

**О.О. Фролов, д.т.н., проф.
І.К. Бабичев, аспірант**

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Обґрунтування безпечних параметрів відвалу при сумісному складуванні розкривних порід кар'єру та відходів збагачення

В статті представлено результати наукових досліджень щодо визначення можливості сумісного розміщення розкривних порід кар'єру і відходів збагачення залізної руди в одному відвалі. Розглянуто два варіанти сумісного розміщення відходів збагачення в сухому стані з породами розкриття, а саме, складування відходів збагачення бульдозерним відвалоутворенням та складування відходів збагачення у воронки. Виконано геомеханічне моделювання поведінки відвалу із сумісним розміщенням відходів для запропонованих варіантів за допомогою програмного продукту Plaxis 3D. Для кожного з двох варіантів сумісного розміщення відходів збагачення в сухому стані зі скельними породами розкриття кар'єру були побудовані геомеханічні моделі поведінки відвалу в процесі його формування та на кінець будівництва. Визначено максимальні деформації, що утворюються під час його будівництва за умови поярусного формування, та коефіцієнт запасу стійкості відвалу за умови його поярусного відсіпання. Представлені графічно закономірності розвитку деформаційних процесів у відвалі по мірі формування кожного ярусу при сумісному складуванні порід розкриття та відходів збагачення.

На основі проведених геомеханічних розрахунків отримано можливі об'єми розміщення шламу у розкривному відвалі і встановлено, що при бульдозерному відвалоутворенні за умови сегрегації і втирання зневоднених відходів збагачення в укоси відвалу, можливо досягти підвищення місткості відвалу на 8,7 % без зміни його геометричних розмірів. За умови складування зневоднених відходів від збагачення у воронки встановлено, що їх вміст у загальному об'ємі відвалу в середньому може становити 21,9 %. Отримані результати досліджень дають можливість продовжити наукові дослідження з вивчення та прогнозування геомеханічних параметрів відвалів при сумісному складуванні розкривних порід та зневоднених відходів інших корисних копалин, а також встановлення оптимальних варіантів складування в різних технологічних і гірничо-геологічних умовах.

Ключові слова: *відходи збагачення; хвостосховище; складування відходів; відвали; гірська порода; максимальні деформації; коефіцієнт стійкості.*

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Розробка рудних покладів корисних копалин відкритим способом пов'язана з переміщенням великих об'ємів розкривних порід та корисних копалин. Вилучення корисного компонента проводиться на збагачувальних фабриках, які досить часто розташовані поблизу меж кар'єрного поля. Після збагачення руд залишаються достатньо значні об'єми пустих порід (хвостів), які переміщують у хвостосховище [1]. Слід зауважити, що умови складування та зберігання розкривних пустих порід і пустих порід продуктів збагачення істотно відрізняються. Це пов'язано з їхнім технологічним станом і фізико-механічними характеристиками.

Проблема найбільш доцільного способу складування відходів збагачення з кожним роком все більше потребує вирішення, оскільки нові площі під складування необхідно вилучати з господарського обігу та відводити під землі промисловості. Відведення додаткових земель не завжди можливе у зв'язку із соціальними і екологічними факторами та економічною доцільністю [2].

Розробка нових методів і технологій складування відходів продуктів збагачення має бути спрямована на максимальне використання ємнісних параметрів запроєктованих відвалів (хвостосховищ) та зменшення площ складування хвостів. Одним з методів вирішення цієї проблеми є розміщення продуктів збагачення руд разом з пустими породами розкриття. Однак складність точності проектування та безпосереднього будівництва таких сумісних відвалів пов'язано з багатьма факторами, основними з яких є: неоднорідність та змінність фізико-механічних показників порід розкриття та хвостів, що розміщуються та змішуються у відвалі, неможливість точного прогнозування фізико-механічних показників змішаної гірничої маси через навантаження вище розташованих ярусів відвалів та ін.

