основного матеріалу

У статті [2] проведено оцінювання варіації інтегрального показника.

Оскільки інтегральний показник включає в себе більш детальний механізм урахування впливу факторів, можна визначити величину уточнення надійності отриманих результатів, порівнявши інтегральний показник зі значеннями коефіцієнту запасу стійкості.

Для визначення інтегрального показника використовувались дані натурних спостережень за кожним фактором. Із застосуванням методики [1] фактори зводяться до безрозмірних величин із використанням ваги факторів. Вага кожного фактора визначається для кожного родовища і його гірничо-геологічних умов окремо, виходячи з відношення коефіцієнта запасу стійкості (КЗС) борту без урахування впливу фактора і КЗС з урахуванням впливу фактора. Так, на прикладі буропідричних робіт розглянемо визначення впливу фактора на стійкість масиву в його процентному відношенні.

Спочатку знаходимо коефіцієнт запасу стійкості без урахування впливу сейсмічної дії вибуху, використовуючи гіпотезу Кулона – Мора, відповідно до якої міцність гірської породи на зрушення визначається з виразу (1), а сили, що зрушують, при врахуванні тільки гравітаційних сил, з виразу (2) [4].

$$F_{ym} = \sum_{j=1}^n (\gamma_j h_j \cos \varphi_j) \operatorname{tg} \rho_j + \sum_{j=1}^n C_j \ell_j, \quad (1)$$

$$F_{zp} = \sum_{j=1}^n (\gamma_j h_j \sin \varphi_j), \quad (2)$$

де, γ_j – питома вага породи в межах розрахункового блока, H/m^2 ; h_j – висота розрахункового блока, м; ℓ_j – довжина поверхні ковзання в межах окремого розрахункового блока, м; φ_j – кут між горизонталлю й дотичною до кривої в точці, що є серединою основи розрахункового блока, градуси; C_j – молекулярне зчеплення в межах даного розрахункового блока, Па; ρ_j – кут внутрішнього тертя в межах даного розрахункового блока, градуси.; n_j – кількість розрахункових блоків, на які розбивається призма зрушення, шт.

Для обчислень за формулами (1) і (2) утримувальні та зрушуючі сили розраховуються з урахуванням геологічної й літологічної структури породного масиву [5; 6].

Вибір конкретної розрахункової схеми залежить від прийнятої форми ймовірної поверхні зрушення (круглоциліндрична,

еліптична, спіральна і т. д.), методу додавання поверхневих і об'ємних сил, які діють по ймовірній поверхні зрушення, форми поверхні породних відкосів (опукла, увігнута, прямолінійна), а коефіцієнт запасу стійкості визначається через відношення сил утримувальних до сил зрушуючих (3), що діють у масиві, обмеженому поверхнею зрушення [8-10]:

$$\eta_3 = \frac{\sum_{j=1}^n (\gamma_j h_j \cos \varphi_j) \operatorname{tg} \rho_j + \sum_{j=1}^n C_j \ell_j}{\sum_{j=1}^n (\gamma_j h_j \sin \varphi_j)} \quad (3)$$

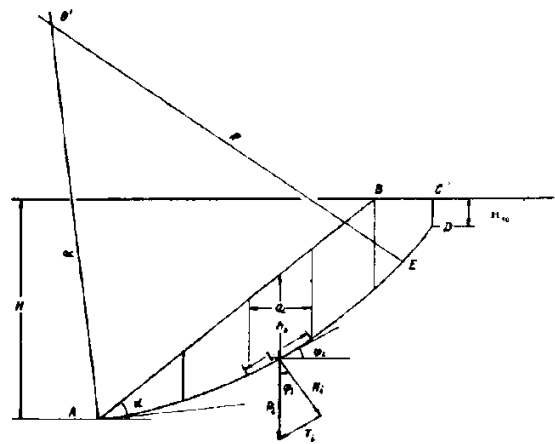


Рис. 1. Розрахункова схема до методу алгебраїчного додавання сил покриволінійної поверхні зрушення / The calculation scheme to the algebraic addition of forces method of on the curvilinear surface of the shift

Таким чином визначено базовий КЗС без урахування дії вибуху на масив. Далі розглянемо зрушуючі сили, що виникають за сейсмічного впливу вибуху на масив, тобто сейсмічні сили. Під сейсмічними силами розуміється силовий вплив на гірські породи сейсмічних хвиль, які викликають коливання породного масиву й чисельно можуть характеризуватися максимальним прискоренням коливань частинок гірської породи.

