

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

На правах рукопису

ШАРАН ПАВЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 622.271

**«АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ФАКТОРІВ, ЩО
ВПЛИВАЮТЬ НА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ
ЕКСКАВАТОРУ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННІ ГІРНИЧОЇ МАСИ В
КАР'ЄРІ»**

184 «Гірництво»
(відкриті гірничі роботи)

Випускна робота
на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра

Виконав Шаран П.В. / _____ /

Керівник Жуков С.О. / _____ /

Завідувач кафедри Жуков С.О. / _____ /

Кривий Ріг
2025 р.

Зміст

РЕФЕРАТ	3
ВСТУП	4

Розділ 1

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ВИКОРИСТАННЯ КАР'ЄРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ ПРОВІДНИХ ВИРОБНИКІВ ГІРНИЧОДОБУВНИМИ КОМПАНІЯМИ СВІТУ	8
1.1. Загальний огляд практики застосування кар'єрних екскаваторів та їхньої ефективності.....	8
1.2. Сучасні наукові центри та тенденції в модернізації ЕАК.....	13
1.3. Проблеми комп'ютеризації аналітичних досліджень та наукового супроводу гірничих технологій.....	15
Висновки за розділом 1	18

Розділ 2

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ БГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕАК НА ПРИКЛАДІ РОЗКРИВНИХ РОБІТ ЗВОРОТНИМИ ГІДРАВЛІЧНИМИ ЛОПАТАМИ.....	20
2.1. Загальна характеристика умов застосування гідравлічних екскаваторів типу зворотна гідравлічна лопата	20
2.2. Переважна послідовність та етапна наповненість дослідження ефективності застосування зворотних гідравлічних лопат	25
2.3. Аналіз методів обґрунтування раціональних параметричних показників щодо ЕАК зі зворотною гідравлічною лопатою.....	27
2.4. Промислова перевірка рекомендацій та оцінка їхньої економічної ефективності.....	41
Висновки за розділом 2	43

Розділ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КАР'ЄРНИХ ЕКСКАВАТОРНО- АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ З УРАХУВАННЯМ ПОЗАПЛАНОВИХ ПРОСТОЇВ.....	45
3.1. Загальна характеристика функцій і роботи ЕАК кар'єру і переважні підходи дослідників до її вирішення.....	45
3.2. Переважна послідовність та тематична етапність реалізації досліджень щодо оптимізації ЕАК з урахуванням ПП обладнання.....	50
3.3. Оцінка впливу позапланових простоїв гірничих машин на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу.....	60
Висновки за розділом 3	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка випускної магістерської роботи Шарана Павла Володимировича на тему: «Аналіз досліджень по визначенню факторів, що впливають на техніко-економічні показники роботи екскаватору при перевантаженні гірничої маси в кар'єрі».

«Випускна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025 р.».

Актуальність теми. В сучасних умовах основне технологічне завдання діяльності будь-якого підприємства відкритих гірничих розробок – виїмка, навантаження та вивіз гірничої маси – виконується потужними екскаваторно-автомобільними комплексами (ЕАК), що є єдиною системою у складі гірничодобувного підприємства. При цьому тенденція в оновленні екскаваторів є найбільш показовою і проявляється в динамічному переході від мехлопат радянських часів з об'ємом ковша в 8-10 м³ до сучасних надпотужних гідравлічних, ківш яких вміщує 30-50 м³. Питання ефективності спільної роботи кар'єрних екскаваторів і самоскидів у складі ЕАК на сьогоднішній день досліджено недостатньо, тому його оптимізація є вельми актуальною.

Ідея роботи полягає в аналізі прогресивних технологій і гірничих машин екскаваторно-автомобільних комплексів та визначенні максимально придатних з них для адаптації до умов ГЗК Кривбасу.

Мета дослідження полягає в підвищенні експлуатаційної продуктивності екскаваторно-автомобільних комплексів рудників Кривбасу за допомогою аргументовано відібраних методів оптимізації розподілу кар'єрних самоскидів за пунктами навантаження й урахування позапланових простоїв.

Поставлена мета визначає основні завдання:

- аналіз та порівняльна оцінка існуючих методів координації ЕАК для виявлення перспективних напрямів їх удосконалення.

- оцінка впливу виокремлених в результаті виконаного аналізу технологічних і організаційних рішень на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільних комплексів.

Предмет дослідження – екскаваторно-автомобільні комплекси кар'єрів.

Об'єктом дослідження є методи наукового обґрунтування складу кар'єрних ЕАК й оптимізації їх взаємодії.

Методологія та методи досліджень: критичний аналіз фактажу звітності діючих кар'єрів з компаративними і каузальними операціями; методи лінійного програмування, теорії масового обслуговування, статистичної обробки даних.

Наукова складова роботи полягає в системному принципі виконаного аналізу щодо сполучення різнотипних машинних засобів в ЕАК кар'єру.

Структура й обсяг роботи. Робота представлена рефератом, вступом, трьома розділами, загальними висновками і списком інформаційних джерел з 50 найменувань та містить 24 рисунка, 6 таблиць. Загальний обсяг – 74 стор.

Ключові слова: КАР'ЄР, ЕКСКАВАТОРИ, ГІДРАВЛІЧНА ЛОПАТА, ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИЙ КОМПЛЕКС, РУДНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ПОЗАПЛАНОВІ ПРОСТОЇ.

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних умовах основне технологічне завдання діяльності будь-якого підприємства відкритих гірничих розробок – виїмка, навантаження та вивіз гірничої маси – виконується потужними екскаваторно-автомобільними комплексами (ЕАК), що є єдиною системою у складі гірничодобувного підприємства.

Ефективність роботи ЕАК багато в чому визначається ефективністю взаємодії елементів цієї системи (кар'єрних екскаваторів та автосамоскидів), що характеризується величиною простоїв обладнання протягом зміни в очікуванні роботи. Для самоскидів ці простой сягають до 30% робочого дня.

Основні резерви скорочення простоїв вантажно-транспортного обладнання вбачаються у підвищенні ефективності застосовуваної системи координації кар'єрного автотранспорту у складі ЕАК кар'єру.

В даний час існує ряд таких систем, що пропонують потенційне збільшення експлуатаційної продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу і економії, що витікає з цього. Однак ефективність роботи ЕАК у конкретних умовах залежить від існуючих парків вантажно-транспортної техніки, використовуваної стратегії комбінування потужних екскаваторів і кар'єрного автотранспорту та безлічі інших аспектів, властивих даному підприємству.

Питання ефективності спільної роботи кар'єрних екскаваторів і самоскидів у складі ЕАК на сьогоднішній день вивчено недостатньо, тому завдання дослідження й оптимізації функціонування екскаваторно-автомобільних комплексів за допомогою вдосконалення системи розподілу кар'єрних самоскидів за пунктами навантаження представляється актуальним.

Ступінь розробленості. Питанням організації, планування та моделювання роботи кар'єрного автотранспорту присвячені роботи багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених та фахівців, таких, як О.С. Пригунов [1-3], А.Ю. Дриженко [4-6], М.Г. Новожилов, В.Ф. Бизов, В.О. Завсєгдашний, С.О. Жуков, М.Т. Бакка, І.Л. Гуменик з України [7-11]; В.В. Ржевський, К.М.

Трубецької, О.О. Пешков, Ю.І. Аністратов, Г.О. Холодняков, Б.Р. Ракішев, В.С. Хохряков, М.Г. Саканцев, І.В. Зирянов, Б.Л. Геріке, А.Ф. Клебанов, Ю.В. Стенін – з країн СНД [12-17], а також – вчених-гірників, спеціалістів з моделювання екскаваторно-автомобільних комплексів з дальнього зарубіжжя: S. Ramazan, R. Dimitrakopoulos, S. Jain, W.J. Foley, S. Alarie, C. Burt, M. Gamache C. Cullenbine, R.K. Wood, A. Newman, та багатьох інших [18-22]. Аналіз їх досліджень показав, що імовірна природа вантажно-транспортного процесу екскаваторно-автомобільного комплексу при вирішенні задачі розподілу кар'єрних самоскидів враховується здебільшого недостатньо. У пропонованих диспетчерських умовах розглядається, зазвичай, лише один аспект роботи екскаваторно-автомобільного комплексу (простої лише екскаваторів чи лише самоскидів).

Мета виділених нами робіт, серед яких особливої уваги заслуговує [23], основний акцент робиться на підвищенні експлуатаційної продуктивності екскаваторно-автомобільних комплексів за допомогою оптимізації розподілу кар'єрних самоскидів за пунктами навантаження.

Ідея при цьому полягає в максимальному урахуванні стохастичного характеру вантажно-транспортних процесів в ЕАК та використанні імітаційного моделювання для їх опису й оптимізації.

Поставлена мета визначає основні завдання:

- провести аналіз та порівняльну оцінку існуючих методів раціонального узгодження парку та функціонування потужних сучасних екскаваторів у відкритих гірничих розробках, з одного боку, а з іншого – кар'єрного автотранспорту, для виявлення перспективних напрямів їх удосконалення;

- поглиблено розглянути дворівневу модель координації роботи екскаваторно-автомобільного комплексу на основі аналізу існуючих прогресивних методів;

- оцінити імітаційну модель і алгоритм оптимізації розподілу самоскидів на нижньому рівні моделі координації, та створений на їх базі програмний комплекс;

- проаналізувати програмний комплекс й оцінити вплив пропонованих рішень на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру.

Наукова новизна виділених робіт полягає в наступному:

1. В критерії прийняття рішень щодо розподілу самоскидів за пунктами навантаження вперше враховано і запропоновано параметр пріоритетності екскаваторів (маршрутів).

2. Розроблено імітаційну програму для чисельного моделювання процесів в екскаваторно-автомобільних комплексах, яка відрізняється тим, що мінімізує втрати від простоїв обладнання для різної кількості самоскидів, що працюють, а також ітераційно формує набір оптимальних значень параметрів пріоритетності екскаваторів (маршрутів).

3. Запропоновано нові принципи формування груп диспетчеризації у складі екскаваторно-автомобільного комплексу: розташування екскаваторів на одній ділянці гірничих робіт, однорідність парку самоскидів, які працюють із ними, вивіз гірничої маси однією групою у відвал.

Теоретична та практична значущість виділених робіт полягає в тому, що розроблена дворівнева диспетчерська модель екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єра може використовуватись для моделювання й оптимізації різних ситуацій в екскаваторно-автомобільного комплексу з урахуванням специфіки конкретних підприємств. Упровадження розробленого програмного комплексу дає можливість підвищити експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу за рахунок зниження простоїв обладнання, а також може бути основою створення вітчизняної автоматизованої системи диспетчеризації (АСД) кар'єрного автотранспорту як продукту імпортозаміщення.

Методологія та методи досліджень: дискретно-подійне імітаційне моделювання, методи лінійного програмування, теорії масового обслуговування, статистичної обробки даних.

Наукові пріоритети сучасних досліджень:

1. Для мінімізації простоїв і підвищення експлуатаційної продуктивності кар'єрних екскаваторів і самоскидів у критерії прийняття рішень щодо розподілу самоскидів на нижньому рівні запропонованої дворівневої диспетчерської моделі екскаваторно-автомобільного комплексу слід враховувати пріоритетність екскаваторів і відповідних транспортних засобів.

2. Імітаційна програма для чисельного моделювання процесів екскаваторно-автомобільного комплексу, що враховує сукупність всіх впливових факторів – потужність екскаваторів, відповідність кар'єрних екскаваторів і самоскидів один одному, швидкісні характеристики самоскидів, закономірності відмов і відновлення працездатності обладнання, простоїв обладнання – формує набір оптимальних значень параметрів пріоритетності екскаваторів (маршрутів).

3. Роботу екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єрів доцільно організовувати по комбінованому відкрито-закритому циклу з поділом діючих кар'єрних екскаваторів і самоскидів на групи диспетчеризації, формування яких проводиться за принципом розташування екскаваторів на одній ділянці гірничих робіт. вивозом гірничої маси однією групою відвал.

Достовірність наукових результатів, як правило, підтверджується коректним вибором критеріїв ефективності, використанням апробованих методів імітаційного моделювання, збіжністю результатів моделювання з фактичними показниками роботи екскаваторно-автомобільного комплексу на підприємствах в однакових умовах.

Особистий внесок автора полягає у використанні результатів авторських аналітичних досліджень щодо сучасних методів розробки імітаційних моделей екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру, алгоритмів оптимального розподілу кар'єрних самоскидів по зональних пунктах навантаження та їх програмної реалізації, виділити з них найефективніші щодо можливості адаптації їх до умов кар'єрів Кривбасу.

Розділ 1

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ВИКОРИСТАННЯ КАР'ЄРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ ПРОВІДНИХ ВИРОБНИКІВ ГІРНИЧОДОБУВНИМИ КОМПАНІЯМИ СВІТУ

1.1. Загальний огляд практики застосування кар'єрних екскаваторів та їхньої ефективності

Аналіз роботи сучасних кар'єрних екскаваторів високої продуктивності на потужних гірничодобувних комплексах світу показує їх ключову роль у видобутку корисних копалин завдяки виключно високій технологічній адаптивності й організаційно-управлінській гнучкості застосування в умовах постійної змінності дислокації активних робочих зон у просторі кар'єру, надійності в забезпеченні належної продуктивності та здатності узгоджено з іншими гірничими машинами – переважно у складі екскаваторно-автомобільних комплексів – переміщати великі обсяги гірських порід у схемах вантажопотоків будь-якої складності.

Сучасні високопродуктивні кар'єрні екскаватори представлені надзвичайно широким спектром типорозмірів та потужності, які відрізняються за типом приводу та робочим циклом: від гігантських роторних, таких, як BAGGER-293 (рис. 1.1), та надпотужних гідравлічних екскаваторів (прямих або зворотніх механічних чи гідравлічних лопат) типу TEREX RH400 (рис. 1.2), або LIEBHERR (рис. 1.3) до більш типових від провідних виробників, наприклад, KOMATSU, HITACHI й інших.