Дослідження ефективних методів і параметрів відвалоутворення та розміщення відходів від збагачення є постійним об'єктом дослідження в країнах світу з розвинутою гірничо-видобувною галуззю. Не зважаючи на велику кількість наукових видань та досліджень у цьому напрямі однозначної методології, яка всебічно охоплювала б питання геомеханіки, безпеки, екології, технології, економіки, враховувала соціальні чинники, процес рекультивациі відвалів після їх формування, досі не має. Тому

проблемі сумісного розміщення розкривних порід та хвостів у відвали за різних гірничо-геологічних і гідрогеологічних умов їх розміщення приділяється значна увага. Її успішне вирішення надасть можливість ефективно використовувати земельні ресурси, безпечно експлуатувати відвали з меншим екологічним впливом на навколишнє середовище та покращити техніко-економічні показники роботи гірничого підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових літературних джерел дозволив певною мірою узагальнити технології складування відходів збагачення залізної руди, які зазвичай представлені тонкоподібною піщаною породою, що складається сухим або мокрим способом. Мокрий спосіб передбачає облаштування дамб по периметру гідровідвалу, подача відходів здійснюється у вигляді пульпи або пастоподібної консистенції [3, 4]. Сухе складування використовують за умови безводної технології збагачення руди або, у випадку збагачення руди з залученням води, використовують сушильні установки, які досушують шлам до вологості 10–15 %. Це дає змогу складувати шлами в сухому стані. Також, сухе складування відходів передбачає додавання в'язучих речовин або хімічних реагентів, що зменшують пиління від сухого шламового відвалу [5].

Згідно з [2, 5] найбільш розповсюдженими способами складування відходів збагачення є:

- складування пульпоподібних відходів;
- складування відходів гідроциклонів;
- складування пастоподібних відходів [6];
- складування сухих відходів.

Складування пульпоподібних відходів збагачення у хвостосховища характеризується залученням великих площ земельних угідь у зв'язку з формуванням пологих ухилів поверхні, що наминається. У [7] доведено, що площі складування у відвали в 3 рази менші за площі земельних угідь, які залучаються до складування пульпоподібних відходів. Також до недоліків цього способу належать високі експлуатаційні витрати та ризики прориву дамби.

Особливість складування відходів гідроциклонів полягає у розподілі відходів по фракціям. Більш важча фракція складається біля дамби хвостосховища, а тонкозерниста фракція – у центральній частині хвостосховища. Складуванню відходів за допомогою гідроциклонів притаманна необхідність збільшення витрат на будівництво піонерної дамби, пиління хвостів, складність будівництва в період дощів [7].

Складування пастоподібних відходів збагачення проводиться конусним способом після їхнього згущення. Розвантаження відходів виробництва з концентрацією 65 % твердого матеріалу проводиться з висоти 10–25 м в конуси діаметром 0,3–1,2 км. Такий спосіб можна використовувати у варіації з додаванням цементної складової. Він не потребує будівництва великої піонерної дамби, що значно знижує капітальні витрати, виключаються також проблеми, пов'язані зі стійкістю відвалу, відсутня фільтрація води в ґрунти, пастоподібні відходи значно безпечніші ніж звичайні [5]. Однак така технологія потребує застосування відвалоутворювачів, що значно ускладнює процес формування хвостосховищ, та не вирішує основної проблеми – зменшення площі залучених земель.

Складування сухих відходів від збагачення здійснюється зазвичай автомобільним або конвеєрним транспортом. Такий спосіб передбачає три основні технологічні етапи: розвантаження, планування та ущільнення. Він характеризується підвищеною енергоємністю, високими експлуатаційними витратами, пилінням та залежністю від метеорологічних умов [8].

Аналіз наукових досліджень щодо сумісного розміщення розкривних порід кар'єру та відходів збагачення свідчить, що завдання зі зменшення площі під відвали зазвичай вирішується локально для конкретного підприємства з урахуванням його можливостей і особливостей. Зокрема, можливі варіанти перемішування порід розкриву з хвостами збагачення та окремого розміщення хвостів у межах відвалу.

Мета дослідження. Зважаючи на представлений вище аналіз наукових джерел з проблем складування відходів збагачення руд, сформульовано мету досліджень цієї роботи, яка полягає у встановленні можливості та визначенні параметрів сумісного складування розкривних порід кар'єру та відходів збагачення залізної руди на Східному відвалі Горішньо-Плавнівського родовища ПрАТ «Полтавський ГЗК». Актуальність вирішення цього питання обумовлена виробничою потребою підприємства та дефіцитом емісних об'ємів шламового господарства.

