

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДВАЛІВ В УМОВАХ ВИСОКОЇ ВОДОНАСИЧЕНОСТІ М'ЯКИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Павличенко А. В., Адамчук А. А., Шустов О. О., Анісімов О. О.

Об'єктом дослідження є параметри стійкості масиву одноярусного відвалу м'яких порід розкриву з підтопленням укосом при формуванні його екскаватором-драглайном. Одним з найбільш проблемних місць є визначення безпечної відстані встановлення екскаватора-драглайна від верхньої бровки укосу в умовах формування одноярусного відвалу м'яких порід розкриву, підтопленого водою.

Розрахунок ширини призми можливого зрушення здійснювався за допомогою програмного забезпечення Rocscience Slide, яка із урахуванням параметрів укосу та фізико-механічних властивостей гірського масиву в автоматичному режимі відбудовує низку криволінійних поверхонь ковзання для окремих коефіцієнтів запасу стійкості. Отримані дані оброблені за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel, завдяки якому методом найменших квадратів побудовані графіки функцій ширини призми можливого зрушення від висоти ярусу відвалу м'яких порід розкриву та рівня його підтоплення.

Для умов формування одноярусного відвалу м'яких порід розкриву висотою 40–100 м та рівнем підтоплення 0–30 м розраховано ширину призми можливого зрушення для поверхонь ковзання із коефіцієнтом запасу стійкості 1 та 1,2. Ці значення складають відповідно 0–85,9 м та 0–122,6 м у встановлених розрахунком межах та залежно від методу побудови криволінійних поверхонь. Відстань між точками перетину горизонтальної поверхні ярусу з криволінійними поверхнями ковзання із коефіцієнтом запасу стійкості 1 та 1,2 складає 16–52,5 м. Встановлені залежності ширини призми можливого зрушення (a) від висоти ярусу відвалу м'яких порід розкриву (H_o) та рівня його підтоплення (H_w) із урахуванням фізико-механічних властивостей відсипаного гірського масиву, в тому числі насиченого водою. Мінімальне відхилення від вихідного значення координат точок досягається при встановленні в якості лінії тренду полінома другого ступеня для функції $a=f(H_w)$, а для $a=f(H_o)$ – прямої.

Отримані дані розрахунку параметрів призми можливого зрушення дозволяють припустити можливість формування одноярусного відвалу м'яких порід розкриву висотою 40–60 м із розвантаженням гірничої маси у вироблений простір і 70–100 м із привантаженням нею нестійкої частини укосу екскаватором-драглайном ЕК-11/70 (Новокраматорський машинобудівний завод, Україна).

Ключові слова: відвал м'яких порід розкриву, призма можливого зрушення, фізико-механічні властивості, Rocscience Slide, коефіцієнт запасу стійкості.

1. Вступ

Відвалоутворення є важливим і невід'ємним процесом відкритої розробки родовищ корисних копалин. Залежно від умов залягання родовища технологія відвалоутворення змінюється. Так, розробка крутоспадних родовищ супроводжується утворенням зовнішніх відвалів скельних порід розкриву, які розташовуються, як правило, поблизу кар'єрів або віддалено від них на відстані більше 5 км [1]. Тоді як при розробці пологих родовищ можливе утворення відвалу м'яких порід розкриву безпосередньо у відпрацьованому внутрішньокар'єрному просторі при посуванні фронту гірничих робіт [2].

Утворення внутрішнього відвалу м'яких порід розкриву можливо із застосуванням безтранспортної, транспортно-відвальної, транспортної та комбінованої систем розробки родовища. Розробка родовища за безтранспортною системою обмежене висотою розкривного уступу до 40–45 м залежно від схеми управління відвалами [3]. Транспортно-відвальна система передбачає спорудження відвалоутворювача та/або транспортно-відвального мосту, що пов'язано з потребою в значних капітальних інвестиціях. При транспортній системі розробки переміщення порід розкриву в вироблений простір здійснюється конвеєрним, залізничним або автомобільним транспортом, а також їх комбінаціями. Для ведення відвалоутворення при транспортуванні порід розкриву конвеєрами застосовують відвалоутворювачі, а при залізничному та автомобільному транспорті – екскаватори-мехлопати, або екскаватори-драглайни.