Рис. 1.1. Роторний екскаватор Bagger 293 німецької компанії TAKRAF (1995р.) – найбільша самохідна машина у світі: довжина – 225 м, висота – 96 м, маса – 14 200 т; ротор, діаметром 23 м, має 20 ковшів по 15 м³; екіпаж – 5 операторів (Джерело: https://uk.wikipedia.org/wiki/Bagger_293 [24])

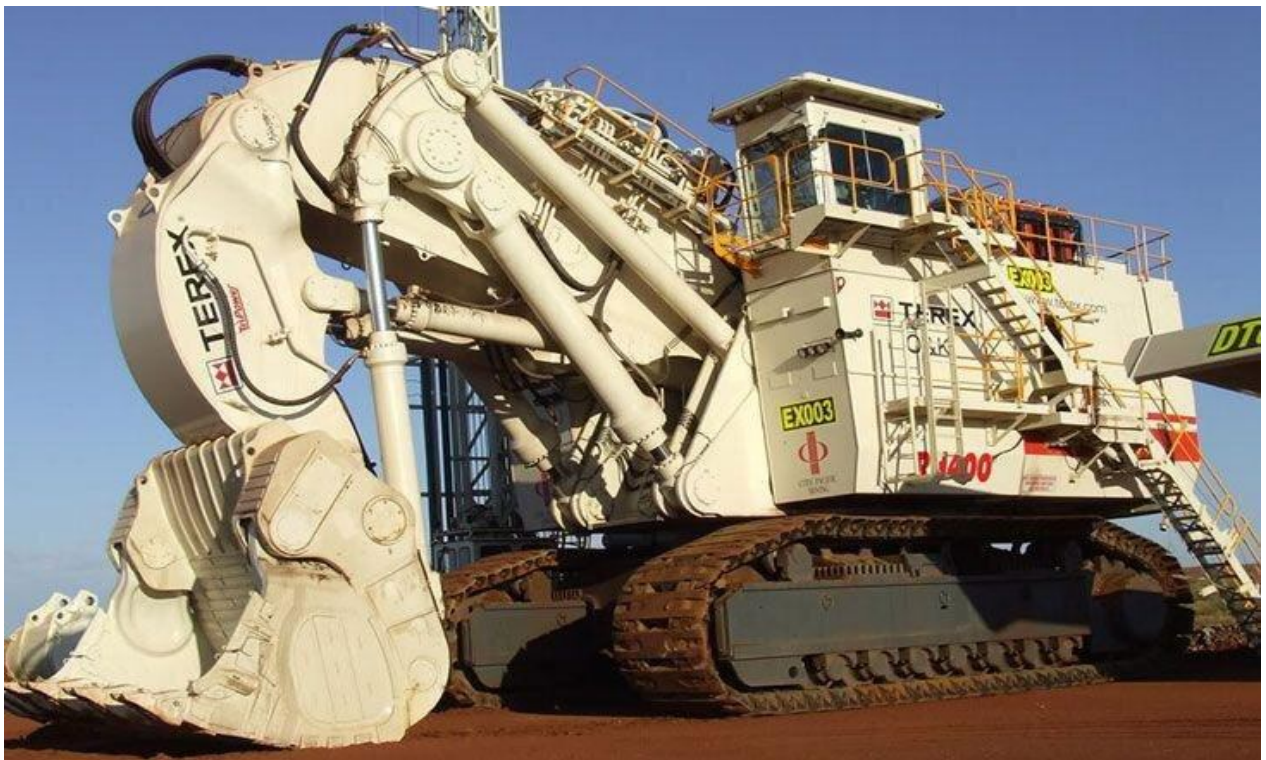


Рис. 1.2. Гідравлічний екскаватор Terex RH400: маса – 980 т, ємність ковша – 50 м³, довжина – 13 м, ширина – 9.07 м, висота – 9.99 м, макс, досяжність по горизонталі – 20.1 м, по висоті – 14,3, глибина черпання – 9 м (Джерело: <https://www.ixbt.com/live/offtopic/kak-vyglyadit-samy-bolshoy-v-mire-gidravlicheskiy-eks-kavator-terex-rh400.html> [25])



Рис. 1.3. Гідравлічний екскаватор Liebherr R 9800: маса – 800 т, ємність ковша – 42 м³, ширина доріжки – 16,3 м, макс. досяжність по горизонталі – 20.1 м, глибина черпання – 9 м. (Джерело: <https://www.olx.ua/uk/transport/spetstechnika/ekskavatory/q-liebherr> [26])

Їхня робота оцінюється за обсягом переміщуваної гірничої маси на годину і залежить від типу екскаватора та галузі, але в цілому вони є незамінною технікою для ефективної розробки родовищ.

За типом та характеристиками кар'єрні екскаватори поділяються наступним чином.

Роторні екскаватори – це найбільші машини, призначені для видобутку вугілля на відкритих розробках, наприклад, – на вугільних розрізах. Вони мають висоту понад 10 м і можуть важити до 14 200 тонн.

Гідравлічні екскаватори – популярні бренди, такі як KOMATSU (рис. 1.4), HITACHI та VOLVO, виробляють гідравлічні екскаватори, які характеризуються високою надійністю та продуктивністю, що дозволяє ефективно переміщувати породи та завантажувати їх у транспорт.



Рис. 1.4. Гідравлічний екскаватор Komatsu PC8000-6: маса – 777 т, ємність ковша – 42 м³, довжина – 14,08 м, ширина – 10,01 м, висота – 9,65 м, макс, досяжність по горизонталі – 20,7 м, глибина черпання – 8 м
(Джерело: <https://www.lectura-specs.com.ua/ua/model/budivel-na-tehnika/gusenichni-eks-kavatori-komatsu/pc8000-6-11731058> [27])

Деякі виробники, зокрема – CATERPILLAR (рис. 1.5) та HITACHI (рис. 1.6), також випускають гібридні й електричні екскаватори – екскаватори з різними типами приводу, включаючи дизельний, електричний та гідромеханічний.

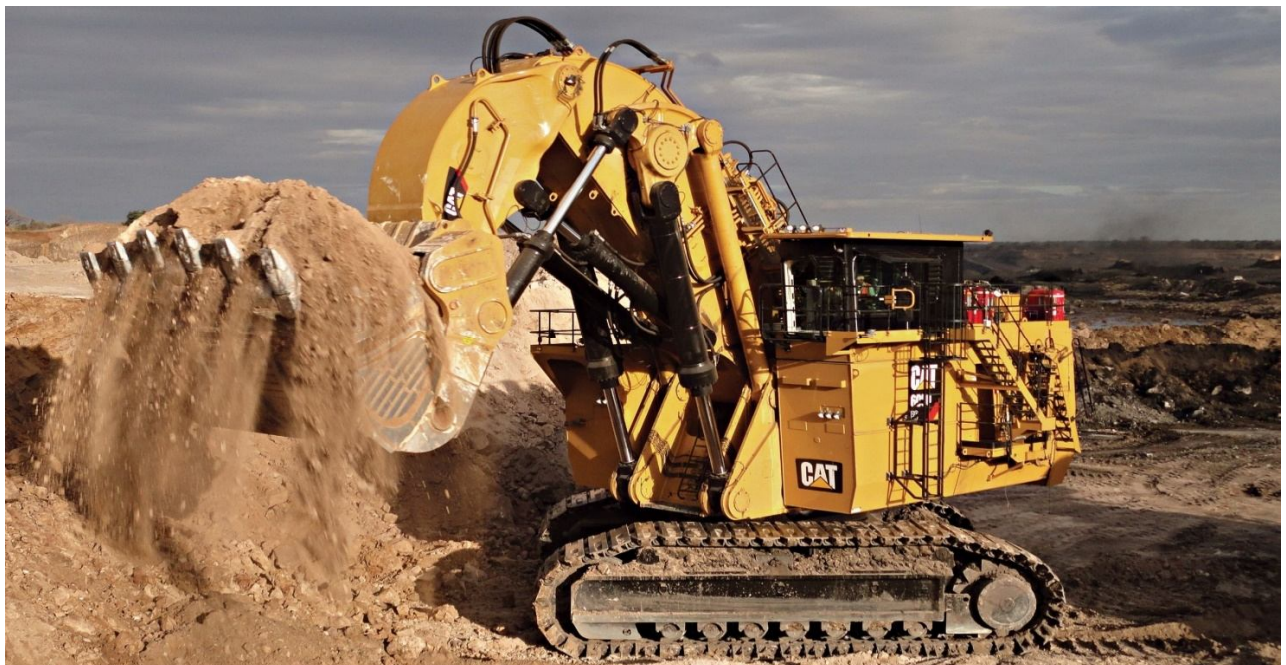


Рис. 1.5. Гідравлічний екскаватор Caterpillar 6090 FS: маса – 980 т, ємність ковша – 52 м³, потужність 1 з двох двигунів - AE J 1995 – 3360 кВт (4500 к.с.)
(Джерело: <https://h-cpc.cat.com/cmms/v2?&f=product&it=product&cid=406&lid=X355&gid=18312767&pid=18490663&nc=1> [28])



Рис. 1.6. Гідравлічний екскаватор Hitachi EX8000-6: маса – 837 т, ємність ковша – 43 м³, ловжина рукояті – 5,8 м, максимальна глибина копання – 8,4 м, максимальна робоча висота – 19,0 м, максимальний радіус копання – 22,3 м, максимальна висота вивантаження – 11,9 м
(Джерело: <https://www.hitachicm.ua/produkcija/ekskavatory/gornye-ekskavatory/ex8000-6/> [29])

Основні критерії оцінки роботи екскаваторів наступні:

Продуктивність – це основний показник ефективності екскаватора. Він оцінює, наскільки швидко машина може переміщати різні сипучі матеріали. Продуктивність вимірюється в кубічних метрах на годину.

Ефективність – оцінюється здатністю екскаватора справлятися з розробкою, виїмкою, переміщенням та навантаженням породи.

Японські компанії, такі як KOMATSU та HITACHI, а також шведська VOLVO [30], є найбільшими постачальниками кар'єрних екскаваторів на світовий ринок.



Рис. 1.7. Кар'єрний екскаватор VOLVO EC-950E (Джерело: <https://www.lectura-specs.com/en/model/construction-machinery/crawler-excavators-volvo/ec950e-11686551> [30])

Німецькі інженерні гіганти, такі як компанія TAKRAF [31], відомі виробництвом найбільших і найпотужніших екскаваторів, що використовуються у гірничодобувній промисловості.

Таким чином, наразі в гірничодобувній промисловості саме гідравлічні кар'єрні екскаватори відіграють ключову роль у видобутку корисних копалин, виконуючи роботи з виїмки, переміщення та навантаження їх в кар'єрах.

1.2. Сучасні наукові центри та тенденції в модернізації ЕАК

На сьогоднішній день в Європі надзвичайно прогресують програми Німеччини щодо модернізації технологій – RRLab університету RPTU, включаючи технології гірничі [32].

RPTU – Технічний університет Рейнланд-Пфальца Кайзерслаутерн-Ландау (Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau) –

єдиний технічний університет у Рейнланд-Пфальці. Як центр передових міжнародних досліджень та талановитий пул для бізнесу і науки, RPTU пропонує чудові умови для навчання та досліджень, а також космополітичне середовище. RPTU також є партнером з інновацій та трансферу для промисловості, бізнесу та суспільства. Ті, хто навчається, досліджує або працює в RPTU, є частиною динамічної університетської спільноти та формують світ технологій майбутнього.

Яскравим прикладом цьому є розробка адаптивної системи планування та оптимізації забезпечення масових переміщень гірничої маси у кар'єрах потужними екскаваторно-автомобільними комплексами.

Програма фінансування: Інновації та просування (InnoProm) землі Рейнланд-Пфальц.

Опис проекту

Великі мобільні екскаватори на гусеничному ході часто використовуються в кар'єрах для завантаження різних матеріалів, таких як вугілля, підірвана гірська порода, будівельна сировина та змішані матеріали.

Це пояснюється тим, що вони значно перевершують колісні навантажувачі за силою дроблення та розриву.

Під час завантаження на вантажівки або конвеєрні стрічки гірські породи різного типу часто розміщуються в певному порядку, залежно від геометрії робочих органів і транспортних ємностей гірничих машин та властивостей матеріалу (наприклад, сировини для виробництва цементу), щоб досягти кращого змішування в бункері, дробарці або в млині чи просто для початкового сортування.

Метою проекту є розробка автономної системи, яка вирішує описану вище прикладну задачу.

Для цього будуть досліджені підходи до сегментації та класифікації на основі камер для різних типів гірських порід.

На основі цієї сегментації буде розроблено алгоритм планування з урахуванням стабільності сцени, який визначає послідовність дій, які має

виконати мобільний кар'єрний екскаватор для виймання розлихленої технологічним вибухом скельної гірничої маси або сипучого матеріалу наносної товщі покриву покладу корисної копалини.

Для перевірки загальної адекватності розробленої системи підхід буде протестовано як у симуляції, так і в реальному діючому кар'єрі на мобільному екскаваторі Volvo.

На основі архітектури керування iB2C, розробленої на кафедрі логістики, буде розроблено систему керування на основі аналізу й управління комплексом поведінки на основі розроблених засобів штучного інтелекту. Це особливо підходить для постійної адаптації до змінних умов навколишнього середовища (наприклад, зсувів гірських порід).

1.3. Проблеми комп'ютеризації аналітичних досліджень та наукового супроводу гірничих технологій

Використання комп'ютерів дедалі більше впливає на природничі науки та техніку. Однак, всупереч поширеній думці, їх використання не обов'язково гарантує повторення тих самих результатів. Причини цього численні – і це виклик, особливо небезпечний в галузі гірництва, враховуючи масштабність останнього і можливу катастрофічність наслідків помилок, який багато дослідників лише зараз по-справжньому усвідомлюють [33].

У Рейнланд-Пфальцьському технологічному університеті в Кайзерслаутерн-Ландау (Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau – RPTU) проект, що фінансується Фондом Volkswagen, досліджує, що це означає для відтворюваності даних загалом, наскільки стандартизація та плюралізм повинні або можуть бути забезпечені – і хто має (організаційну) владу вирішувати це питання.

Вимога на експериментальну відтворюваність дослідів давно і тісно пов'язана з наукою, каже професор Йоганнес Ленхард, який має ступінь доктора математики та ступінь габілітації з філософії: «Якщо щось не можна

відтворити, то це не наукове». Відомі результати повинні – ось у чому полягає вимога – бути чітко відтворюваними за умови правильної експериментальної установки. Але протягом кількох років, а іноді й десятиліть, відколи комп'ютери все частіше проникають у різні дисципліни, виникла раніше занедбана проблема: «Всупереч поширеній думці, використання комп'ютерів не гарантує повторення тих самих результатів. Ви не отримаєте абсолютно те саме одним натисканням кнопки». Чому це так? Ленхард зазначає, що ми працюємо зі складними структурами: «Дослідники, наприклад, працюють з програмними пакетами, які вони навіть не писали самі». Загалом, основа досліджень зараз дуже розділена за обсягом праці. А дослідницькі групи іноді використовують різні алгоритми.

По суті, філософія безпосередньо зустрічається з інженерією.

У RPTU Йоганнес Ленхард [34] обіймає посаду професора Гейзенберга з «Філософії в науці та техніці» – працюючи на стику філософії, природничих наук та інженерії. У рамках свого дослідження він спеціально хоче знати, чи слід вважати результат, згенерований комп'ютером, відтворюваним, якщо він допускає варіації в апаратному забезпеченні, програмному забезпеченні, параметрах та навчальних даних. «Або, навпаки, чи слід забороняти певні варіації?» Чи обов'язково відтворюваність означає робити абсолютно те саме? Що має бути збережено як наукова точність – і що можна і слід вітати як інноваційне відхилення? Отже, який баланс між стандартизацією та плюралізмом? І хто насправді має повноваження, силу, щоб це визначити? «Це також політичне питання», – наголошує Ленхард.