У відповідності із другим законом Ньютонa, максимальне прискорення a_i формує величину максимальної сили інерції F_i , яка діє наоколіснн частинки гірської породи:

$$F_i = - m_i \cdot a_i, \quad (4)$$

де m_i – маса коливної коливної частини породного масиву, кг.

Розподіл векторів прискорень під час сейсмічних коливань у породних масивах прийнято як хаотичний. У зв'язку із цим, для визначення напрямку вектора сили інерції обрано найбільш несприятливо напрямлений вектор з погляду стійкості породного укосу, а саме по дотичній до ймовірної поверхні зрушення у бік виробленого простору (рис. 2).

Виходячи з вищевикладеного, величина зрушуючих сил, що діє по ймовірній поверхні зрушення, визначається з аналітичного виразу (5), а коефіцієнт запасу стійкості η_3 , з урахуванням сейсмічного впливу масових вибухів – із формули (6):

$$\sum F_{зруш} = \sum_{i=1}^N m_i g \sin \beta_i + \sum_{i=1}^N m_i a_i, \quad (5)$$

$$\eta_{3(с)} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i g \cos \beta_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^N C_i l_i}{\sum_{i=1}^N m_i g \sin \beta_i + \sum_{i=1}^N m_i a_i}. \quad (6)$$

Фактичне прискорення сейсмічних коливань часток гірської породи перебуває з величиною наведеного заряду ВР у такій залежності:

$$a_\phi = k_a \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{q}}{r} \right)^{n_a}, \quad \text{м/с}^2, \quad (7)$$

де a_ϕ – фактичне прискорення сейсмічних коливань породи, м/с²;

q – маса ВР, що припадає на ступінь уповільнення, кг;

r – відстань від масового вибуху до спостереження, м;

k_a, n_a – емпіричні коефіцієнти.

Математичний вираз для визначення коефіцієнта запасу стійкості породного укосу з урахуванням сейсмічного впливу масових вибухів:

$$\eta_{3(с)} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i g \cos \beta_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^N C_i l_i}{\sum_{i=1}^N m_i g \sin \beta_i + \sum_{i=1}^N m_i k_a \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{q}}{r} \right)^{n_a}}. \quad (8)$$

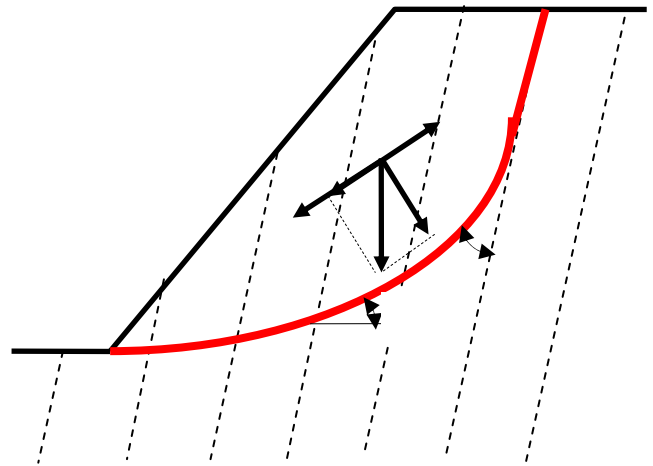


Рис. 2. Схема до розрахунків стійкості борту кар'єру за наявності крутонападаючих поверхонь ослаблення й сил інерції/ Scheme to calculate the stability of a career board in the presence of steep sloping surfaces and forces of inertia

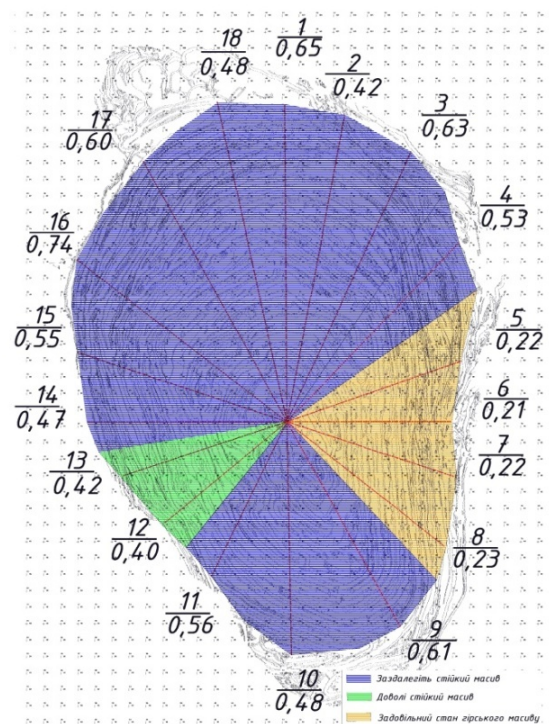


Рис.3. Районування за інтегральним показником/ Arrangement by integral indicator

Установлено, що за масових вибухів у кар'єрах коефіцієнт запасу стійкості відкритих гірничих виробок знижується пропорційно збільшенню маси заряду ВР, що припадає на ступінь уповільнення.