Викладення основного матеріалу. Для реалізації поставленої мети, після проведення аналізу світового досвіду, був обраний варіант складування відходів збагачення в сухому стані з вологістю в межах 10–15 %. Не зважаючи на свою енергоємність такий варіант вважається найбільш простим у реалізації та найбільшою мірою вирішує проблему дефіциту складських об'ємів.

Для сумісного розміщення відходів збагачення в сухому стані з породами розкриву кар'єру було запропоновано два варіанти складування [8]:

- 1) складування сухих відходів від збагачення бульдозерним відвалоутворенням (рис. 1).
- 2) складування сухих відходів від збагачення у воронки (рис. 2).

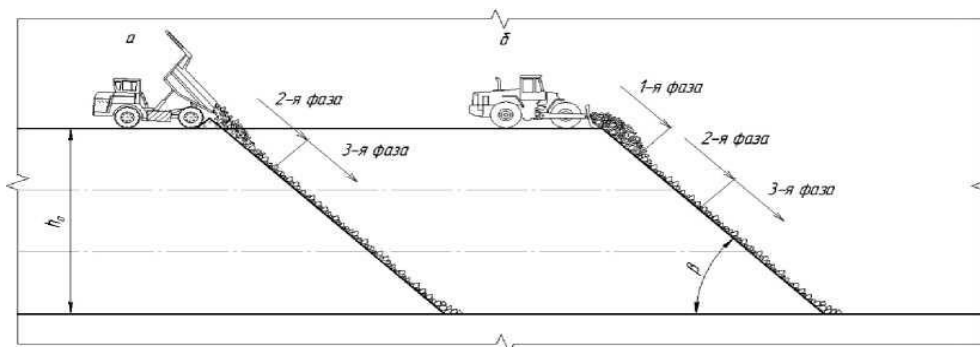


Рис. 1. Схема бульдозерного відвалоутворення при автотранспорті [8]

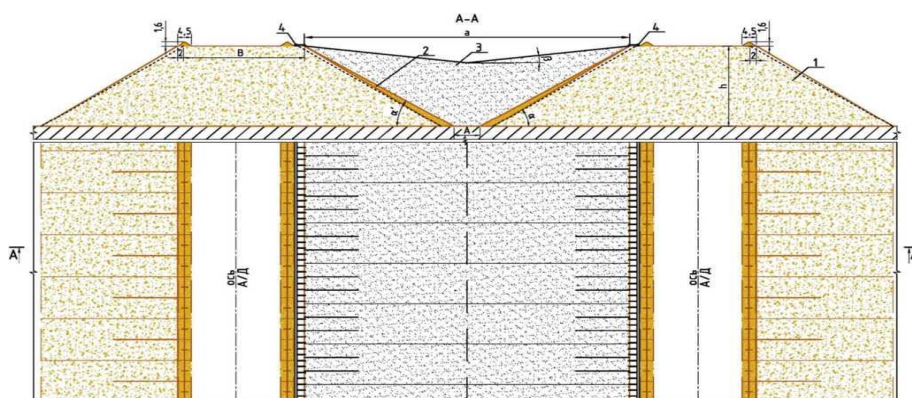


Рис. 2. Технологічна схема складування у воронку [8]

Сумісне складування бульдозерним відвалоутворенням передбачає, що породи як розкриву, так і зневодненого шламу під час їх зштовхування бульдозером з майданчика розвантаження автотранспорту на укіс у будь-якому випадку проходять сегрегацію. Завдяки гравітації пустих порід з кар'єру, гранулометричний склад яких більший, вони скочуватимуться донизу ярусу, а більш дрібні фракції будуть розміщуватися ближче до верху ярусу відвалу. В цьому разі по висоті (зверху вниз) відвал можна розбити на три зони:

- I зона ($h/H = 0 \dots 0,35$), в якій розміщується дрібна фракція відходів і пустих порід $0,05 \dots 0,2$ м. У неї можуть потрапляти шматки породи і більш крупного розміру, переважно з високою лещадністю.
- II зона ($h/H = 0,36 \dots 0,85$), із зосередженням в ній середньофракційного складу. Середній розмір шматків порід поступово збільшується від $0,2$ м до $0,5$ м;
- III зона ($h/H = 0,85 \dots 1$), в якій зосереджені переважно породи крупної фракції – $0,5$ м і більше.