Йоганнес Ленхард – один з небагатьох професорів філософії в Німеччині, який тісно співпрацює з інженерією. Його дослідження зараз зосереджені на галузях обчислювальної хімії та термодинаміки, які мають виключно важливе значення для гірництва, як в мінералогічному плані та технологіях виготовлення й використання вибухових матеріалів, так і в енергетиці вантажоперевезень у кар'єрах. Він наводить приклад комп'ютерного застосування в цій галузі: матеріальні властивості речовини важливі для

практики, особливо те, як на них впливають зміни параметрів, таких як температура та тиск. Простіше кажучи, комп'ютерні моделі, комп'ютерні симуляції, максимально відповідно призначені для розрахунку того, як поведуться дві – або більше – речовини, коли вони об'єднані. Вражає те, що різні дослідницькі групи отримують різні результати. Слід зазначити, що відмінності є статистично значущими. Йоганнес Ленхард: «Отже, чи погано виконані симуляції? Чи вони недосконалі? Чи це – в природі речей, що при таких складних процесах результат не можна чітко повторити?» Тільки зараз ми починаємо розглядати ці питання більш детально.

Хто визначає, які коди використовувати?

У рамках проекту, що фінансується Фондом Volkswagen, Ленхард та його команда хочуть дістатися до суті цих питань з двох напрямків: перший – аналітичний. Більш конкретно: аналіз, спостереження й узагальнення: «Ми досліджуємо, що зараз відбувається в науковій спільноті з цього питання». Які рекомендації щодо дій обговорюються? Які можливі підходи обговорюються суперечливо? «Як, наприклад, отримуються пропозиції щодо використання тих самих кодів? І хто визначає, які це коди?»

На другому етапі дослідники хочуть вивчити історичні докази: архівні суперечки, електронну пошту, наприклад, якими обмінювалися в 1970-х або 1980-х роках. Тоді комп'ютери вперше були впроваджені в наукову практику та використовувалися перші програмні пакети. Ленхард пояснює: «Навіть тоді виникали фундаментальні питання». Наприклад, чи повинні всі дослідники – з подібною темою дослідження – бути зобов'язані використовувати одну й ту саму комп'ютерну програму. «Ми хочемо з'ясувати, до чого змогли дійти згоди дослідники того часу. І, перш за все, чи змогли вони взагалі дійти згоди?» Разом зі своїми партнерами, дослідницькою групою в Університеті Лотарингії, яка досліджує історію обчислень, вони переносять цей погляд на історію науки.

Започаткування дискурсу для практики

Проект під назвою «Відтворюваність має політику» фінансується приблизно 500 000 євро протягом чотирьох років. Спираючись на отримані знання, Ленхард бачить своїм головним завданням ініціювання дискусії серед практиків. Він хоче бути своєрідним каталізатором — якщо дотримуватися аналогії з хімією: «Йдеться про рефлексію. І питання про те, що наука може і не може робити. Зрештою, йдеться про те, як наука повинна в ідеалі розвиватися».

Про фінансування Фонду Volkswagen

У рамках програми «Дослідження науки» Фонд Volkswagen підтримує міждисциплінарні, багатометодні та міжнародно орієнтовані дослідницькі проекти, об'єднуючи таким чином експертизу з різних галузей наукових досліджень. Це підтримує не лише відкриття нових знань, але й роздуми про стратегічне застосування отриманих результатів у контексті науки та політики вищої освіти [35].

Висновки за розділом 1

Наразі в гірничодобувній промисловості ключову роль у кар'єрних ЕАК відіграють гідравлічні кар'єрні екскаватори, виконуючи роботи з виїмки та навантаження підірваної скельної маси з надвисоким опором черпанню.

Наукове обґрунтування вантажно-транспортних процесів на відкритих гірничих роботах здебільшого полягає у визначенні послідовності видобутку та розподілу технологічних процесів мінералізованого матеріалу протягом періодів часу, що вимірюється місяцями, тижнями або днями. Ефективний короткостроковий графік виробництва забезпечує дотримання виробничих цілей та обмежень, що накладаються довгостроковим планом. Виокремлений тут метод окреслює новий підхід до одночасної оптимізації короткострокової виробничої послідовності з планом розподілу мобільного обладнання, враховуючи при цьому невизначеність, як сорту матеріалу, так і продуктивності обладнання. Впроваджено нову методологію моделювання для

створення більш реалістичних сценаріїв продуктивності обладнання, а також нову концепцію включення позицій рамп у формулювання для ефективного сприяння схемам видобутку. Ця короткострокова модель схожа з традиційною конструкцією на одному з найбільших мідних рудників у світі, і результати показують покращене дотримання виробничих цілей шляхом забезпечення більш стабільної кількості та якості руди до кожного пункту переробки, а також фізичну послідовність видобутку, яка має більшу ймовірність бути реалізованою в умовах невизначеності продуктивності обладнання та часу циклу вантажівки.

Розділ 2

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ БГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕАК НА ПРИКЛАДІ РОЗКРИВНИХ РОБІТ ЗВОРОТНИМИ ГІДРАВЛІЧНИМИ ЛОПАТАМИ

2.1. Загальна характеристика умов застосування гідравлічних екскаваторів типу зворотна гідравлічна лопата

Парк виїмково-вантажного обладнання на потужних кар'єрах в даний час значною мірою представлений екскаваторами типу зворотної гідравлічної лопати (ЕГЗ). При відпрацюванні вугленасичених зон складноструктурних вугільних родовищ, в силу конструктивних особливостей робочого обладнання, мобільності та автономності, зворотні гідравлічні екскаватори здатні виконувати, як видобувні, так і розкривні роботи більш ефективно порівняно з прямими механічними лопатами.

На кар'єрах провідних гірничодобувних країн при виконанні виймально-навантажувальних робіт в даний час усе чіткіше прослідковується тенденція до зростання в експлуатації частки екскаваторів, обладнаних зворотною гідравлічною лопатою з геометричною місткістю ковша понад 5 м^3 , переважно на базі зворотних гідравлічних лопат закордонного виробництва (LIEBHERR, CATERPILLAR, TEREX, HITACHI) [25, 26, 28, 29], які на кінець 2024 року складали близько 12%. За цей рік ними відвантажувалося понад 700 млн. м^3 гірничої маси у середньому на кожний з типових вугільних розрізів. За найближчі роки кількість екскаваторів типу зворотної гідравлічної лопати передбачається значно збільшити та довести річний обсяг робіт з їх використанням до 820-930 млн. м^3 гірничої маси на кожний із зазначених розрізів. При цьому середня місткість ковша становитиме понад 14 м^3 .

На початковому етапі впровадження на кар'єрах продуктивність цих машин на розкривних роботах була значно меншою за продуктивність, заявлену фірмами-виробниками. Це пояснюється не лише відсутністю

практичного досвіду експлуатації зворотних гідравлічних лопат, а й відсутністю рекомендацій, на основі яких можна було б забезпечити створення максимально сприятливих умов реалізації високих потенційних можливостей екскаваторів типу ЕГЗ (екскаватори гідравлічні зворотні). Тому, залишаючись відносно новим видом обладнання, зворотні гідравлічні екскаватори вимагають подальшої адаптації в частині наукового обґрунтування раціональних технологічних параметрів їх експлуатації.

Зворотні гідравлічні екскаватори є виїмковими машинами нижнього черпання, що зумовлює відпрацювання розвалу підірваної породи кількома шарами. Крім того, як показав досвід, *вони – дуже чутливі до якості вибухового дроблення гірничої маси*. Тому першочерговими технологічними напрямками підвищення ефективності їх експлуатації є обґрунтування параметрів буропідривних робіт (БПР) для забезпечення раціонального ступеня дроблення гірничої маси та раціональних параметрів вибою для максимальної реалізації конструктивних особливостей екскаваторів.

Питома витрата вибухової речовини (ВР) та діаметр вибухових свердловин відносяться до найбільш значущих керованих технологічних факторів, що впливають на якість дроблення породи. Наявні науково обґрунтовані рекомендації цих параметрів БПР відносяться тільки до прямих механічних лопат та драглайнів.

Раціональна потужність горизонтального шару при відпрацюванні розвалу підірваної гірничої маси екскаваторами типу ЕГЗ, як основа для проектування технологічних схем виїмково-навантажувальних робіт, також не досліджена достатньою мірою, що в практичних умовах призводить до необхідності орієнтуватися на власний індивідуальний і різноманітний досвід кар'єрів.

Обґрунтування і практичне застосування раціональних технологічних параметрів для зворотних гідравлічних лопат на кар'єрах, що включають питому витрату вибухової речовини, діаметр вибухових свердловин і потужність відпрацьованого шару розвалу підірваної гірської маси, дозволять

забезпечити більш високі техніко-економічні показники на кар'єрах, що зумовлює актуальність питання.

Найчастіше метою робіт даного спрямування є обґрунтування раціональних технологічних параметрів експлуатації зворотних гідравлічних лопат при виконанні розкривних робіт, що забезпечують підвищення їхньої ефективності. Відповідно, об'єктом дослідження є технологічні параметри розкривних робіт із використанням зворотних гідравлічних лопат на кар'єрах і вугільних розрізах, а предметом дослідження – техніко-економічні показники бурових, вибухових та виїмково-вантажних робіт при використанні зворотних гідравлічних лопат на кар'єрах і вугільних розрізах при розробці розкриву.

Ідея частіше полягає у встановленні характеру, а потім – використання впливу технологічних параметрів експлуатації зворотних гідравлічних лопат на техніко-економічні показники розробки розкриву в умовах кар'єрів і вугільних розрізів. Завдання досліджень при цьому здебільшого зосереджуються на тому, щоб:

- обґрунтувати питому витрату ВР при підготовці скельних порід до виїмки, що забезпечує раціональний ступінь дроблення при використанні зворотних гідравлічних лопат;

- обґрунтувати раціональний діаметр вибухових свердловин під час підготовки розкривних порід до екскавації з використанням зворотних гідравлічних лопат;

- встановити вплив параметрів розкривного вибою на продуктивність екскаватора й обґрунтувати раціональну потужність шару при розробці розвалу підірваної гірничої маси.

Методи досліджень частіше представляють собою: аналіз й узагальнення літературних джерел за методами та результатами дослідження ефективності розкривних робіт на кар'єрах, аналіз фактичних показників експлуатації зворотних гідравлічних лопат на вугільних розрізах, статистичну обробку фактичних показників роботи екскаваторів, математичне моделювання

техніко-економічних показників процесів бурових, вибухових та виїмково-вантажних робіт.

Науковими детермінативами означених напрямків досліджень слугують наступні спостереження і встановлені факти:

- зворотні гідравлічні екскаватори вимагають вищої якості вибухового дроблення розкривних порід, що зумовлює необхідність збільшення питомої витрати ВР на 4-15 % порівняно з базовими моделями прямих механічних лопат з порівнянною місткістю ковша;

- діапазон раціональних значень діаметра вибухових свердловин при підготовці розкривних порід до виїмки зворотними гідравлічними лопатами з геометричною місткістю ковша від 5 до 22 м³ для дрібно-, середньо- і крупноблочних покривних порід становить відповідно 170-240 мм, 170-220 і 170-190 мм;

- при шаровому відпрацюванні розвалу підірваної гірничої маси найбільша продуктивність зворотних гідравлічних лопат досягається при потужності шару, що дорівнює 0,5 максимальної глибини черпання при нижній установці автосамоскида щодо екскаватора і 0,4 максимальної глибини черпання з установкою автосамоскида на рівні стояння екскаватора.

Наукова новизна розглянутих нами робіт переважно при цьому полягає в:

- установленні закономірності зміни раціональної якості вибухового дроблення розкривних порід від місткості ковша екскаватора зворотних гідравлічних лопат та обґрунтування раціональної питомої витрати ВР за різних гірничотехнологічних умов їх експлуатації;

- обґрунтуванні діапазону раціональних значень діаметра вибухових свердловин при підготовці розкривних порід різної блочності для зворотних гідравлічних лопат на кар'єрах;

- розробці розрахункових моделей продуктивності зворотних гідравлічних лопат, залежно від потужності шару, що відпрацьовується, і рівня установки автосамоскида й обґрунтування потужності шару, за якої досягається максимальна продуктивність екскаватора.

Переважна спрямованість більшості вишукувань реалізується у постановці цілей та завдань досліджень; формулюванні основних ідей досягнення мети, організації збору та обробки хронометражних спостережень, розроблення структури моделей розрахунку техніко-економічних показників процесів вибухової підготовки та екскавації гірничої маси, узагальнення результатів досліджень, формулювання висновків та рекомендацій.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у більшості робіт, підтверджується:

- коректною структурою сукупності розрахункових формул для дослідження процесів вибухової підготовки й екскавації гірничої маси з обґрунтуванням адекватності всіх елементів розроблених моделей;

- несуперечливістю результатів і висновків та їх сумісністю з раніше виконаними дослідженнями;

- позитивними результатами дослідно-промислової перевірки окремих рекомендацій;

- фактично наявним на кар'єсах досвідом роботи екскаваторів типу ЕГЗ під час розкришних робіт.

Практична цінність виділених в результаті виконаного нами аналізу наукових досліджень робіт полягає в тому, що їхні результати дозволяють:

- проектувати параметри масових вибухів на кар'єрах, що забезпечують раціональний ступінь дроблення гірничої маси для використання зворотних гідравлічних лопат;

- обґрунтовано вибирати типорозмір бурових верстатів для роботи у складі розкривних гірничотранспортних комплексів на базі зворотних гідравлічних лопат;

- проводити оцінку технологічних схем розкривних робіт з позицій продуктивності екскаватора, проектувати технологічні схеми та паспорти вибоїв з параметрами, що забезпечують максимальну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу;

На відміну від типових підходів щодо вирішення означених вище задач, дана їх постановка полягає в обґрунтуванні й упровадженні комплексу раціональних технологічних параметрів експлуатації зворотних гідравлічних лопат на кар'єрах, що включають параметри буропідричних робіт та параметри технологічних схем розкривних робіт.

2.2. Переважна послідовність та етапна наповненість дослідження ефективності застосування зворотних гідравлічних лопат

Як правило, на першому етапі досліджень означеного спрямування виконуються огляд та аналіз наукової літератури з питань обґрунтування параметрів буропідричних робіт при транспортній технології розкриву на кар'єрах, технологічних схем виїмково-навантажувальних робіт з використанням зворотних гідравлічних лопат, а також наявного досвіду експлуатації цих екскаваторів на кар'єрах та вугільних розрізах.

Питома витрата ВР має визначальний вплив на якість підготовки порід до виїмки й ефективність основних подальших технологічних процесів – виїмково-вантажних робіт та транспортування. Найбільш повно й усебічно питання вибухової підготовки скельних порід до виїмки, включаючи обґрунтування раціональної питомої витрати ВР при використанні прямих мехлопат і драглайнів, представлені в роботах професорів І.Л. Гуменіка [10], Е.І. Єфремова [37], С.В. Тищенко [38], О.В. Шапуріна [39] й ін. Окремі аспекти процесу буропідричних робіт, з використанням методичних принципів згаданих авторів, досліджувалися безпосередньо робітниками ряду кар'єрів та вугільних розрізів гірничодобувних компаній Кривбасу (Скачков А.А. [40], Федін К.В. [11, 41], Перегудов В.В. [42], Генкуленко С.М. [43] й ін.).