Застосування транспортної системи, зокрема автосамоскидів в комплексі із екскаваторами-мехлопатами та екскаваторами-драглайнами, пов'язане із більшими поточними витратами, але меншими капітальними. Окрім того, характерними рисами транспортної системи є наявність транспортних комунікацій, можливість інтенсифікації підготовки до виймання запасів корисної копалини, розосередженість гірничих робіт та незалежність розкривних робіт від видобувних [3].

Наприклад, потужність порід розкриву кар'єрів України, які розробляли пологі родовища, складає в середньому:

- Нікопольського марганцеворудного басейну – 55,7 м [4];
- Дніпровського буровугільного басейну – 53,7 м [5] (зокрема Морозівський буровугільний розріз – 83 м, Костянтинівський – 78,5 м);
- Предкарпатського сірконосного басейну – 70–75 м (північної частини Роздільського родовища – 50,7 м) [6, 7].

Тому їх реконструкція може бути пов'язана лише із комбінованою або транспортною системами розробки пологого родовища.

Переважна більшість кар'єрів із пологим заляганням покладу корисної копалини перестали експлуатуватися. Утворені відкритими гірничими роботами виробки заповнилися водою. Реконструкція цих кар'єрів пов'язана із потребою у значній кількості інвестицій, які на віддалену перспективу можуть не окупитися. Тому, натеper, трендом в науково-практичних розробках має бути мінімізація капітальних вкладень, в тому числі шляхом зменшення кількості задіяного гірничого обладнання.

На думку автора роботи [8], м'які породи розкриву характеризуються великими міжзерновими порожнечами, нестійкою структурою та високою

сприйнятливостю до зовнішніх факторів, зокрема до змін вмісту води. Проведені дослідження дозволили оцінити вплив вмісту води на зміну параметрів стійкості та характер напружено-деформованого стану відвального масиву. Збільшення вмісту води сприяє пластичним деформаціям відвального масиву і при відносно невеликих навантаженнях міжкристалітні порожнечі зтягуються, пористість сильно знижується, а ущільнення збільшується.

Проектування та планування відвалів є найважливішими елементами ефективного планування гірничих робіт, особливо на великомасштабних кар'єрах [9]. Капітальні та транспортні витрати на інфраструктуру значні з самого початку гірничого проекту та протягом усього терміну служби кар'єру, оскільки ці відвали поступово перетворюються на величезні споруди. Визначені темпи видобутку, а також певні просторові та фізичні обмеження забезпечують набір параметрів математичного та економічного взаємозв'язку, що створює можливості для моделювання і тим самим полегшує вимірювання та оптимізацію кінцевої конструкції відвалу з використанням програмних і емпіричних методів при досягненні економічних цілей.

Вирішення цих задач можливо шляхом керування висотою відвалу. Тому для можливості зменшення парку гірничого обладнання для утворення внутрішніх відвалів необхідно мати знання про зміну ширину призми можливого зрушення в залежності від висоти відвалу та рівня його підтоплення.

Таким чином, *об'єктом дослідження* обрано параметри стійкості масиву одноярусного відвалу м'яких порід розкриву з підтопленням укосом при формуванні його екскаватором-драглайном. *А мета роботи* полягає в розрахунку ширини призми можливого зрушення при утворенні екскаватором-драглайном одноярусного відвалу м'яких порід розкриву з підтопленням укосом із урахуванням фізико-механічних властивостей гірських порід. В тому числі, в умовах їх високої водонасиченості, а також висоти ярусу відвалу та рівня його затоплення водою.

2. Методика проведення дослідження

Виходячи із наведених вище даних, для побудови моделі укосу ярусу внутрішнього відвалу м'яких гірських порід приймаємо його висоту 40–100 м із кроком 10 м, а рівень його затоплення 0–30 м. Розглядати більший рівень затоплення не має сенсу, так як при глибині водойми більше 20–30 м неможлива розробка пологого родовища.

В м'яких породах розкриву присутні особливі молекулярні та водно-колоїдні зв'язки, які діють при зближенні часток до 0,004 мм. Під їх впливом до частки притуляється шар молекулярно зв'язаної води товщиною в декілька молекул. Далі іде шар пухко зв'язаної води, який огортає кожен частку, а далі вільна парова вода [8]. Тому фізико-механічні властивості масиву м'яких порід розкриву, а саме кут внутрішнього тертя (ρ , град) та зчеплення (K , кПа) залежать від вологості (W , %) (рис. 1).