Відсоток впливу фактора буропідричних робіт на масив визначається як:

$$\Phi_{\text{бвр}} = \frac{\eta_3 - \eta_{3(с)}}{\eta_3}. \quad (9)$$

Таким чином знаходиться відсоток впливу кожного фактора на стійкість борту для умов родовища, яке досліджується.

Щоб інтегральний показник розглянути порівняно з коефіцієнтом запасу стійкості масиву, необхідно звести їх до єдиної шкали, узявши за твердження, що стан граничної рівноваги за інтегрального показника настає, коли його значення дорівнює 0, а для коефіцієнта запасу стійкості стан граничної рівноваги характеризується значенням 1. Тобто для порівняння цих величин необхідно, від коефіцієнта запасу стійкості відняти одиницю. Тепер можна сказати, що і запас стійкості набуде стану граничної рівноваги, коли його значення буде дорівнювати нулю.

Для умов Інгулецького кар'єру обчислимо величину уточнення визначення стійкості бортів кар'єру за рахунок використання інтегрального показника (рис. 1), який об'єднує в собі такі фактори: фактор стійкості (оснований на визначенні

загальної стійкості масиву за рахунок коефіцієнта запасу стійкості), фактор впливу буропідричних робіт (критерієм оцінки є визначення сейсмічного впливу вибуху на масив гірських порід), фактор тріщинуватості (фрактальна розмірність тріщин, їх направленість, густина), фактор об'ємної геометрії (визначення кривизни борту кар'єру в плані та знаходження найбільш стійких ділянок та введення поправки до можливого кута нахилу борту), фактор впливу шахтних виробок (наявність відпрацьованого простору в межах окремої зони кар'єрного поля).

Для цього, застосовуючи методологію зведення безрозмірних величин до єдиної шкали, описану в [1] знаходимо зведені значення інтегрального показника (ІП) та коефіцієнта запасу стійкості (КЗС) і визначаємо різницю між зведеним інтегральним показником і КЗС у відсотках (таблиця).

Таблиця

*Визначення відсотка уточнення КЗС через уведення інтегрального показника /
Determination of therefinement percentage of SF through the introduction of the integral indicator*

№ сектора	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ІП (чистий)	0,65	0,42	0,63	0,53	0,22	0,21	0,22	0,23	0,61
ІП (зведений)	1,38	0,87	1,32	1,12	0,47	0,45	0,47	0,49	1,28
КЗС (чистий)	1,50	1,15	1,14	0,93	0,38	0,34	0,36	0,39	1,47
КЗС (зведений)	1,63	1,25	1,24	1,01	0,41	0,37	0,39	0,42	1,60
Δ (ІП-КЗС)	-0,25	-0,38	0,08	0,11	0,06	0,08	0,08	0,06	-0,31
Відсоток зміни ІП відносно КЗС	-18,31	-43,03	6,08	9,76	12,43	17,37	17,20	12,73	-24,39
№ сектора	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ІП (чистий)	0,48	0,56	0,40	0,42	0,47	0,55	0,74	0,60	0,48
ІП (зведений)	1,01	1,18	0,84	0,88	0,98	1,15	1,55	1,27	1,01
КЗС (чистий)	1,09	1,11	0,67	0,68	0,70	0,93	1,28	1,03	1,26
КЗС (зведений)	1,18	1,21	0,73	0,74	0,76	1,01	1,39	1,12	1,37
Δ (ІП-КЗС)	-0,17	-0,03	0,11	0,14	0,22	0,14	0,16	0,15	-0,36
Відсоток зміни ІП відносно КЗС	-16,78	-2,22	12,97	16,28	22,61	12,13	10,40	11,84	-35,38

У середньому інтегральний показник відрізняється від КЗС на 6-15 %, але у секторах, де ведеться інтенсивне розкриття нових горизонтів, що впливає на стійкість масиву, ця різниця може становити і значно більше. Для умов Інгулецького кар'єру такими ділянками стали: 1, 2, 9, 18-й сектори. Але зараз ці ділянки перебувають у стійкому стані і не становлять загрози через виникнення на них деформаційних процесів.