На базі цих досліджень подекуди склалися усталені принципи обґрунтування параметрів буропідричних робіт для екскаваторів циклічної дії типу ЕКГ та ЕШ, які представлені у галузевих документах, типових технологічних схемах ведення гірничих робіт на кар'єрах та вугільних

розрізах, а також в затверджених у компаніях типових проектах масових вибухів. Поряд з цим для зворотних гідравлічних лопат, як нового виду виїмкових машин для розкришних робіт, науково обґрунтовані рекомендації щодо розрахунку раціональної питомої витрати досі були відсутні. Відомі роботи ІГД ім. А.А. Скочинського з дослідження технічних та технологічних характеристик зворотних гідравлічних екскаваторів, однак спрямованість цих досліджень не пов'язана з розробкою рекомендацій щодо обґрунтування питомої витрати ВР у різних гірничо-геологічних умовах на кар'єрах та вугільних розрізах.

Діаметр вибухових свердловин є другим за значимістю технологічним чинником після питомої витрати ВР, що суттєво впливає на якість дроблення гірничої маси. На деяких зарубіжних розрізах і кар'єрах з'явилася тенденція придбання верстатів із відносно великим діаметром буріння (понад 240 мм), ґрунтуючись виключно на збільшенні продуктивності бурового обладнання. Наявні в даний час рекомендації вищезгаданих авторів охоплюють широкий діапазон діаметрів свердловин (до 360-380 мм) як для слабких дрібноблочних, так і для міцних крупноблочних порід. Разом з тим збільшення діаметра вибухових свердловин, як показав практичний досвід, тягне за собою необхідність збільшення питомої витрати ВР, підвищений вихід негабариту, недостатнє опрацювання підшви уступу. Особливо негативно це позначається на ефективності застосування гідравлічних зворотних лопат, які є дуже чутливими до якості вибухової підготовки гірничої маси.

Паспортна глибина копання екскаваторами ЕГЗ в окремих випадках досягає 10-11 м, тому розвал підірваної гірської маси висотою до 16 м відпрацьовується шарами. Питання оптимізації потужності шару, що відпрацьовується з точки зору продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу при цьому в явному вигляді раніше практично не розглядався, а безпосередньо продуктивність розраховувалася або з найзагальніших теоретичних міркувань, або на основі силових і кінематичних характеристик існуючих і проєктованих моделей екскаваторів.

2.3. Аналіз методів обґрунтування раціональних параметричних показників щодо ЕАК з оберненою гідравлічною лопатою

На другому етапі частіше виконують обґрунтування раціональної питомої витрати вибухової речовини. Це завдання відноситься до оперативних технологічних рішень гірничого виробництва. Тому методологічним принципом оптимізації питомої витрати ВР з використанням одноковшових екскаваторів є мінімум сукупних експлуатаційних витрат на розробку покривельних порід. Крім того, було прийнято, що транспортна ланка екскаваторно-автомобільного комплексу має оптимальний кількісний склад, що дає підстави мінімізувати лише сумарні витрати на буропідrivну підготовку $C_{бвр}(q)$ та екскавацію гірничої маси $C_e(q)$:

$$C(q) = C_{бвр}(q) + C_e(q) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де q - гитома витрата ВР, кг/м³.

Вирішення цього завдання стає можливим зі з'ясуванням певної залежності продуктивності екскаватора, а також витрат на буропідrivну підготовку та виїмково-навантажувальні роботи від питомої витрати ВР.

Аналіз продуктивності екскаваторно-автомобільних комплексів виконано на основі фактичних даних про обсяги розкривних робіт та витрачений час за всіма кар'єрами, де експлуатуються зворотні гідравлічні екскаватори. Загальна кількість розглянутих проектів масових вибухів, що містять необхідну інформацію про умови ведення вибухових робіт та умови роботи екскаваторів до впровадження розроблених рекомендацій, становила понад 80 при загальному обсязі відвантаженої гірничої маси понад 11 млн. м³.

Порівняльний аналіз показав, що на той період часу досягнута екскаваторами ЕГЗ технічна продуктивність була на 20-30% меншою порівняно з екскаваторами типу ЕКГ. Причини полягають у співвідношенні

питомих силових характеристик цих типів машин. Питоме зусилля на 1 м кромки ковша для зворотних гідравлічних лопат становить 200-270 кН/м, а базових моделей прямих механічних лопат 340-500 кН/м. Крім того, питомі зусилля, що припадають на 1 т маси для зворотних гідравлічних лопат, які мають нижчу металомісткість, у 3-3,5 рази вищі, ніж у мехлопат. Низька металомісткість визначає нестійкість зворотних гідравлічних лопат при розробці крупнокускуватої гірничої маси.

Слід додати також, що наведена годинна продуктивність (на 1 м³ місткості ковша) зворотних гідравлічних лопат до впровадження розроблених рекомендацій становила 45-60 м³/год, тоді як заявлена фірмами-виробниками їх продуктивність очікувалася в межах 65-80 м³/год.

Як показав аналіз робочого циклу екскаваторів, для підвищення їх продуктивності є необхідним, зокрема, більш якісне вибухове дроблення гірничої маси. За даних умов розрахунок експлуатаційної продуктивності екскаватора за певний час ($Q_{\text{час}}^{(\text{екпл})}$, м³/год.) виконувався з використанням фактичних даних на базі паспортної продуктивності з урахуванням коефіцієнта ефективності екскавації, коефіцієнта впливу технології виїмки та коефіцієнта простою екскаватора, пов'язаного з нерівномірністю руху автосамоскидів:

$$Q_{\text{час}}^{(\text{екпл})} = (1 - P_{\text{е}}) \cdot k_{\text{ТВ}} \cdot K_0 \cdot Q_{\text{пасп.}} \quad (2)$$

де $P_{\text{е}}$ - коефіцієнт простою екскаватора, частка од.; $k_{\text{ТВ}}$ коефіцієнт впливу технології, частка од.; K_0 - коефіцієнт ефективності екскавації, що залежить від параметрів БВР і міцності порід, які підриваються.

Такий підхід дозволяє послідовно перейти від паспортної продуктивності до експлуатаційної продуктивності екскаватора через технічну продуктивність. Коефіцієнт технології виїмки прийнято за узагальненими рекомендаціями В. В. Ржевського для одноківшових екскаваторів ($k_{\text{ТВ}} = 0,85-0,9$), коефіцієнт простою – за результатами досліджень П.І. Томакова ($P_{\text{е}} = 0,1-$

0,15). Структура коефіцієнта ефективності екскавації, характерна для будь-яких типів одноковшових екскаваторів при розробці розкриттів покрівельних порід вугільних розрізів за результатами досліджень А.П. Кононова, А.С. Ташкінова дорівнює:

$$K_0 = 1 - \exp \left[-a \cdot \left(\frac{q}{d_{\text{скв}} \cdot f} \right)^b \cdot E^c \right], \quad (3)$$

де q - Питома витрата ВР, кг/м^3 ; $d_{\text{скв}}$ - діаметр свердловин, мм ; E - геометрична місткість ковша екскаватора, м^3 ; f - міцність порід за шкалою проф. М.М. Протодьяконова; a, b, c - постійні коефіцієнти, що характеризують тип екскаватора. Структура коефіцієнта ефективності екскавації забезпечує якісну адекватність при розрахунку продуктивності, залежно від питомої витрати ВР, діаметра свердловин, місткості ковша і міцності порід, а чисельні значення параметрів $a = 840$, $b = 2$, $c = 0,5$, визначені за фактичними даними про продуктивність, - кількісна відповідність стосовно розглянутих зворотніх механічних лопат. Відхилення фактичних значень продуктивності від розрахункових за серією проаналізованих масових вибухів не перевищує 12 %.

Витрати на вибухову підготовку гірничої маси до виїмки ($c_{\text{бвр}}$, грн./м^3) визначалися за сукупністю складових їх елементів з урахуванням ціни на тип ВР, що застосовується, фактичних нормативів витрати засобів підривання (ЗП), витрати бурового інструменту та інших впливових факторів:

$$c_{\text{бвр}} = c_{\text{бур}} + c_{\text{зп}} + c_{\text{вр}} + c_{\text{зз}} + c_{\text{др}} \quad (4)$$

де $c_{\text{бур}}$, $c_{\text{зп}}$, $c_{\text{вр}}$, $c_{\text{зз}}$, $c_{\text{др}}$ - питомі витрати, відповідно, на буріння, засоби підривання, ВР, зарядку та забивку, вторинне дроблення, грн./м^3 .

Маса екскаватора є найбільш значущим фактором, що впливає на витрати на його експлуатацію. На основі фактичних даних по всьому парку зворотніх гідравлічних лопат, а також нормативів з технічного обслуговування

встановлено статистичну залежність вартості машино-години роботи екскаватора ($C_{\text{м-год.}}^{\text{е}}$) від його маси:

$$C_{\text{м-год.}}^{\text{е}} = 15,4 M + 129,5; (R = 0,97) \quad (5)$$

де M – маса екскаватора, т.

Визначення раціональних значень питомої витрати ВР виконувалось на основі сукупності

Визначення раціональних значень питомої витрати ВР виконувалося на основі сукупності отриманих у рамках дослідження формул для розрахунку продуктивності та витрат з використанням критерію (2.1). За цією моделлю розроблено комп'ютерну програму в середовищі MS Excel, за допомогою якої виконано багатоваріантні розрахунки сукупних витрат на вибухову підготовку та виїмково-вантажні роботи в залежності від питомої витрати ВР. Фрагменти інтерфейсу програми та результатів виконаних розрахунків показані на рис. 2.1 та в табл. 2.1.

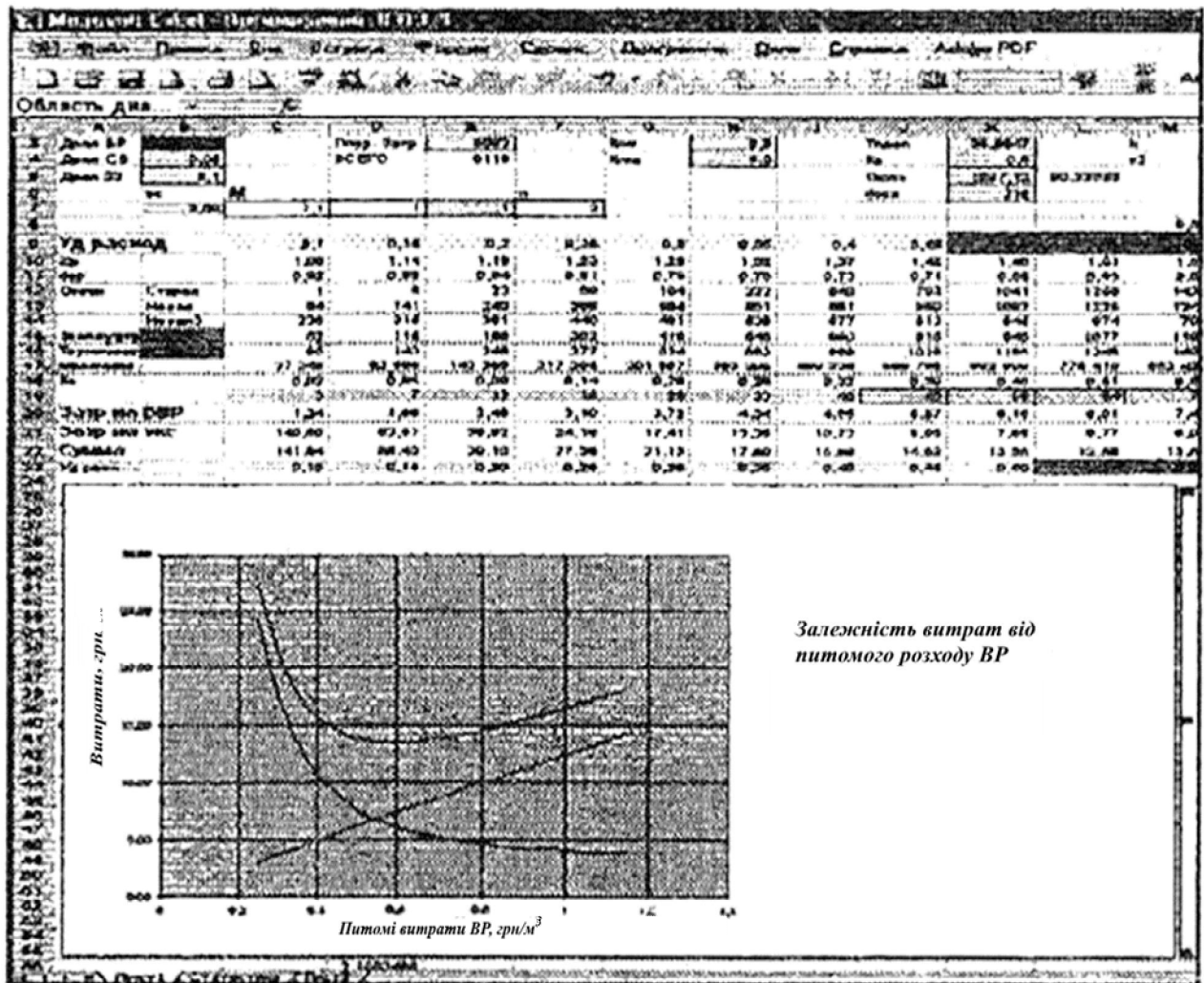


Рис. 2.1. Фрагмент інтерфейсу програми оптимізації питомої витрати ВР

Порівняння існуючих рекомендацій за величиною питомої витрати ВР для екскаваторів ЕКГ з отриманими результатами розрахунку для екскаваторів типу ЕГЗ показало, що для зворотних гідравлічних лопат раціональна питома витрата має бути вищою на 4-15%. При цьому велика різниця відповідає міцнішим породам та більшим значенням місткості ковша екскаватора.

Таблиця 2.1

Раціональні значення питомої витрати ВР при підготовці розкривних порід для зворотних гідравлічних лопат, $d_{св} = 216$ мм.

Міцність порід, МПа	Екскаватор, геометрична ємність ковша, м ³		
	5,2	11	20,6
50	0,48	0,46	0,44
70	0,68	0,64	0,61
90	0,87	0,82	0,78
110	1,06	1,00	0,96
120	1,16	1,10	1,04

Рациональні питомі витрати $ВР$ відповідають раціональна якість дроблення $d_{\text{ср}}$, м – діаметр середнього за об'ємом шматка підірваної гірничої маси та раціональний ступінь дроблення (Z , частки. од.) – відношення діаметра середньої за обсягом природної окремоті вибухового масиву до середнього за об'ємом шматка підірваної гірничої маси. Значення цих показників якості дроблення розраховувалися відповідно до раніше встановлених і статистично обґрунтованих формул гранулометрії гірських порід при вибуховому руйнуванні.

На рис. 2.2 показано характерні залежності раціональних значень якості та ступеня дроблення підірваної гірничої маси в залежності від місткості ковша екскаваторів ЕКГ та ЕГЗ. Видно, що для зворотних гідравлічних лопат середній розмір шматка підірваної гірничої маси має бути меншим, а ступінь дроблення гірничої маси – більшою, ніж для екскаваторів ЕКГ. При цьому інтенсивність зміни цих показників у міру збільшення місткості ковша – менша для екскаваторів ЕГЗ.