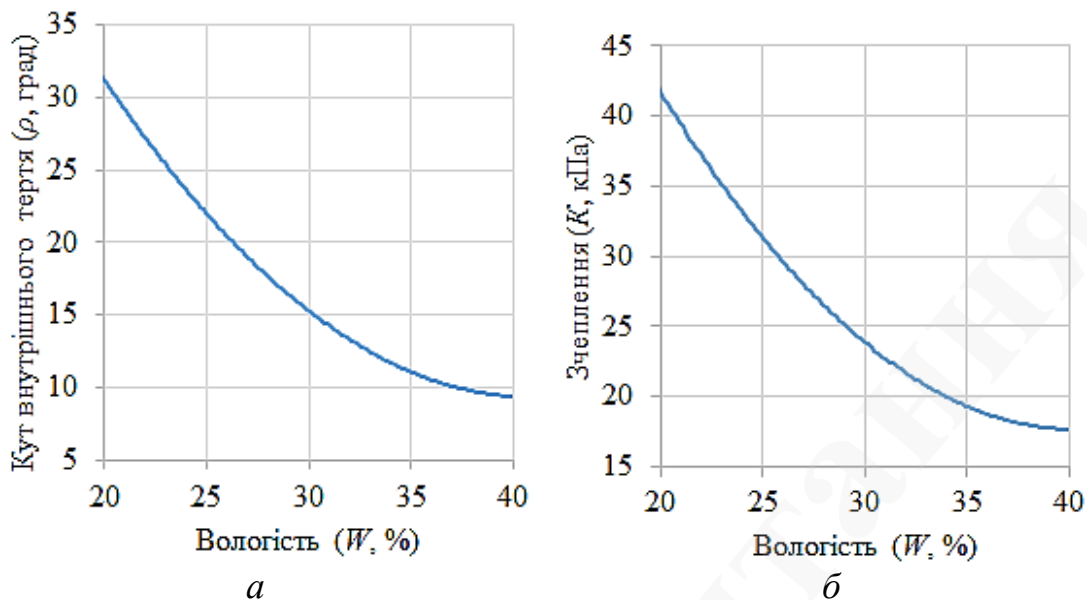


Рис. 1. Залежність: *a* – кута внутрішнього тертя ρ , град та *б* – зчеплення K , кПа від вологості м'яких порід W , % [10]

Емпіричні залежності кута внутрішнього тертя (ρ , град) та зчеплення (K , кПа) від вологості м'яких порід (W , %) мають наступний вигляд:

$$\rho = 0,05W^2 - 4,1W + 93, \quad (1)$$

$$K = 0,058W^2 - 4,7W + 112,3. \quad (2)$$

Таким чином, із урахуванням попереднього досвіду подібних розрахунків приймаємо наступні фізико-механічні властивості масиву м'яких порід розкриву: об'ємна вага – $20,6 \text{ кН/м}^3$, зчеплення – 44 кПа , кут внутрішнього тертя – 21° . Породи відсипані у відвал у підводній частині: об'ємна вага – $20,0 \text{ кН/м}^3$, зчеплення – 22 кПа , кут внутрішнього тертя – 18° [11]. Кут природнього укосу масиву м'яких порід приймаємо 35° [12].

3. Результати дослідження та обговорення

Розрахунок ширини призми можливого зрушення здійснюється за допомогою програмного забезпечення Rocscience Slide (рис. 2).

Суть дії програми Slide полягає у тому, що:

- відбудовується розріз розрахункового масиву;
- вносяться дані про фізико-механічні властивості порід;
- визначається положення квадрату, в якому розташовуються центри

радіусів криволінійних поверхонь ковзання, по яким програма обчислює коефіцієнти запасу стійкості відповідно до всіх точок центрів і радіусів та вказує на найменший показник. Далі обирається поверхня ковзання із шуканим коефіцієнтом запасу стійкості, яка розташована якнайдалі від укосу ярусу. Після чого визначається ширина призми можливого зрушення (відстань між точкою перетину обраної поверхні ковзання та верхньою брівкою укосу ярусу). Отримані дані заносяться в табл. 1.