За результатами досліджень у [9] встановлено, що зважаючи на гранулометричний склад шламу та можливий гранулометричний склад порід розкриву можна з високим ступенем вірогідності стверджувати, що зневоднений шлам буде зосереджений лише у верхній частині ярусу відвалу і на нижню чверть ярусу відвалу однозначно шлам не розповсюдиться. Цей факт враховано під час геомеханічного моделювання відвалу сумісного розміщення пустих порід кар'єру і шламу.

Сумісне складування відходів у воронки передбачає першочергову відсіпку по кінцевому периметру відвалу (колу) смуги пустих скельних порід розкриву з кар'єру шириною $100,0$ м (по верху). Ця смуга одночасно буде слугувати транспортною бермою, а в подальшому контрфорсом, а також дренуватиме воду по всьому схилу ярусу відвалу. Потім всередині насипу відсипаються смуги з гірничої маси для пересування конвеєрного обладнання. Ширина смуги відсіпки – 40 м по верху для забезпечення розвороту автосамоскидів. Ці ж смуги слугуватимуть свого роду армуючою сіткою для відвалу, що будуть належати до єдиної геомеханічної конструкції.

Для геомеханічного моделювання поведінки відвалу застосовуємо програмний продукт Plaxis 3D, за допомогою якого, методом кінцевих елементів, можна визначити деформації як природного, так і штучно створеного гірського масиву та встановлювати його стійкість [10, 11]. Був обраний переріз по середині відвалу з урахуванням проектного положення відвалу на кінець розробки з урахуванням зазначених вище параметрів відвалоутворення (рис. 3).

Для кожного з варіантів сумісного розміщення відходів збагачення в сухому стані з породами розкриву кар'єру були побудовані геомеханічні моделі поведінки відвалу в процесі його формування та на кінець будівництва (рис. 4).

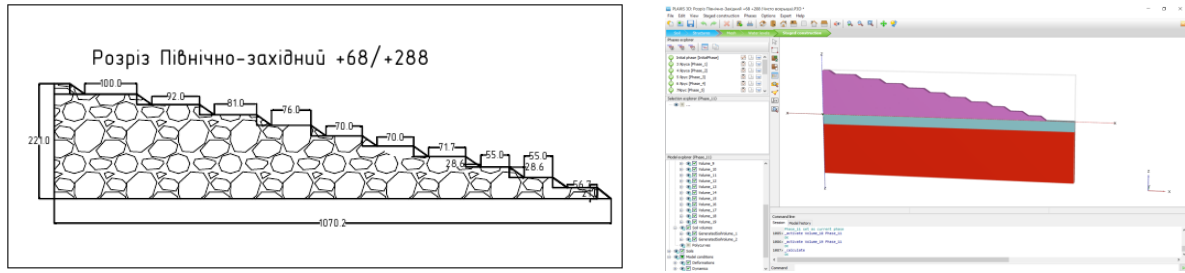


Рис. 3. Геомеханічна модель розрізу в Plaxis 3D

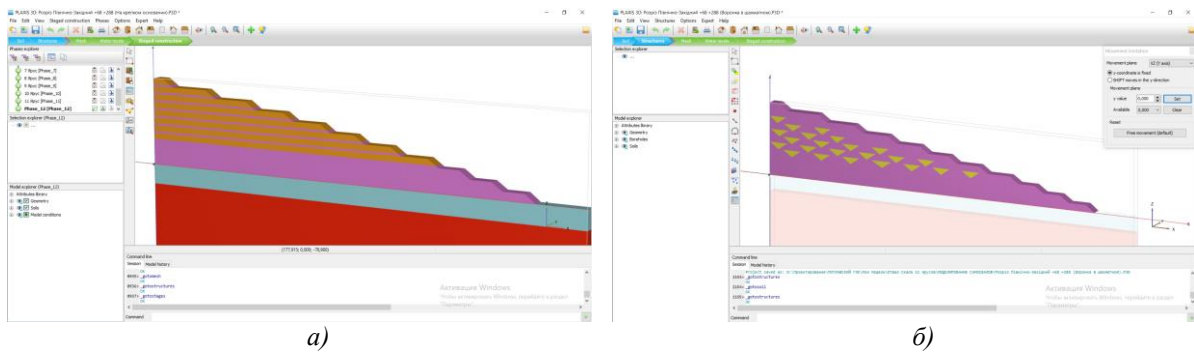


Рис. 4. Геомеханічні моделі в Plaxis 3D: а) – модель відвалу з урахуванням сегрегації; б) – модель відвалу з воронками зневодненого шламу