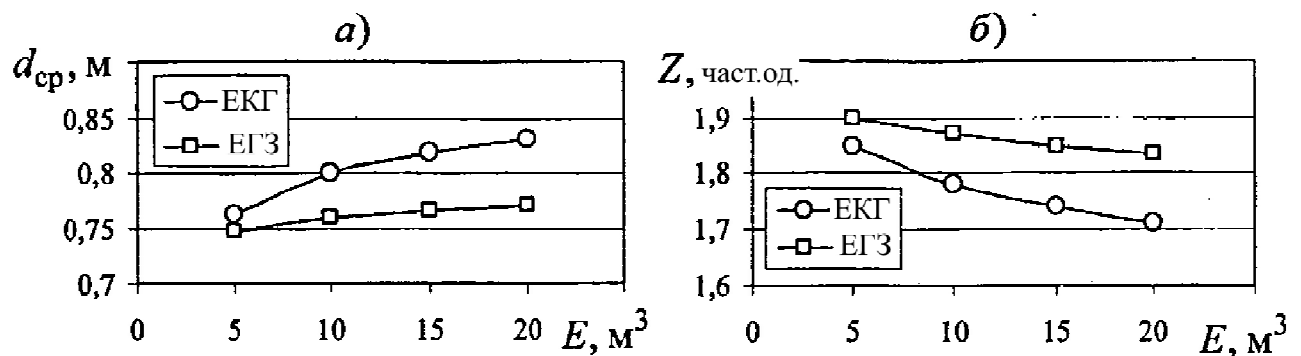


Рис. 2.2. Залежність раціональних значень середнього шматка підірваної гірничої маси (a) та ступеня дроблення (b) від ємності ковша для екскаваторів ЕКГ та ЕГЗ

Отриманий результат свідчить, що зворотні гідравлічні лопати – більш чутливі до якості вибухової підготовки гірничої маси і, відповідно, вимагають більшої питомої витрати ВР, ніж прямі механічні лопати з порівнянною місткістю ковша. На цій підставі доведено — зворотні гідравлічні екскаватори вимагають вищої якості вибухового дроблення розкривних порід, що зумовлює необхідність збільшення питомої витрати ВР на 4-15 % порівняно з базовими моделями прямих механічних лопат з порівнянною місткістю ковша.

Дослідно-промислова перевірка, підтвердила, що при раціональних значеннях питомої витрати ВР експлуатаційна продуктивність екскаваторів ЕГЗ в розрахунку на 1 м³ місткості ковша – на 20-30% вище, ніж екскаваторів типу ЕКГ.

На третьому етапі нами було згруповано дослідження впливу діаметра вибухових свердловин на техніко-економічні показники БВР з використанням зворотних гідравлічних лопат.

Як відмічалось вище, зворотні гідравлічні лопати є виїмковим обладнанням, надзвичайно чутливим до якості дроблення підірваної гірничої маси. Розроблені в попередньому підрозділі рекомендації щодо вибору раціональних значень питомої витрати ВР були ранжовані за різними фактично існуючими діаметрами свердловин. Ці рекомендації не дають відповіді на питання про те, який діаметр свердловин і, отже, типорозмір бурового верстата є найбільш доцільним для екскаваторів, що розглядаються.

Разом з тим, значимість діаметра свердловин як одного з параметрів БПР, що впливають на якість дроблення гірської маси, – дуже велика.

Зменшення діаметра свердловин дає можливість знизити питому витрату ВР за рахунок більш рівномірного розподілу ВР в масиві та меншої довжини перебуру свердловин відносно підосви уступу. Однак при цьому має місце зниження продуктивності бурового обладнання, як за довжиною пробурених

свердловин, так і за оббуреним обсягом. З іншого боку, збільшення діаметра свердловин пов'язане з необхідністю практично пропорційного збільшення питомої витрати ВР.

Різнострамована зміна витрат на бурові роботи та вибухові матеріали в залежності від діаметра свердловин є передумовою існування такого його значення, при якому мають місце мінімальні сукупні витрати.

Наявні в даний час рекомендації щодо вибору діаметра вибухових свердловин на кар'єрах та вугільних розрізах розроблені 30-40 років тому і відносяться до застарілих типів шарошкових бурових верстатів та вітчизняних кар'єрних екскаваторів.

Зокрема, для кар'єрних мехлопат із місткістю ковша від 8 до 20 м³, які застосовуються при транспортній системі розробки розкривних порід, рекомендуються діаметри буріння до 380 мм. Як показує практика, автоматичне перенесення цих рекомендацій на нові типи обладнання призводить до суттєвого зниження ефективності розкривних робіт.

Для вирішення поставленого в даному розділі завдання були виконані аналіз і дослідження нормативів змінної продуктивності та вартості машинозміни (включаючи вартість бурового інструменту) наявних на кар'єрах сучасних бурових верстатів (фірм ATLAS COPCO, INGERSOLL-RAND та ін) залежно від діаметра бурового інструменту при різних значеннях міцності порід (рис. 2.3).

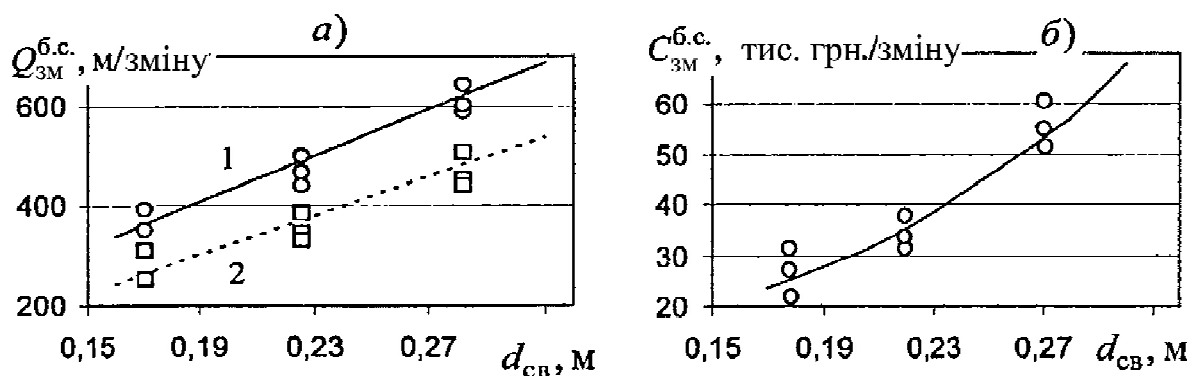


Рис. 2.3. Фактичні дані та розрахункові залежності змінної продуктивності (а) та вартості машино-зміни (б) шарошкових бурових верстатів від діаметра бурового інструменту: 1 – $\sigma_{см} = 50$ МПа; 2 – $\sigma_{см} = 90$ МПа

Між міцністю і блочністю (або тріщинуватістю) розкривів покрівельних порід існує статистично обґрунтований взаємозв'язок — $d_e = 0,02\sigma_{cm}$, де d_e - діаметр середньої за обсягом природної окремоті, м. Тому закономірності зміни питомої витрати вибухової речовини і продуктивності бурових верстатів, витрат на буровибухові роботи в залежності від діаметра свердловин дозволили встановити в свою чергу закономірності зміни витрат на БВР залежно від категорії порід по блочності для різних типорозмірів екскаваторів (рис. 2.4).

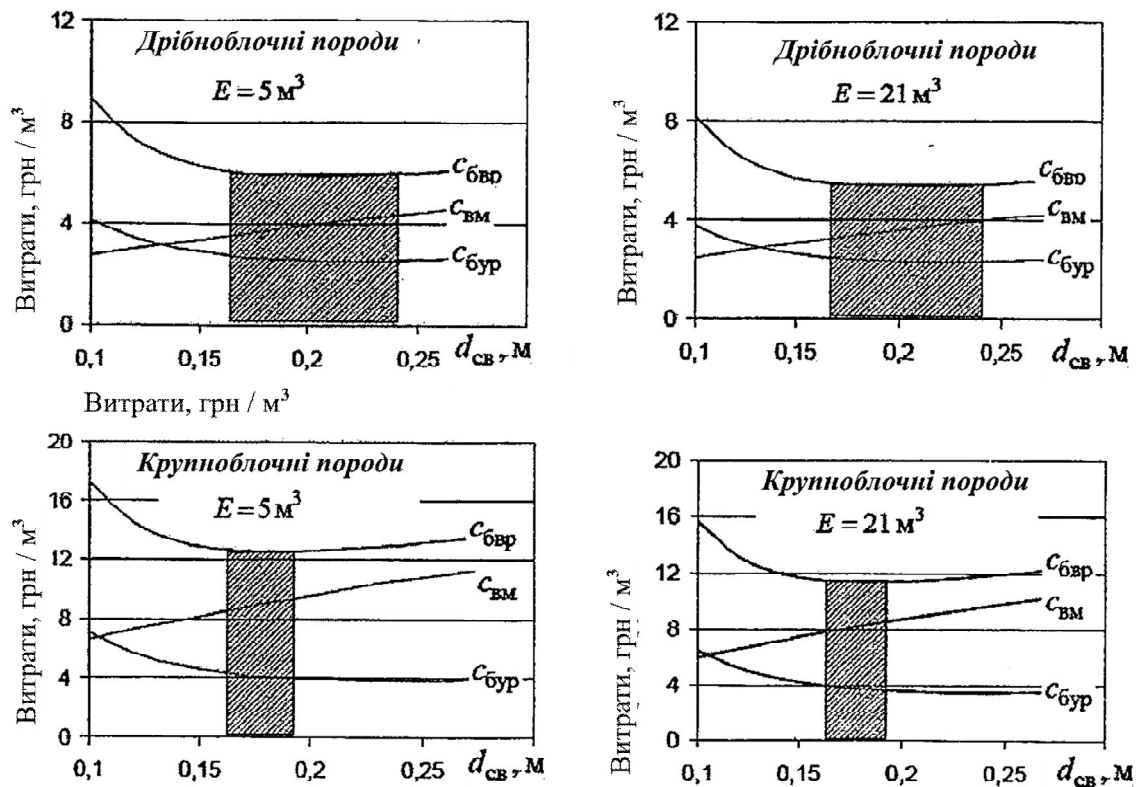


Рис. 2.4.. Залежність питомих витрат (грн./м³) на буріння ($C_{бур}$), вибухові матеріали ($C_{вм}$) та буропідривні роботи ($C_{бвд}$) від діаметра вибухових свердловин

Видно, що діапазон раціональних значень діаметра свердловин при дрібноблочних породах – ширший, ніж при крупноблочних. При цьому межі діапазону не залежать від місткості ковша типорозмірів екскаваторів, що розглядаються.

Таким чином доведено, що діапазон раціональних значень діаметра вибухових свердловин при підготовці розкривних порід до виїмки зворотними гідравлічними лопатами з геометричною місткістю ковша від 5 до 22 м³ для

дрібно-, середньо-і крупноблочних розкривних порід становить відповідно 170-240, 170-220 і 170-190 мм.

На четвертому етапі було виконано обґрунтування раціональної потужності шару розробки розвалу підірваної гірничої маси.

Досвід виконання розкривних робіт з використанням зворотних гідравлічних лопат з геометричною місткістю ковша від 5 до 21 м³ і глибиною черпання від 8 до 10 м на більшості кар'єрів свідчить про те, що розвал підірваної породи відпрацьовується кількома шарами. Потужність шару при цьому встановлюється дуже індивідуально за наявним на тому чи іншому кар'єрі досвідом і становить від 1,5-2,0 м до величини, що близька до максимальної глибини черпання. Установка автосамоскида може передбачатися нижче, на рівні або вище за рівень установки екскаватора. Збільшення потужності шару до розмірів, близьких до максимальної глибини черпання екскаваторів, призводить до суттєвого зниження технічної та експлуатаційної продуктивності. При цьому очевидним також є те, що зменшення потужності шару до малих значень пов'язане з втратою продуктивності, принаймні, за рахунок збільшення часу на пересування екскаватора і перегони уздовж блоку, що відпрацьовується. Таким чином, є передумови вважати, що існує така потужність шару, коли ефективна продуктивність екскаватора (годинна продуктивність з урахуванням тривалості допоміжних операцій) є максимальною.

У цій частині продуктивність екскаватора визначалася при раціональній якості дроблення розкривних порід, виходячи з обсягу та часу відпрацювання забійного блоку, а також з урахуванням часу пересування екскаватора, можливого часу очікування автосамоскида заданої вантажопідйомності та часу зачистки вибою:

$$Q_{\text{час}}^{(\text{експл})} = \frac{V_{\text{з.бл.}}}{T_{\text{отр.бл.}}}; \quad T_{\text{отр.бл.}} = \frac{V_{\text{з.бл.}} \cdot 60}{n_k \cdot k_e \cdot E \cdot t_{\text{цт}}} + T_{\text{оч}} + T_{\text{пдг}} + T_{\text{пер}}, \quad (6)$$

де n_k - кількість ковшів в автосамоскид, шт.; k_e - коефіцієнт екскавації; $t_{цт}$ - технологічний цикл екскаватора, с.; $T_{оч}$, $T_{підг}$, $T_{пср}$ - тривалість очікування автосамоскида, підготовки вибою, пересування екскаватора, хв.

Цей метод розрахунку продуктивності дозволяє цілеспрямовано досліджувати вплив потужності шару, що відпрацьовується.

Залежність тривалості циклу екскаватора від факторів, що впливають, встановлювалася за результатами поопераційного хронометражу близько 250 циклів у різних гірничотехнічних умовах роботи екскаватора. Деякі результати моделювання технологічного циклу та обробки хронометражних спостережень представлені наступними розрахунковими формулами.

Тривалість розвантаження (с.):

$$t_{розв.} = 2,6 \sqrt[3]{E} , \quad (7)$$

де E – геометрична місткість ковша, m^3 .

Тривалість операції повороту-опускання ковша (с.):

$$t_{опуск} = \frac{1}{v_{опуск}} \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot \alpha_{пов} \cdot (R_{чу} + 2)}{360} \right)^2 + (c_2 \cdot h_{сл} + h_{ас} + 2)^2 \right]^{0,5} , \quad (8)$$

де $R_{чу}$ - радіус черпання на рівні установки, м; $v_{опуск}$ - лінійна швидкість ковша в процесі повороту та опускання (1,8 м/с.); $\alpha_{пов}$ - кут повороту екскаватора, град.; $h_{сл}$ – потужність шару, м; c_2 - ознака рівня установки автосамоскида (c_2 - 0 при нижній установці, $c_2 = 1$ при установці вище рівня стояння екскаватора); $h_{ас}$ - висота автосамоскиду на рівні козирка, м.

Формула розрахунку тривалості повороту-підйому ковша має аналогічний вигляд.