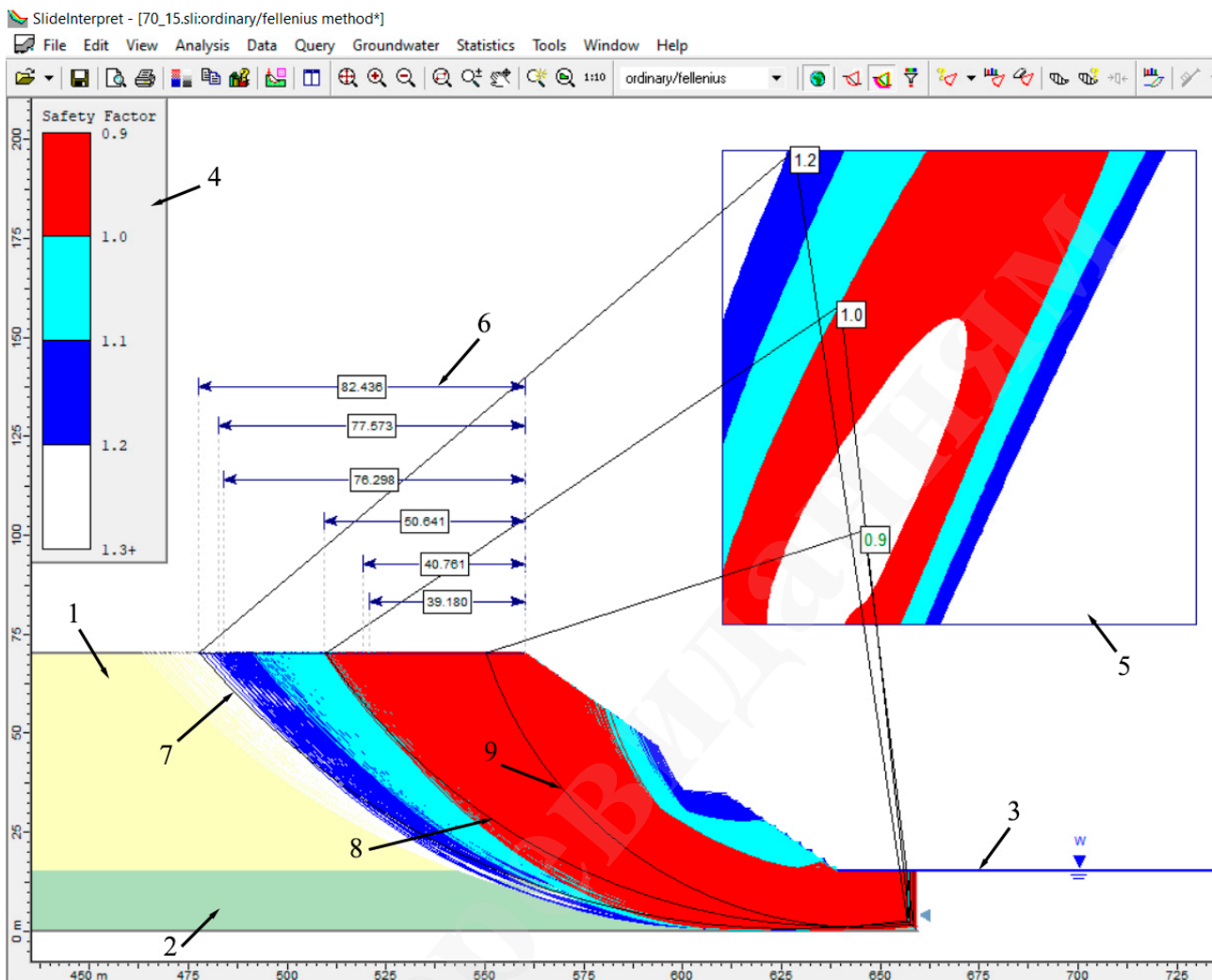


Рис. 2. Приклад розрахунку ширини призми можливого зрушення укосу відвалу м'яких порід розкриття висотою 70 м, рівнем підтоплення 15 м в програмі Slide: 1 – необхідна частина укосу; 2 – обводнена частина укосу; 3 – рівень підтоплення; 4 – легенда, що відображає межі значень коефіцієнтів запасу стійкості (Safety Factor); 5 – квадрат, в якому розташовуються центри радіусів криволінійних поверхонь ковзання; 6 – розмірні лінії ширини призми можливого зрушення; 7 – поверхня ковзання із коефіцієнтом запасу стійкості $K_y=1,2$; 8 – поверхня ковзання із коефіцієнтом запасу стійкості $K_y=1$; 9 – поверхня ковзання із найменшим показником коефіцієнту запасу стійкості