Для встановлення деформаційних процесів та запасу стійкості відвалу при його поярусному відсіпанні, моделювання виконувалося за умови поярусного його будівництва. Результати моделювання представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати моделювання

№	№ ярусу	Фазові деформації, м				Максимальні деформації, ΔU , м
		Δx	Δy	Δz	ΔU	
1. Сумісне відсіпання розкриття та шламу						
1	1-3 яруси	3,6	0,01	0,05	20,19	20,19
2	4 яруси	5,4	0,03	0,02	31,0	31,0
3	5 яруси	3,1	0,01	0,15	12,9	43,1
4	6 яруси	3,4	0,02	0,2	14,5	57,1
5	7 яруси	3,7	0,01	0,25	16,2	72,8
6	8 яруси	3,9	0,01	0,3	17,9	90,2
7	9 яруси	4,0	0,01	0,3	19,9	109,6
8	10 яруси	3,7	0,01	0,35	21,3	131,1
9	11 яруси	1,5	0,01	0,15	13,2	144,3
Коефіцієнт запасу стійкості						1,325
2. Сумісне відсіпання розкриття та шламу у воронки						
1	1-3 яруси	3,6	0,01	0,05	20,19	20,19
2	4 яруси	3,1	0,03	0,5	10,1	26,5
3	5 яруси	2,9	0,02	0,3	11,4	35,8
4	6 яруси	3,1	0,02	0,3	12,8	46,3
5	7 яруси	3,3	0,01	0,2	14,1	59,0
6	8 яруси	3,6	0,02	0,3	15,1	72,8
7	9 яруси	3,7	0,01	0,3	16,4	86,1
8	10 яруси	3,7	0,01	0,3	18,3	103,4
9	11 яруси	1,8	0,01	0,1	11,7	115,1
Коефіцієнт запасу стійкості						1,329

Дані таблиці 1 свідчать, що коефіцієнт запасу стійкості відвалу кожного з варіантів розміщення шламу від збагачення більший за 1,3, що є мінімально припустимим коефіцієнтом згідно з діючими нормами [12].

На рисунку 5 представлено закономірності розвитку деформаційних процесів у відвалі по мірі будівництва кожного ярусу при сумісному складуванні порід розкриву та відходів збагачення [13].

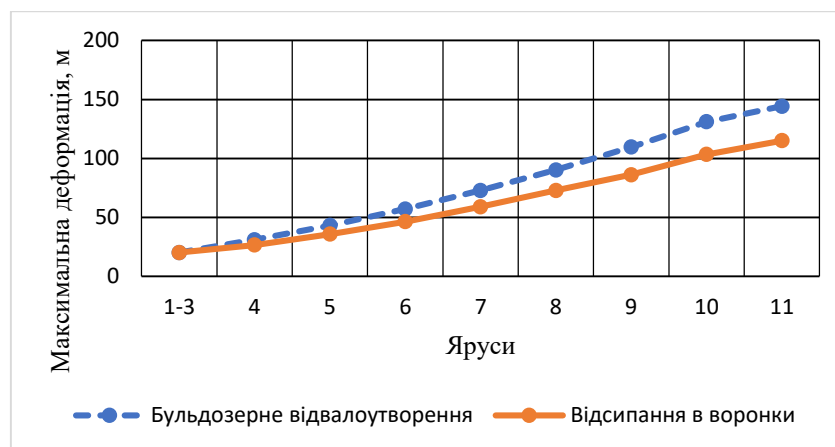


Рис. 5. Діаграма деформації відвалу по ярусам

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, за результатами геомеханічного моделювання в Plaxis 3D були отримані моделі, що прогнозують поведінку відвалу протягом всього терміну його експлуатації, 2-х варіантів сумісного складування розкритих порід та відходів збагачення. На основі проведених геомеханічних розрахунків були отримані об'єми складування і встановлено [13], що при бульдозерному відвалоутворенні за умови сегрегації і втирання зневоднених відходів збагачення (вологість 10–15 %) в укоси відвалу можна досягти підвищення міцкості відвалу на 8,7 % без зміни його геометричних розмірів. За умови складування зневоднених відходів від збагачення у воронки встановлено, що їх вміст у загальному об'ємі відвалу в середньому становитиме 21,9 %. Кількість воронок пропорційно буде зменшуватися по мірі будівництва відвалу, що пов'язано зі зменшенням площі кожного розташованого вище ярусу відвалу.