Тривалість часу $t_{нап}$ (с.) наповнення ковша ($R = 0,97$):

$$t_{\text{нап}} = 4,2 E^{0,45} \left[1 + 2 \cdot \left(0,25 - \frac{h_{\text{сл}}}{R_{\text{чу}}} \right) \right]. \quad (9)$$

Структура коефіцієнта екскавації залежно від факторів, що впливають, прийнята за аналогією з результатами раніше виконаних досліджень для екскаваторів ЕКГ та ЕШ, що визначає якісну адекватність і спільність підходу до його розрахунку по відношенню до існуючих методів. Кількісна відповідність забезпечувалася даними про коефіцієнт розпушення в ковші екскаватора, максимально можливий коефіцієнт наповнення ковша (стандарт SAE 1:1) та результати візуальної оцінки коефіцієнта наповнення при раціональному ступені дроблення (рис. 2.5).

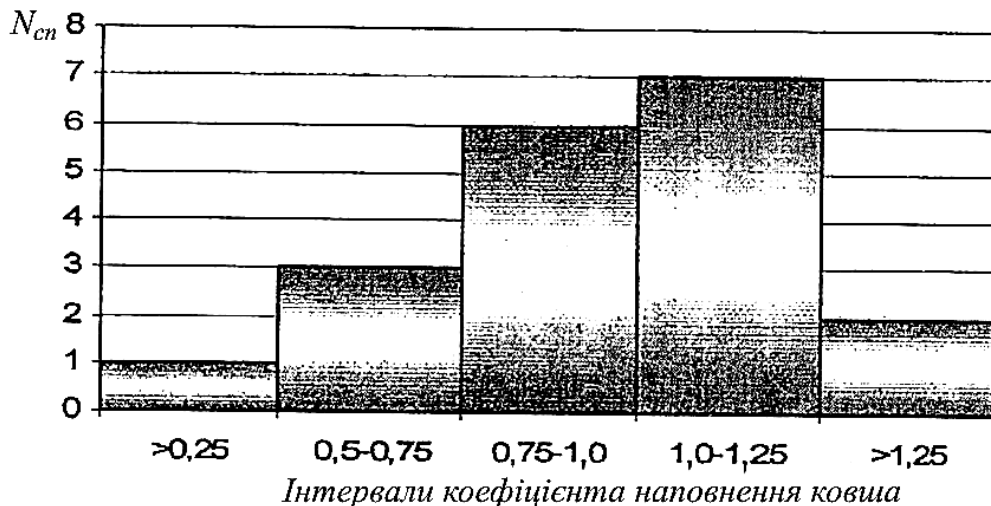


Рис. 2.5. Розподіл коефіцієнта наповнення ковша

На основі дослідження тривалості екскаваторного циклу, коефіцієнта екскавації та розрахунку обсягу забійного блоку складено та реалізовано на ПК програму розрахунку продуктивності екскаватора, залежно від потужності шару та інших впливових факторів, включаючи висоту підйому ковша та кут повороту екскаватора.

Розрахунки продуктивності екскаватора в залежності від потужності шару та з урахуванням допоміжних операцій виконані в усьому практично можливому діапазоні зміни таких факторів, як кут повороту екскаватора,

висота автосамоскида, довжина пересування, тривалість простою екскаватора в очікуванні автосамоскида та ін. Основний результат полягає в тому, що існує потужність шару, за якої має місце максимальна продуктивність (рис. 2.6), що обумовлено існуванням максимального (залежно від потужності шару) об'єму забійного блоку.

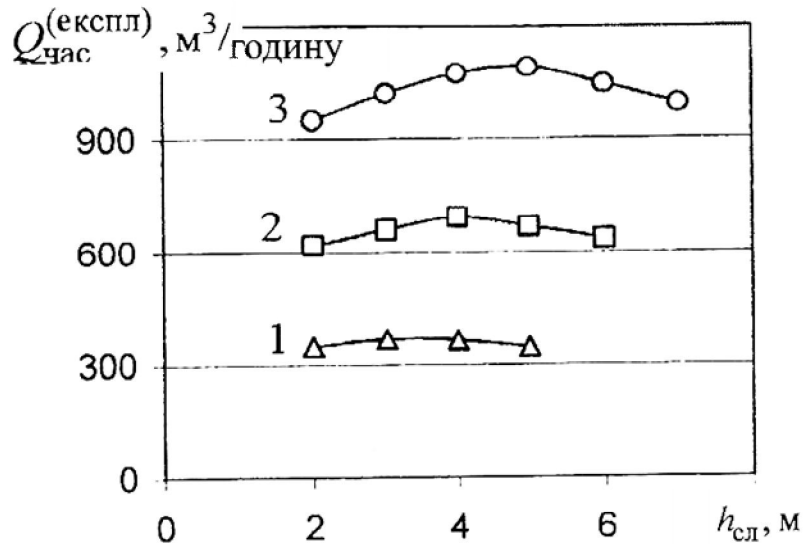


Рис. 2.6. Залежність продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу в часі ($Q_{час}^{експл}, м³/год$) від потужності шару ($h_{сл}, м$) при нижній установці автосамоскида:
 1. Liebherr-984C ($5,2 м³$);
 2. Liebherr-994C ($11 м³$);
 3. Terex RH-200 ($21 м³$)

Це пояснюється наступним. По-перше, існує максимальний щодо потужності шару об'єм забійного блоку (заштрихована область на рис. 2.7, представлена для випадку максимально можливої величини пересування), що визначає найменшу кількість пересувок при відпрацюванні шару. По-друге, при відповідній потужності шару положення рукояті та стріли екскаватора забезпечують відповідно до технічної документації найбільші зусилля при наборі ковша, що приводить до меншого часу черпання та більшого коефіцієнта заповнення.

Об'єм забійного блоку розраховувався за його геометричними характеристиками — потужністю шару, що відпрацьовується, фактичного

пересування екскаватора, радіуса і траєкторії черпання ковша, кута укосу вибою відповідно до схем, представлених на рис. 2.7-2.8.

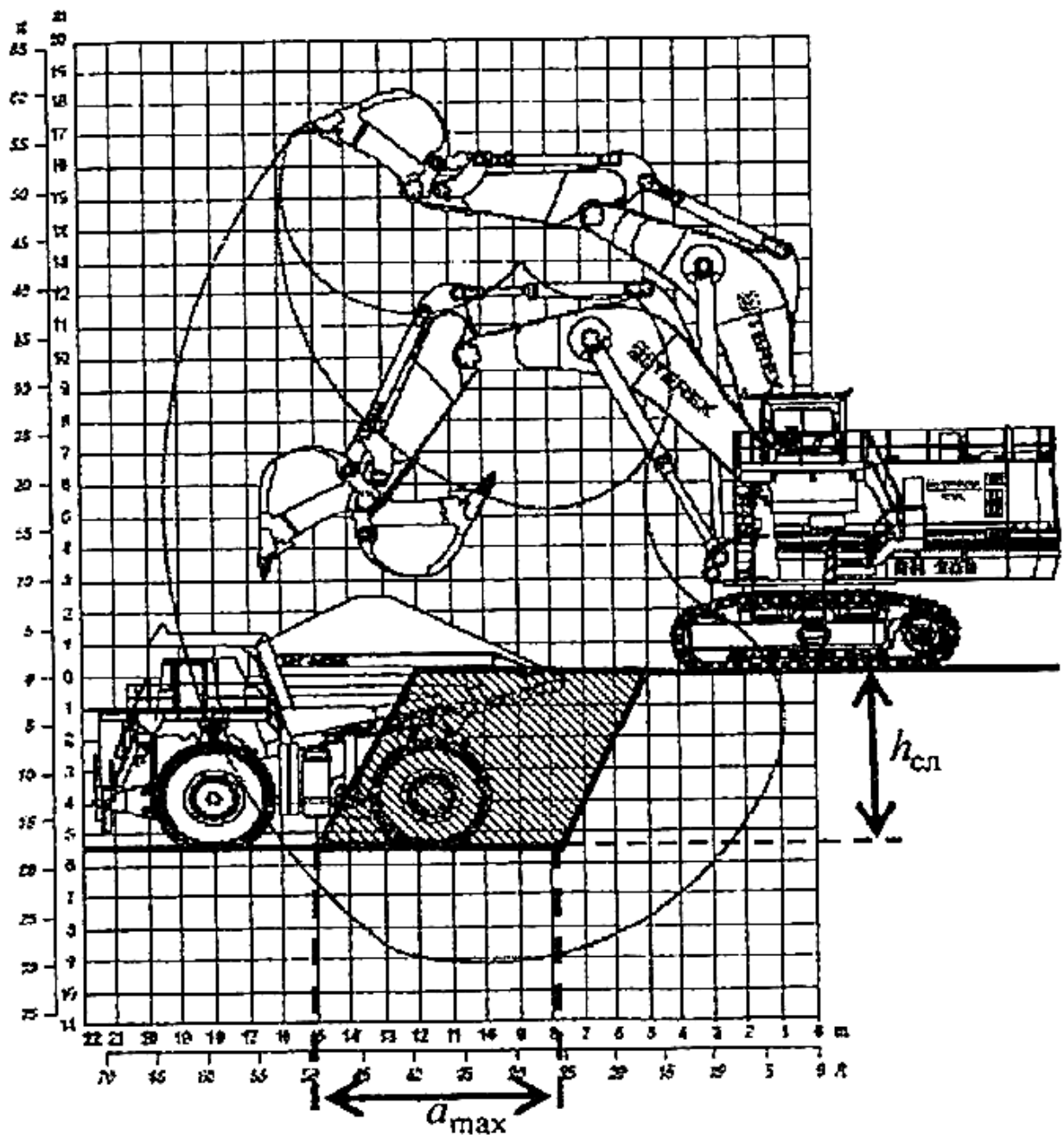


Рис. 2.7. Схема до взаємозв'язку висоти шару з об'ємом забійного блоку

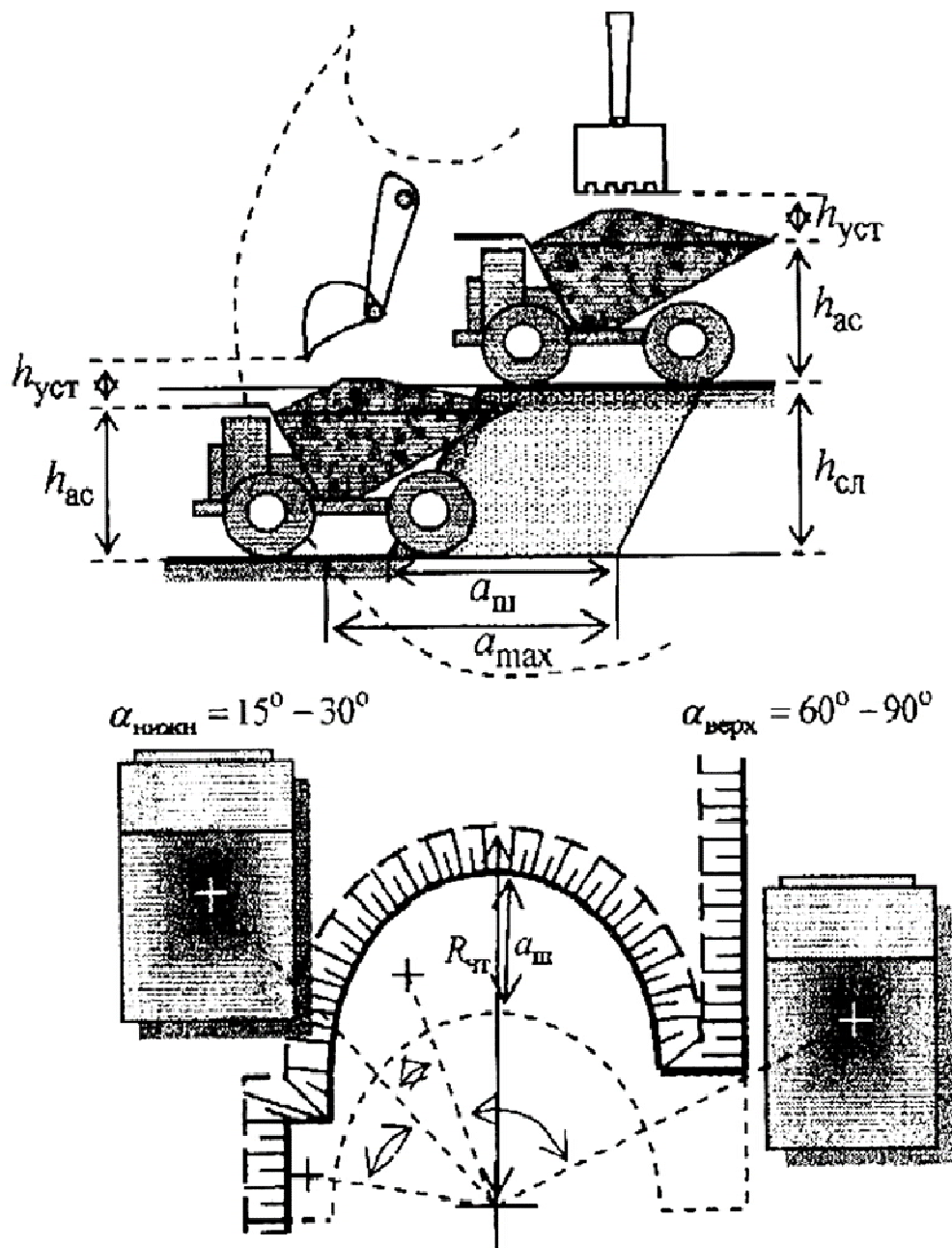


Рис. 2.8. Схеми до визначення висоти підйому ковша та кута повороту екскаватора

Деяка відмінність положення максимуму при встановленні автосамоскида на рівні підосви шару і на рівні установки екскаватора пов'язана зі збільшенням часу циклу за рахунок більшої висоти підйому ковша

Зокрема, для екскаваторів з типовими розмірами стріли та рукояті при місткості ковша від 5 м³ (LIEBHERR-984C) до 21 м³ (TEREX RH-200) потужність шару представлена у табл. 2.2.

Раціональна потужність шару підірваної гірничої маси

Місце установки а/с	Liebherr-984C	Liebherr-994	Terex RH-200
Нижня установка а/с:			
від	3,0	4,0	4,5
до	3,5	4,5	5,0
Верхня установка а/с:			
від	2,0	3,0	3,5
до	2,5	3,5	4,0

Узагальнюючи отриманий результат, можна зробити висновок, що при пошаровому відпрацюванні розвалу підірваної гірничої маси найбільша продуктивність зворотних гідравлічних лопат досягається при потужності шару рівній 0,5 максимальної глибини черпання при нижній установці автосамоскида щодо екскаватора і 0,4 максимальної глибини черпання з 0,4 максимальної глибини.

2.4. Промислова перевірка рекомендацій та оцінка їхньої економічної ефективності

П'ятий етап виконаного нами аналізу був присвячений дослідно-промисловій перевірці розроблених названими вище дослідниками рекомендацій та оцінці їхньої економічної ефективності.

У 2008 р. виконувалася дослідно-промислова перевірка раціональних значень питомої витрати ВР при виконанні розкривних робіт зворотними гідравлічними екскаваторами.