Таблиця 1

Результати розрахунку ширини призми можливого зрушення в програмі Slide

№ моделі	Висота ярусу, H_o , м	Рівень підтоплення, H_w , м	Ширина призми можливого зрушення					
			при $K_y=1-a_{1,2}$, м			при $K_y=1,2-a_{1,2}$, м		
			Метод Бішопа	Метод Філеніуса	Метод Спенсера	Метод Бішопа	Метод Філеніуса	Метод Спенсера
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
1	40	0	0	0	0	16	22,3	16,2
2	40	5	0	0	0	30,2	35	30,2
3	40	10	0	0	0	31,4	36,8	31

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	40	15	0	0	0	20,7	30,5	23,3
5	40	20	0	0	0	0	18,8	0
6	40	25	0	0	0	0	0	0
7	40	30	0	0	0	0	0	0
8	50	0	0	0	0	34,1	38,8	33,2
9	50	5	8,6	23,2	12,9	45,1	50,1	45
10	50	10	10,5	26,7	12,4	45,7	52,6	47,7
11	50	15	10,7	23	10,4	44,9	51,5	45,3
12	50	20	0	0	0	37,5	46,4	37,7
13	50	25	0	0	0	23	35,4	23,9
14	50	30	0	0	0	0	0	0
15	60	0	0	21,6	0	48,2	53,5	48,2
16	60	5	25,4	36,3	26,6	58,2	64,2	58,8
17	60	10	28,3	39,2	29,2	61,8	68,2	62,5
18	60	15	25,6	37,9	26,6	61,4	68,4	61,4
19	60	20	10,5	31,9	15,5	57,8	65,5	57,8
20	60	25	0	22,8	0	50	59,5	50,8
21	60	30	0	10,3	0	37,3	49,5	37,7
22	70	0	25,5	34,8	25,2	61,1	67,5	61,1
23	70	5	36,1	45,9	37,5	72,1	79,8	72,1
24	70	10	40,7	50,6	40,8	76,2	82,4	76,3
25	70	15	39,2	50,7	40,7	76,3	82,4	77,6
26	70	20	34,8	47,5	36,1	74,1	82,4	75,5
27	70	25	25,8	42,5	27,3	69,5	79,8	69,5
28	70	30	9,9	32,8	13,8	62,4	72,9	62,4
29	80	0	38,6	46,5	40	74,9	80,9	74,1
30	80	5	46,5	56,1	46,5	85,6	94,1	85,6
31	80	10	50,3	61,8	51,8	90,2	94,2	90,2
32	80	15	52	61,8	53,4	91,1	94,1	91,1
33	80	20	49,9	61,8	51,3	90,1	94,2	90,1
34	80	25	43,6	57,9	44,8	87,3	94,1	87,3
35	80	30	34,5	52	36	82,4	92,7	82,4
36	90	0	50,3	57,9	50,3	86,8	95,4	86,8
37	90	5	56,2	67,1	56,7	98,1	105,9	99,7
38	90	10	61,5	71,5	62	102,6	105,9	104,2
39	90	15	63,5	73,5	63,5	105,9	105,9	105,9
40	90	20	62	73,7	63,8	106	107,3	106
41	90	25	58,2	71,5	59,8	102,5	107,3	102,5
42	90	30	51,1	67,1	52,6	98,1	106	99,8
43	100	0	60	68,5	60	99,3	107,9	99,3
44	100	5	66	77,2	66,7	112,1	117,7	112,8
45	100	10	71,2	81,6	71,6	116	117,8	117,8
46	100	15	74,1	85,3	74,5	117,6	118,3	117,6
47	100	20	74,1	85,9	74,9	117,7	121	117,7
48	100	25	72,2	84,6	72,9	117,6	122,6	117,6
49	100	30	67,7	81,6	68,5	115,8	121	115,8

Величину значення ширини призми можливого зрушення $a_{1,2}$ при $K_y=1,2$ розраховуємо для можливості визначення відстані встановлення екскаватора-драглайна від верхньої брівки укосу ярусу відвалу м'яких порід, згідно із нормативними вимогами безпеки роботи гірничого обладнання. На частині укосу ярусу відвалу м'яких порід розкриву із коефіцієнтом запасу стійкості менше $K_y=1$ відбуватимуться процеси деформації гірського масиву. Розрахунок ширини призми можливого зрушення для криволінійних поверхонь із коефіцієнтом запасу стійкості $K_y=1$ дозволить обґрунтувати доцільність використання екскаваторів-драглайнів при формуванні одноярусного відвалу м'яких порід розкриву у режимі керованих деформацій [13].