Отримані результати дозволяють продовжити наукові дослідження у цьому напрямі. Зокрема, перспективними є дослідження з вивчення та прогнозування геомеханічних параметрів при сумісному складуванні розкритих порід та зневоднених відходів від збагачення інших корисних копалин. Також подальшими дослідженнями в цьому напрямі є виявлення оптимальних варіантів складування в різних технологічних та гірничо-геологічних умовах, які мають комплексно охоплювати питання сумісного складування, що максимально достовірно прогнозували б показники стійкості відвалів.

Список використаної літератури

1. *Медведева О.А.* Обгрунтування технологій спільного складування відходів збагачення з різними степенями згущення / *О.А. Медведева, С.М. Киричко* // Геомеханічна механіка. – 2013. – Вип. 109. – С.134–141.
2. *Medvedeva O.A.* Development and exploitation of storages of enrichment process wastes as anthropogenic deposits / *O.A. Medvedeva ; in Pivnyak, Bondarenko, Kovalevska (ed.)* // Theoretical and practical solutions of mineral resources mining. – London : Taylor & Francis Group, 2015. – P. 567–573.
3. *Виноградский Э.Б.* Техничко-экономическое обоснование сгущения хвостовых пульп в горнорудной промышленности / *Э.Б. Виноградский* // Обогащение руд. – 2010. – Т. 2 – С. 39–43.
4. *Баранов В.Ф.* Системы сгущения и складирования отвальных хвостов (обзор мировой практики) / *В.Ф. Баранов* // Обогащение руд. – 2009. – Т. 3 – С. 43–48.
5. *Гапонов Ю.С.* Геомеханическое обоснование устойчивости породных отвалов с учетом влияния характеристик разрушенной горной массы : дисс. ... к.т.н. : 25.00.20 / *Ю.С. Гапонов.* – СПб., 2015. – 198 с.
6. *Кисляков В.Е.* О возможности пастового сгущения хвостов обогатительного передела / *В.Е. Кисляков, А.В. Никитин, А.А. Шершнев* // Маркшейдерия и недропользование. – 2012. – № 4 (60). – С. 21–24.
7. *Васильева А.Д.* Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса : дисс. ... к.т.н. : 25.00.16 / *А.Д. Васильева.* – СПб., 2020. – 186 с.
8. *Шершнев А.А.* Технологические схемы складирования хвостов обогащения в подготовленные отвалы вскрышных пород / *А.А. Шершнев, С.П. Бахаева* // Весник Кузбасского ГТУ. – 2020. – № 3. – С. 46–49.
9. *Цирель С.В.* Гранулометрический состав, сдвиговая прочность разрушенных горных пород их влияние на устойчивость отвалов / *С.В. Цирель, Ю.С. Гапонов, А.А. Павлович* // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 12. – С. 80–83.

10. Моделювання пружно-пластичного деформування бортів кар'єру під час виймання прибортових запасів вугілля / *О.О. Фролов, І.К. Бабичев, І.В. Стецьків, О.М. Клеван* // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2015. – № 3 (74). – С. 148–155.
11. *Фролов О.О.* Встановлення деформації бортів розрізу після відробки прибортових запасів вугілля / *О.О. Фролов, І.К. Бабичев* // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Гірництво. – 2016. – Вип. 31. – С. 48–56.
12. Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. Ч. 1 та 2. Гірничі роботи. Ліквідація гірничодобувних підприємств. Техніко-економічна оцінка та показники : СОУ-МПП 73.020-078-1:2007. – К. : Міністерство промислової політики України, 2007. – 224 с.
13. *Бабичев І.К.* Науково-дослідна робота «Сумісне складування розкривних порід з кар'єру та осушених відходів від збагачення у відвалах ПРАТ «Полтавський ГЗК» / *І.К. Бабичев.* – К. : ТОВ «ДЮІС», 2021. – 79 с.