При переході на рекомендовані питомі витрати ВР при підготовці порід для екскаваторів LIEBHERR-984C, 994, 9350 та TEREX RH-200 має місце збільшення фактичної змінної продуктивності в середньому на 22-26% при розрахунковому зниженні витрат на вибухову підготовку та виїмково-навантажувальні роботи.

Дані про результати деяких дослідно-промислових вибухів наведено в табл. 2.3 (переважають — крупноблочні породи, діаметр вибухових свердловин – 216 мм.).

Таблиця 2.3.

Порівняльна оцінка добової продуктивності зворотних гідравлічних лопат за результатами дослідно-промислових вибухів

Дата масового вибуху	Екскаватор	$q_{вр}$, кг/м ³	Об'єм блока, тис. м ³	Добова продуктивність, м ³ /добу.		
				в період розробки	досягнута раніше за 6 міс.	приріст, %
08.12.07	№61	0,944	112	14960	12035	24
10.12.07	№99	1,031	64	13420	9986	34
14.12.07	№61	0,937	65	14035	12035	16
11.01.08	№99	0,950	140	13840	9986	38
20.01.08	№61	1,070	250	13938	12035	15

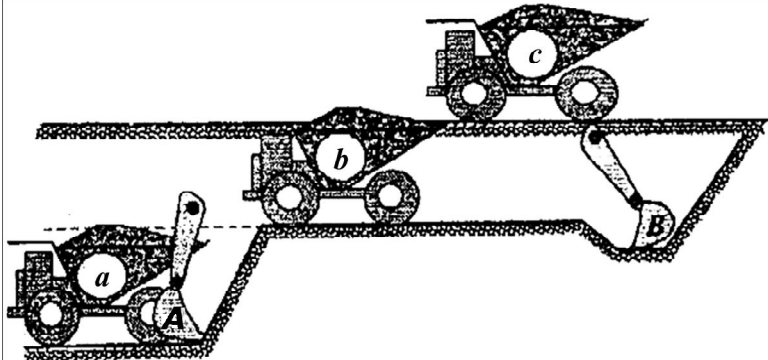
Продуктивність 1 м³ ковша зворотних гідравлічних лопат збільшилася до середніх значень, заявлених фірмами-виробниками (близько 70 м³/год.), та перевищила відповідну продуктивність екскаваторів типу ЕКГ.

Гірничо-геологічні умови вугільних розрізів Кривбасу зумовлюють велику різноманітність можливих варіантів організації виїмкових робіт.

Розроблені розрахункові формули тривалості окремих операцій робочого циклу зворотних гідравлічних лопат дозволяють виконати орієнтовну укрупнену оцінку експлуатаційної продуктивності кар'єрного екскаватора за коефіцієнтом зниження продуктивності при різних поєднаннях рівнів черпання гірничої маси – нижнє черпання або черпання на рівні стояння екскаватора, і рівні шару, на рівні стояння екскаватора, вище за рівень стояння екскаватора (табл. 2.4).

Таблиця 2.4.

Коефіцієнти зниження продуктивності при різних поєднаннях ознак рівня черпання та рівня встановлення автосамоскида

	Ознака черпання	Ознака рівня установки автосамоскида		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
<i>A</i>		1,00	0,77	0,72
<i>B</i>		0,62	0,55	0,61

Така оцінка продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу використовується при оперативному плануванні продуктивності безпосередньо на розрізах і в рудних кар'єрах, а також може бути використана під час проектування відповідних технологічних схем виїмкових робіт.

Висновки за розділом 2

В розглянутих прикладах на основі встановлених закономірностей зміни раціональної якості вибухового дроблення розкривних порід від місткості ковша екскаватора зворотних гідравлічних лопат, обґрунтування діапазону раціональних значень діаметра вибухових свердловин та розробленої моделі розрахунку продуктивності зворотних гідравлічних екскаваторів і автосамоскида, узагальнено раціональні технологічні параметри виконання розкривних робіт зворотними гідравлічними лопатами на рудних кар'єрах та вугільних розрізах, що має важливе значення для гірничодобувних підприємств галузі з відкритим способом розробки родовищ.

Основні наукові та практичні результати виконаного в даному розділі роботи аналізу, висновки та рекомендації полягають у наступному.

1. Зворотні гідравлічні екскаватори при розробці розкривних порід кар'єрів та вугільних розрізів вимагають більш високої якості вибухової підготовки, яка в меншій мірі залежить від геометричної місткості коша, і зумовлює необхідність збільшення питомої витрати ВР на 4-15%, в порівнянні

з базовими моделями прямих механічних. Вищі витрати на вибухову підготовку гірничої маси до виїмки компенсуються зниженням витрат на виїмково-навантажувальні роботи, зумовлене підвищенням технічної продуктивності екскаваторів.

2. Розроблені раніше рекомендації щодо вибору діаметра вибухових свердловин для екскаваторів типу прямої механічної лопати передбачають доцільність застосування діаметрів буріння до 320-380 мм. Ці рекомендації не можуть бути автоматично перенесені на зворотні гідравлічні екскаватори.

3. Збільшення діаметра свердловин пов'язане зі збільшенням зони нерегульованого дроблення, зростанням величини перебуру свердловин відносно підшви уступу, необхідністю підвищення питомої витрати ВР та погіршенням опрацювання підшви уступу.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КАР'ЄРНИХ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ З УРАХУВАННЯМ ПОЗАПЛАНОВИХ ПРОСТОЇВ

3.1. Загальна характеристика функцій і роботи ЕАК кар'єру і переважні підходи дослідників до її вирішення

Спираючись на дослідження [23], можна констатувати наступне. Обсяг твердих корисних копалин, що видобувається відкритим способом, становить понад 75% від усього їх видобутку. За цих умов однією з найбільш важливих залишається проблема підвищення експлуатаційної продуктивності екскаваторно-автомобільних комплексів (ЕАК), на яку впливають параметри гірничих машин, що взаємодіють у часі та просторі, а також позапланові їх простой (ПП), які можуть займати до 57% робочого часу, що нерідко призводить до тимчасового припинення робіт і, як наслідок, зниження продуктивності гірничого підприємства.

Ступінь розробленості. Обґрунтуванню, моделюванню й оптимізації екскаваторно-автомобільних комплексів присвячені роботи багатьох вчених, серед яких: В.В. Ржевський [12], К.М. Трубецької [13], К.Ю. Аністратов [14], В.Ф. Бизов [8], С.О Пригунов [1], Б.Л. Геріке [44], В.С. Квагінідзе [45], Д.А. Кузієв [46], а також А. Krause [47], S. Alarie [21] та інші.

Аналіз досліджень і розробок цих авторів дозволив виявити таке:

- недостатньо детально враховується вплив причин та тривалості простоїв на ефективність роботи екскаваторно-автомобільних комплексів, що призводить до спотворених оцінок при виборі оптимальних параметрів ЕАК;
- не повною мірою враховується імовірнісна взаємодія екскаваторів та автосамоскидів у часі та просторі, що не дозволяє уникнути помилок у плануванні організації робіт і призводить до невідповідності розрахункової

(планової) та фактичної величин продуктивності екскаваторно-автомобільних комплексів;

- відсутній облік впливу на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільних комплексів можливих альтернативних варіантів комбінування параметрів гірничих машин, при цьому можливий пропуск раціонального варіанта призводить до необґрунтованої витрати ресурсів під час проведення відкритих гірничих робіт;

- не вирішено завдання багатофакторної багатокритеріальної оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів з одночасним підвищенням продуктивності при мінімізації вартості робіт.

У зв'язку з цим домінанта більшості досліджень подібного спрямування спрямована на оптимізацію параметрів кар'єрних екскаваторно-автомобільних комплексів з урахуванням позапланових простоїв, що виключає наведені вище недоліки, є актуальною.

Переважно метою робіт є конкретизація сучасних принципів оптимізації параметрів кар'єрних екскаваторно-автомобільних комплексів з урахуванням позапланових простоїв для підвищення ефективності відкритих гірничих розробок. За цих умов ідея часто базується на спільному використанні еволюційного алгоритму й аналітико-імітаційного моделювання технологічних процесів для оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу. Об'єктом досліджень здебільшого стає екскаваторно-автомобільний комплекс для відкритих гірничих робіт, а предметом – параметри роботи екскаваторно-автомобільного комплексу, що залежать від гірничо-технічних умов експлуатації.

Досягнення поставленої мети переважно вирішують взаємозалежні завдання:

1. Розробка аналітико-імітаційної моделі функціонування екскаваторно-автомобільного комплексу з урахуванням позапланових простоїв.

2. Визначення ступеня впливу позапланових простоїв на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу.

3. Розробка програмно-методичного забезпечення визначення оптимальних параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу з урахуванням позапланових простоїв.

Методологія досліджень включає в себе:

- аналіз та узагальнення літературних джерел з проблематики досліджень;
- методи математичного моделювання, включаючи теорію масового обслуговування, дискретно-подійне імітаційне моделювання, евристичну багатофакторну оптимізацію при побудові та аналізі оптимізаційної моделі екскаваторно-автомобільного комплексу;
- методи математичної статистики та теорії ймовірностей при аналізі причин та тривалості простоїв обладнання ЕАК;
- пасивні методи експериментальних досліджень під час моніторингу використання обладнання екскаваторно-автомобільного комплексу;
- об'єктно-орієнтоване програмування під час аналізу результатів оптимізованих параметрів роботи ЕАК.

Наукові пріоритети, які переважають у сучасних дослідженнях:

1. Детермінативи впливу позапланових простоїв, що характеризуються періодичністю та тривалістю, що підпорядковуються гамма-розподілу, на зниження добового видобутку сировини в вибої порівняно з плановою при прийнятній довірчій ймовірності.

2. Як критерій оцінки впливу позапланових простоїв на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільних комплексів (K_i) дозволяє виявляти найбільш значущі за періодичністю виникнення та тривалості позапланові простої екскаваторів та автосамоскидів і враховувати їх внесок при оптимізації параметрів ЕАК.

3. Чому оптимальні параметри екскаваторно-автомобільних комплексів визначаються застосуванням еволюційного алгоритму з оцінкою експлуатаційної продуктивності ЕАК та питомих витрат на навантаження та транспортування гірничої маси за допомогою аналітико-імітаційного

моделювання спільної роботи екскаваторів та автосамоскидів з урахуванням їх позапланових простоїв.

Наукова новизна більшості з виділених нами підходів полягає у:

- розробленні аналітико-імітаційних моделей функціонування екскаваторно-автомобільних комплексів, що відрізняються ухуванням у мережі масового обслуговування (ММО) затримок заявок у приладах обслуговування, рівних величині позапланових простоїв екскаваторів і автосамоскидів;

- розроблення критерію оцінки впливу позапланових простоїв екскаваторів та автосамоскидів K_i , який є середнім значенням між коефіцієнтами детермінації періодичності виникнення простою та його тривалості;

- постановки та розв'язання загального завдання багатфакторної багатокритеріальної оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів з використанням програмно-методичного забезпечення, заснованого на еволюційній оптимізації та аналітико-імітаційному моделюванні функціонування ЕАК з урахуванням динаміки та ймовірнісної природи технологічних процесів, а також позапланових простоїв.

Достовірність результатів розглянутих досліджень даного напрямку здебільшого підтверджується застосуванням авторами апробованих класичних методів аналітико-імітаційного моделювання, теорії ймовірностей, математичної статистики й оптимізації, планування експериментів; збіжністю результатів моделювання з фактичними показниками роботи кар'єрів для тих самих умов експлуатації.

Зміст та теоретична значимість виділених підходів частіше усього полягає в розвитку неklasичних методів еволюційної оптимізації параметрів ЕАК з урахуванням впливу позапланових простоїв екскаваторів та автосамоскидів за допомогою аналітико-імітаційного моделювання технологічних процесів.

Практичне значення подібних досліджень визначається головним чином тим, що запропонований підхід, реалізований у вигляді програмно-

методичного забезпечення для вибору оптимальних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів з урахуванням позапланових простоїв, може бути використаний у проектуванні відкритих гірничих робіт, а також при обґрунтуванні режимів роботи кар'єрів.

Наукові пріоритети, які переважають у сучасних дослідженнях, загалом полягають в наступному:

- систематизації простоїв екскаваторів та автосамоскидів з установленням законів їх розподілу;
- розроблення аналітико-імітаційної моделі функціонування ЕАК з урахуванням позапланових простоїв гірничих машин у вигляді замкнутої мережі масового обслуговування;
- розробленні критерію значимості впливу позапланових простоїв на експлуатаційну продуктивність ЕАК;
- розроблення програмно-методичного забезпечення для вибору оптимальних параметрів ЕАК з урахуванням позапланових простоїв гірничих машин;
- проведенні обчислювальних експериментів з оцінки впливу обліку позапланових простоїв кар'єрних екскаваторів та автосамоскидів на добову експлуатаційну продуктивність ЕАК, з подальшою оцінкою ефективності заходів щодо їх мінімізації;
- визначенні оптимальних параметрів ЕАК на прикладі умовних і діючих кар'єрів.

В результаті розглянутих досліджень було створено спеціалізовані системи підтримки прийняття рішень: «Система імітаційного моделювання для оптимізації параметрів кар'єрних екскаваторно-автомобільних комплексів з урахуванням ймовірнісних простоїв» та «Комп'ютерна система імітаційного моделювання для дослідження параметрів безлюдної відкрито-підземної геотехнології».

Також було розроблено «Методику оптимізації кар'єрних екскаваторно-автомобільних комплексів з урахуванням позапланових простоїв»,

рекомендовану до реалізації в проектних організаціях, кар'єрах та на вугільних розрізах.

3.2. Переважна послідовність та тематична етапність реалізації досліджень щодо оптимізації ЕАК з урахуванням ПП обладнання

Даний третій розділ магістерської роботи головним чином присвячено аналізу методів оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу (ЕАК) з урахуванням позапланових простоїв. При чому, в ньому узагальнено підхід більшості дослідників щодо визначення цілей та завдань для досягнення запланованої мети, а також – нормативного формулювання головних наукових положень та критеріїв оцінки їх теоретичних і практичних рівнів та значущості запланованих і отриманих результатів.

На першому кроці підготовки даного розділу було визначено ряд основних параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу, що використовуються для визначення ефективності його роботи. З використанням елемента комбінаторики "поєднання" доведено, що кількість можливих варіантів комплектації параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу може досягати сотень тисяч, що значно ускладнює завдання вибору оптимального рішення. У цьому відношенні можливий пропуск раціонального варіанта призводить до необґрунтованої витраті ресурсів під час проведення відкритих гірничих робіт. Тому було проведено аналіз стану та тенденцій розвитку методів математичного моделювання й оптимізації параметрів кар'єрних екскаваторно-автомобільних комплексів, в результаті якого виявлено недоліки, що призводять до спотворених оцінок при виборі оптимальних параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу.

На другому кроці – проаналізовано проблему, для *вирішення якої виконано систематизацію простоїв екскаваторів і автосамоскидів у вигляді багаторівневої схеми*. Частина пропонованої схеми, що відображає причини простоїв автосамоскидів, представлена на рис. 3.1.

Тут необхідно зауважити, що повна схема включає в себе мінімум 151 причину простоїв.