Ґрунтуючись на отриманих даних розрахунку ширини призми можливого зрушення в програмі Excel створюємо окремо для кожного значення висоти укосу одноярусного відвалу масиви точок, абсцисами яких є рівень підтоплення укосу водою, а ординатами ширина призми можливого зрушення. Через утворені точки проводиться лінія тренду, яка будується методом найменших квадратів в автоматичному режимі. Для отриманої лінії тренду отримуємо рівняння функції, що описує шукану залежність ширини призми можливого зрушення від висоти ярусу відвалу та рівня його підтоплення.

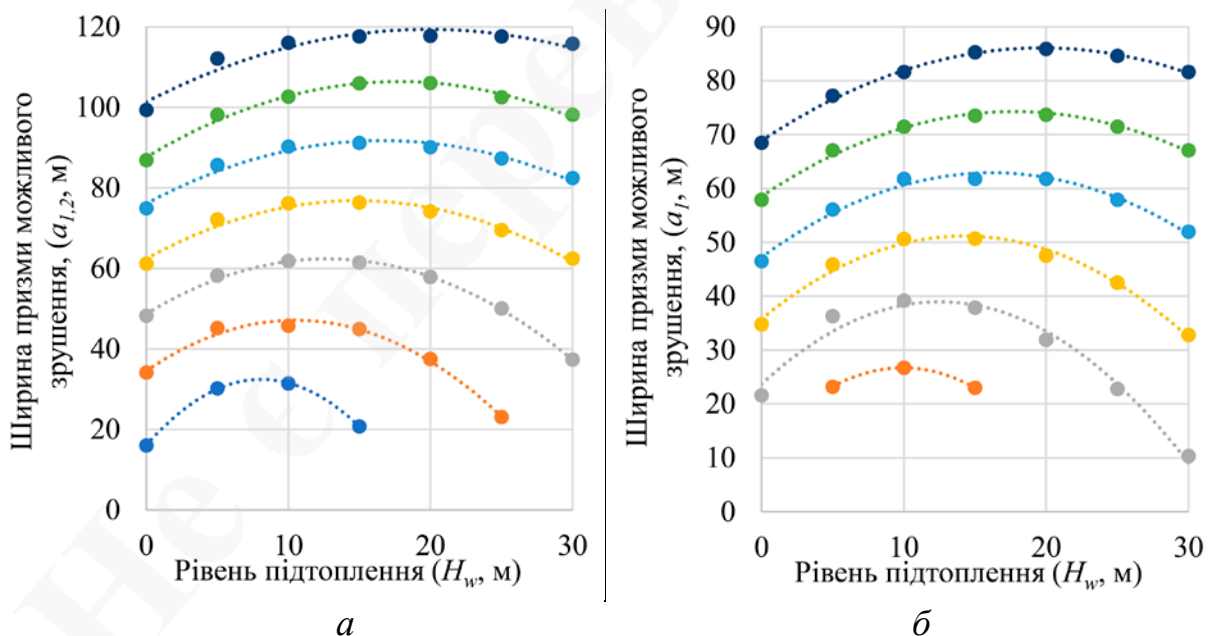


Рис. 3. Графіки залежності ширини призми можливого зрушення від: a – висоти ярусу відвалу м'яких порід та $б$ – рівня його підтоплення

Отримані функції $a_{1,2}=f(H_w)$ і $a_1=f(H_w)$ у встановлених межах мають квадратичну залежність, а $a_{1,2}=f(H_o)$ і $a_1=f(H_o)$ – лінійну із величиною достовірності апроксимації близької до 1. При чому зі збільшенням висоти ярусу відвалу зростає ширина призми можливого зрушення, а при збільшенні рівня підтоплення укосу вона спочатку зростає, а після досягнення значення $H_w=0,2-0,3H_o$ зменшується.

Відстань між точками перетину горизонтальної поверхні ярусу з криволінійними поверхнями ковзання із коефіцієнтом запасу стійкості 1 та 1,2 складає 16–52,5 м. При чому це значення для укусу, який не підтоплений водою, складає 16–48,2 м, а якщо виключити значення, де $a_I=0$ м, то 32,7–39,4 м.