References:

1. Medvedjeva, O.A. and Kyrychko, S.M. (2013), «Obg'runtuvannja tehnologij spil'nogo skladuvannja vidhodiv zbagachennja z riznymy stepenjamy zgushhennja», *Geomechanichna mehanika*, Issue 109, pp. 134–141.
2. Medvedeva, O.A., Pivnyak, G.G., Bondarenco, V.I. and Kovalevska, I.A. (2015), «Development and exploitation of storages of enrichment process wastes as anthropogenic deposits», *Theoretical and practical solutions of mineral resources mining*, pp. 567–573.
3. Vinogradskii, E.B. (2010), «Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie sgushcheniya khvostovykh pul'p v gornorudnoi promyshlenosti», *Obogashchenie rud*, Vol. 2, pp. 39–43.
4. Baranov, V.F. (2009), «Sistemy sgushcheniya i skladirovaniya otval'nykh khvostov» *Obogashchenie rud*, Vol. 3, pp. 43–48.
5. Gaponov, Yu.S. (2015), «Geomechanicheskoe obosnovanie ustoichivosti porodnykh otvalov s uchedom vliyaniya kharakteristik razrushennoi gornoj massy», Ph.D. Thesis of dissertacion, 25.00.20, NSMU «Gornyi», SPb., 198 p.
6. Kislyakov, V.E., Nikitin, A.V. and Shershnev, A.A. (2012), «O vozmozhnosti pastovogo sgushcheniya khvostov obogatitel'nogo peredela», *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, Vol. 4 (60), pp. 21–24.
7. Vasil'eva, A.D. (2020), «Inzhenerno-geologicheskoe obosnovanie ustoichivosti vysokikh otvalov ugol'nykh mestorozhdenii Kuzbassa», Ph.D. Thesis of dissertacion, 25.00.16, NSMU «Gornyi», SPb., 186 p.
8. Shershnev, A.A. and Bakhaeva, S.P. (2020), «Tekhnologicheskije skhemy skladirovaniya khvostov obogashcheniya v podgotovlennye otvaly vskryshnykh porod», *Vesnik Kuzbaskogo GTU*, No. 3, pp. 46–49.
9. Tsirel', S.V., Gaponov, Yu.S. and Pavlovich, A.A. (2013), «Granulometricheskii sostav, sdvigovaya prochnost' razrushennykh gornykh porod ikh vliyanie na ustoichivost' otvalov», *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, No. 12, pp. 80–83.
10. Frolov, O.O., Babychev, I.K., Stec'kiv, I.V. and Klevan, O.M. (2015), «Modeljuvannja pruzhno-plastychnogo deformuvannja bortiv kar'jeru pid chas vyjmannja prybortovyh zapasiv vugillja», *Visnyk ZhDTU, Serija Tehnichni nauky*, No. 3 (74), pp. 148–155.
11. Frolov, O.O. and Babychev, I.K. (2016), «Vstanovlennja deformacii' bortiv rozrizu pislja vidrobky prybortovyh zapasiv vugillja», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija *Girnyctvo*, Issue 31, pp. 48–56.
12. Ministerstvo promyslovoi' polityky Ukrainy (2007), *SOU-MPP 73.020-078-1:2007 : Normy tehnologichnogo proektuvannja girnychodobuvnyh pidprijemstv vidkrytim sposobom rozrobky rodovyshh korysnyh kopalyn. Ch. 1 ta 2. Girnychi roboty. Likvidacija girnychodobuvnyh pidprijemstv. Tehniko-ekonomichna ocinka ta pokaznyky*, Kyiv, 224 p.
13. Babychev, I.K. (2021), *NIR «Sumisne skladuvannja rozkryvnyh porid z kar'jeru ta osushenyh vidhodiv vid zbagachennja u vidvalah PRAT «Poltav's'kyj GZK»*, TOV «DJuIS», Kyiv, 79 p.

Фролов Олександр Олександрович – 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:

- буропідривної роботи на кар'єрах;
- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: frolov@geobud.kiev.ua.

Бабичев Ігор Костянтинович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-5771-1087>.

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин;
- геомеханіка.

E-mail: i.babichev@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2021