Висновки: Вагу кожного окремого фактора необхідно розглядати, визначаючи

його вплив на базовий коефіцієнт запасу стійкості; інтегральний показник дозволяє уточнювати стан стійкості бортів кар'єрів на величину 6-15 %, але за високого КЗС ця величина може збільшуватись, оскільки КЗС не має меж за набутих значенням, а ІП є обмеженою зведеною величиною тому, що для його отримання використовується метод зведення безрозмірних величин і він є характеристикою певної ділянки (сектора) в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методика районування та оцінки стану бортів в межах кар'єрного поля за факторами стійкості. – Кривий Ріг, 2013. – 26 с.
2. Романенко А. А. Оценка вариации значений интегрального показателя коэффициента запаса устойчивости бортов глубоких карьеров / А. А. Романенко // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 92. – С. 109–113. – (Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве).
3. Bishop Alan W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes / Alan W. Bishop // Geotechnique. – 1955. – Vol. 5, iss. 2. – P. 7–17.
4. Bishop A. W. Stability Coefficients for Earth Slopes / A. W. Bishop, Norbert Morgenstern // Geotechnique. – 1960. – Vol. 10, iss. 4. – P. 129–153.
5. Chowdhury R. N. Slope Analysis / R. N. Chowdhury. – Amsterdam : Elsevier, 1978. – 422 p. – (Developments in geotechnical engineering. – Vol. 22.).
6. Fellenius W. Calculation of the Stability of Earth Dams / W. Fellenius // Transactions of the second International Congress on Large Dams. – Washington, 1936. – Vol. 4. – P. 445–462.
7. Khajehzadeh Mohammad. Opposition-based firefly algorithm for earth slope stability evaluation / Mohammad Khajehzadeh, Mohd Raihan Taha, Mahdiyeh Eslami // China Ocean Engineering. – 2014. – Vol. 28, iss. 5. – P. 713–724.
8. Moore P. J. The Factor of Safety against Undrained Failure of a Slope / P. J. Moore // Soils and Foundations. – 1970. – Vol. 10, iss. 3. – P. 81–91.
9. Singh Rajesh. Stability evaluation of road-cut slopes in the Lesser Himalaya of Uttarakhand, India: conventional and numerical approaches / Rajesh Singh, R. K. Umrao, T. N. Singh // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2014. – Vol. 73, iss. 3. – P. 845–857.
10. Travis Quentin B. Meta-Analysis of 301 Slope Failure Calculations. I: Database Description / Quentin B. Travis, Mark W. Schmeeckle, David M. Sebert // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2011. – Vol. 137, iss. 5. – P. 453–470.

REFERENCE:

1. *Metodika rayonuvannia ta otsinky stanu bortiv v mezhakh kariernogo polia za faktorami stiikosti*. [Methodics of zoning and estimation of state of side at border of quarry area for factors of strength]. Kryvyi Rig, 2013, 26 p. (in Ukrainian).
2. Romanenko A.A. *Otsenka variatsii znacheniya integralnogo pokazatelya koeffitsienta zapasa ustoychivosti bortov glubokikh karierror* [Estimation of variation of value of integrated indicator of factor, stability inventory coefficient]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Material science, Engineering]. Dnepropetrovsk, 2016, iss. 92, pp. 109–113. (in Russian).
3. Bishop Alan W. *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. Geotechnique. 1955, vol. 5, iss. 2, pp. 7–17.
4. Bishop A.W. and Norbert Morgenstern *Stability Coefficients for Earth Slopes*. Geotechnique. 1960, vol. 10, iss. 4, pp. 129–153.
5. Chowdhury R. N. *Slope Analysis*. Developments in geotechnical engineering. Amsterdam: Elsevier, 1978, vol. 22, 422 p.
6. Fellenius W. *Calculation of the Stability of Earth Dams*. Transactions of the second International Congress on Large Dams. Washington, 1936, vol. 4, pp. 445–462.
7. Khajehzadeh Mohammad, Mohd Raihan Tah and Mahdiyeh Eslami *Opposition-based firefly algorithm for earth slope stability evaluation*. China Ocean Engineering. 2014, vol. 28, iss. 5, pp. 713–724.
8. Moore P.J. *The Factor of Safety against Undrained Failure of a Slope*. Soils and Foundations. 1970, vol. 10, iss. 3, pp. 81–91.
9. Singh Rajesh, Umrao R.T. and Singh T.N. *Stability evaluation of road-cut slopes in the Lesser Himalaya of Uttarakhand, India: conventional and numerical approaches*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2014, vol. 73, iss. 3, pp. 845–857.
10. Travis Quentin B., Schmeeckle Mark W and Sebert David M. *Meta-Analysis of 301 Slope Failure Calculations. I: Database Description*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2011, vol. 137, iss. 5, pp. 453–470.

Рецензент: Савицький М. В., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 21.09.2018 р.