4. Висновки

Отримані дані розрахунку параметрів призми можливого зрушення дозволяє припустити можливість формування одноярусного відвалу м'яких порід розкриття висотою 40–60 м із розвантаженням гірничої маси у вироблений простір і 70–100 м із привантаженням нею нестійкої частини укусу екскаватором-драглайном ЕК-11/70 (Новокраматорський машинобудівний завод, Україна).

Наявність поверхонь ковзання із коефіцієнтом запасу стійкості меншим за $K_y=1$ свідчить про можливість виникнення процесів деформації укусу зі сторони виробленого внутрішньокар'єрного простору. Для обґрунтування доцільності формування одноярусного високого відвалу м'яких порід розкриття екскаватором-драглайном в наступних працях слід комплексно дослідити характер цих деформацій у зв'язку із технологією відвалоутворення в режимі керованих деформацій.

Література

1. Dryzhenko, A. Yu., Adamchuk, A. A., Tamuia, S. A., Telnov, V. H. (2018). Doslidzhennia parametriv vnutrishnikh vidvaliv u vyroblenomomu prostori vidpratsovanykh hlybokyykh karieriv. *Zbirnyk Naukovykh Prats Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 53, 56–65. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2018_53_8
2. Drizhenko, A. Iu. (2011). *Karernye tekhnologicheskie gornotransportnye sistemy*. Dnepropetrovsk: NGU, 542.
3. Novozhilov, M. G., Khokhriakov, V. S., Pchelkin, G. D., Eskin, V. S.; Novozhilov, M. G. (Ed.) (1971). *Tekhnologiya otkrytoi razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. Chast 2. Tekhnologiya i kompleksnaia mekhanizatsiya otkrytykh razrabotok*. Moscow: Nedra, 552.
4. Lozhnikov, A. V., Adamchuk, A. A. (2017). Issledovanie vliianiia ispolzovaniia krutonaklonnykh konveierov na effektivnost rekultivatsionnykh rabot pri razrabotke pologikh mestorozhdenii. *Zbirnyk Naukovykh Prats Natsionalnoho Girnichogo Universitetu*, 51, 45–54. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2017_51_7
5. Surhai, M. S., Kulish, V. A. (2007). *Perspektyvy vydobutku ta pererobky buroho vuhillia v Ukraini*. Donetsk: Vydavnytstvo "Donbas", 60.
6. Panas, R., Malanchuk, M. (2010). Tekhnolohiia formuvannia i rekultyvatsii vidvaliv rozkryvnykh porid na terytorii peredkarpatskoho sirkonosnogo baseinu. *Suchasni Dosiahnennia Heodezychnoi Nauky ta Vyrobnnytstva*, 2, 176–182.
7. Haidin, A. M., Zozulia, I. I. (2011). *Novyi Rozdil. Narodzhenyi sirkoiu. Istoriia, liudy, dovkillia*. TDV "Instytut HIRKKhIMPROM", 56.
8. Woźniak, H. (2009). Influence of water content on compressibility of cohesive dump soils – results of studies on samples of modeled lump size distribution. *Geologija*, 51 (1-2 (65-66)), 53–58. doi: <http://doi.org/10.2478/v10056-009-0006-0>

9. Puell Ortiz, J. (2017). Methodology for a dump design optimization in large-scale open pit mines. *Cogent Engineering*, 4 (1). doi: <http://doi.org/10.1080/23311916.2017.1387955>

10. Arsentev, A. I., Bukin, I. Iu., Mironenko, V. A. (1982). *Ustoichivost bortov i osushenie karerov*. Moscow: Nedra, 165.

11. Nikolashin, Iu. M. (2010). *Otchet NIR: Zakliuchenie po obosnovaniuu uslovii bezopasnogo skladirovaniia vskryshnykh porod v otrabotanii karer GOKa*. Otchet o NIR/NOVOTEK, 1/AR-10 (2433), 53.

12. Kopach, P. I., Krasnopolskii, I. A., Polischuk, S. Z., Shpar, A. G. (1988). *Upravlenie sostoianiem massivov na otkrytykh razrobotkakh*. Kyiv: Naukova dumka, 248.

13. Nikolashin, Iu. M., Kebal, Ia. V. (2016). Puti ispolzovaniia ploschadei ostatochnykh otkrytykh gornykh vyrabotok, zatoplennykh podzemnymi vodami. *Visnik Krivorizkogo Natsionalnogo Universitetu*, 43, 45–47. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2016_43_12