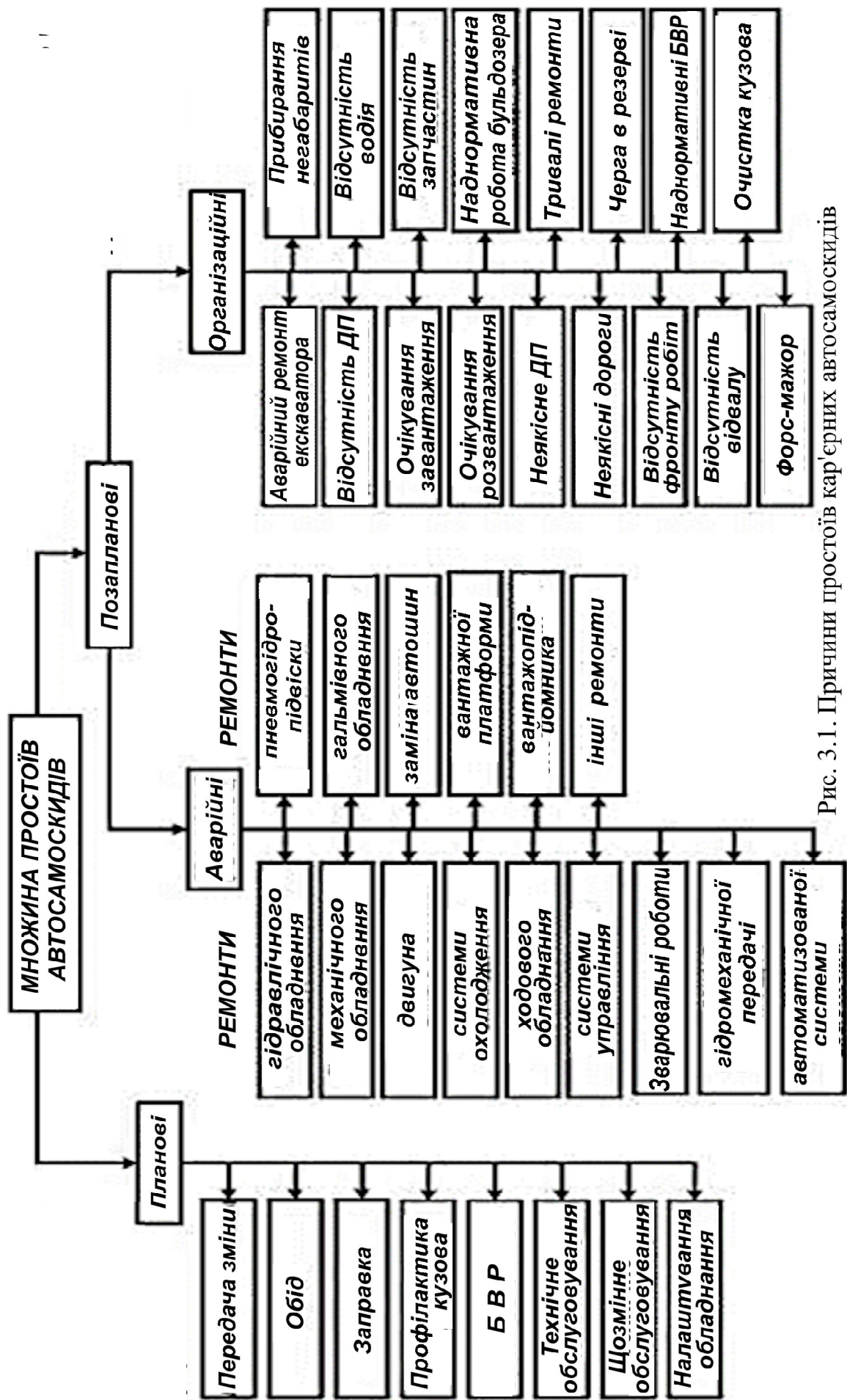


Рис. 3.1. Причини простоїв кар'єрних автосамоскидів

Ідентифіковано закони розподілу періодичності та тривалості позапланових простоїв з використанням методів статистичного аналізу. На рис. 3.2 як приклад представлена гістограма і полігон спостережуваних частот при ідентифікації закону розподілу тривалості ймовірнісного простою через ремонт гідравлічного обладнання автосамоскидів марки БелАЗ-7513, що працюють на кар'єрі «Барзаський».

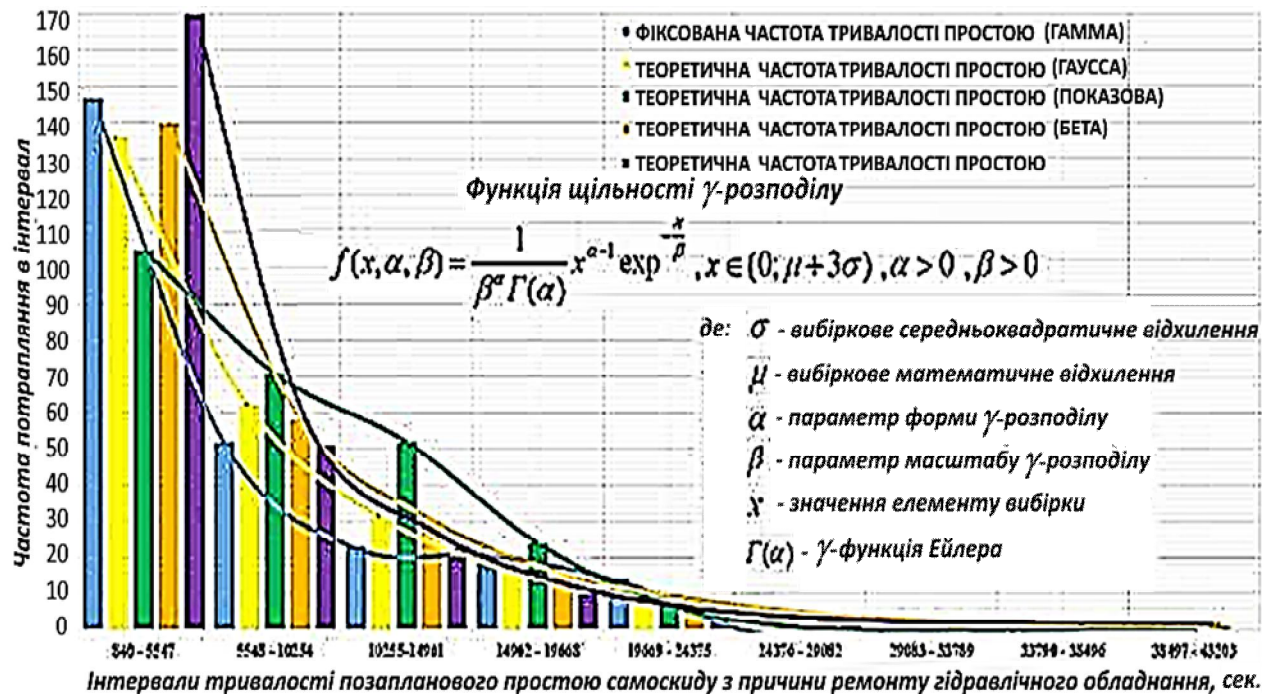


Рис. 3.2. Гістограма і полігон частот, що спостерігаються при ідентифікації закону розподілу тривалості ПП з причини ремонту гідравлічного обладнання автосамоскидів

Розроблено концептуальну аналітико-імітаційну модель функціонування ЕАК з урахуванням позапланових простоїв. Розроблено математичні моделі основних процесів як систем масового обслуговування (ММО). Процеси «прибуття та встановлення автосамоскидів під навантаження/розвантаження» відображаються ММО виду $g/g/m/N$, процес «завантаження автосамоскидів екскаватором» – ММО виду $g/g/1/0$, а процес «розвантаження автосамоскидів» – ММО виду $g/g/m/0$. Моделі процесів об'єднано в єдину мережу масового обслуговування виду $(g/g/m/N) U (g/g/1/0) U (g/g/m/N)$, структурну схему якої представлено на рис. 3.3.

У ММО заявки є автосамоскидами різних типорозмірів.

Приладами, які обслуговують ці заявки, є вибої, екскаватори та пункти розвантаження.

Тривалість обслуговування заявок у кожному приладі залежить від гірничо-технічних умов експлуатації, фізико-механічних властивостей гірських порід і параметрів екскаваторів та автосамоскидів.

Тривалість затримки заявок у вибої відображена у вигляді функції:

$$t_{\text{ман.заб.}} = f(n_i) \quad (3.1)$$

де n – тип прийнятої схеми виконання маневрових робіт (тупикова, наскрізна, петльова з розворотом).

Тривалість затримки заявок у приладах, що відображають екскаватори, представлена вигляді функції:

$$t_{\text{вант.}} = f(E_{\text{екс.}}, d_{\text{фр.}}, k_{\text{н.к.}}, q_{\text{мах.}}, k_{qAC}, k_p, N_k, C_k, \beta, \rho) \quad (3.2)$$

де $E_{\text{екс.}}$ - ємність ковша екскаватора, м³; $d_{\text{фр.}}$ - середній розмір підірваної гірської породи, м; $k_{\text{н.к.}}$ - коефіцієнт наповнення ковшу екскаватора; $q_{\text{мах.}}$ - вантажопідйомність автосамоскида, тонн; k_{qAC} - коефіцієнт використання вантажопідйомності автосамоскида; k_p - коефіцієнт розпушування гірських порід; N_k - кількість ковшів, що розвантажуються екскаватором в кузов автосамоскида, шт.; C_k - співвідношення лінійних розмірів ковша та найбільшого розміру найбільшого шматка підірваної гірської породи; β , - кут поворота екскаватора, град.; ρ - щільність гірських порід, т/м³.

Тривалість затримки заявок у пунктах розвантаження подано у вигляді функцій:

$$t_{\text{ман.разг.}} = f(r_{AC}, R_{\text{ман.разг.}}, L_{\text{ман.}}, l_{ac}, L_{\text{ос.дор.}}, V_{\text{ср.разг.}}) \quad (3.3)$$

де r_{AC} - мінімальний радіус повороту автосамоскида, м; $R_{ман.разг.}$ - радіус повороту автосамоскида при виконанні маневрових операцій на розвантаження, м; $L_{ман.}$ - довжина маневрового шляху під час виконання маневрових операцій на розвантаження, м; l_{ac} - довжина автосамоскида, м; $L_{ос.дор.}$ - відстань між осьовими лініями доріг, м; $V_{ср.разг.}$ - швидкість маневрування кар'єрних автосамоскидів у пунктах розвантаження, м/с.

$$t_{разг.} = f(t_{под.куз.}, t_{опуск.куз.}) \quad (3.4)$$

де $t_{под.куз.}$ - час підйому кузова автосамоскида, сек; $t_{опуск.куз.}$ - час опускання кузова автосамоскида, сек.

Для обліку позапланових простоїв екскаваторів і автосамоскидів у ММО уведено додаткове джерело, що генерує заявки через імовірнісні інтервали часу.

При генерації ці заявки затримують заявки-автосамоскиди на час їх простою, а також закривають своєрідні клапани і обмежують доступ заявок-автосамоскидів до обслуговуючих пристроїв.

Умови відкриття ($K = 1$) та закриття ($K = 0$) клапанів:

$$K = 1, \text{ при } \begin{cases} m_{св.} < m \\ D_{екс.} = 1 \end{cases}, \quad (3.5)$$

$$K = 0, \text{ при } \begin{cases} m_{св.} = 0 \\ D_{екс.} = 0 \end{cases}, \quad (3.6)$$

де $D_{екс.}$ - доступність екскаватора (1 - доступний; 0 - недоступний); $m_{св.}$ - кількість вільних місць біля екскаватора до і після навантаження автосамоскидів, що знаходяться в інтервалі $0 \leq m_{св.} \leq m$, m - кількість каналів багатоканального пристрою «Забій», шт.

Експлуатаційна продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу визначається інтенсивністю вихідного потоку в ММО, а питомі витрати на навантаження і транспортування гірських порід – кількістю та типом заявок у вхідному потоці, а також кількістю та типом приладів обслуговування.

ММО є замкнутою з обмеженою кількістю заявок, що відповідає кількості автосамоскидів.

Шляхом програмної реалізації ММО через мову імітаційного моделювання GPSS World, розроблено й апробовано на ряді підприємств аналітико-імітаційну модель з урахуванням позапланових простоїв, що складається з 7 сегментів:

1. Прибуття автосамоскидів і присвоєння їм значень параметрів;
2. Робота екскаваторів та автосамоскидів у вибої;
3. Транспортування гірських порід у пункт розвантаження та повернення автосамоскидів до екскаватора;
4. Робота автосамоскидів у пунктах розвантаження;
5. Простої екскаваторів та їх тривалість;
6. Простої автосамоскидів та їх тривалість;
7. Розрахунок об'єму підірваних гірських порід.

У такій моделі окремі заявки ММО відповідають основним значимим динамічним елементам – транзактам даної імітаційної моделі, які рухаються в ній від блоку до блоку та, затримуючись у цих відзначених блоках, відображають технологічні процеси екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру.

Тривалість затримки транзактів у блоках, встановлюється шляхом уведення гамма-розподілу з відповідними параметрами, отриманими за хронометражними даними.

У разі відсутності в кар'єрі можливості проведення хронометражу тривалість основних часових показників визначається за відомими аналітичними формулами.

Надходження самоскидів до пункту розвантаження

Початок збору статистики про чергу під розвантаження

Мітка, що самоскид перебуває в черзі

Заняття місця самоскидами в пункті розвантаження

Кінець збору статистики про чергу під розвантаження

Мітка, що самоскид перебуває в пункті розвантаження

Виконання маневрових операцій при розвантаженні

Розвантаження самоскида

TRANSFER

END

Фіксація обсягу доставлених самоскидами гірських порід

Фіксація здійсненого рейсу автосамоскидами

Контроль перевезення самоскидами обсягу гірських порід

Фіксація місця самоскида в пункті розвантаження

Мітка, що самоскиди знаходяться в пункті розвантаження

Дані про планові та позапланові простой

Mathematical formulas:

$$P_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n P_j}$$

$$f(t_{ij}) = \frac{1}{\beta_j \cdot \Gamma(\alpha_j)} \cdot t^{\alpha_j-1} \cdot \exp^{-t/\beta_j}$$

$$t_{sum} = 1.5 \cdot (t_{sum,1} + t_{sum,2})$$

Математичне очікування інтервалів надходження автосамоскидів до пункту розвантаження ($\mu_{\text{транс.}}$) визначається як середній час транспортування гірських порід від вибою до пункту розвантаження ($t_{\text{транс.}}$) за формулою:

де S - дальність транспортування, м; L_j - довжина j -ої ділянки траси, м; $V_{cp.}$ - середня технічна швидкість руху автосамоскидів, м/с; $V_{cp.j}$ - середня технічна

швидкість руху автосамоскидів, на j -ій ділянці траси, м/с; U - кількість ділянок траси (вибійна, кар'єрна, траншейна, відвальна).

Математичне очікування тривалості виконання маневрових операцій автосамоскидами перед розвантаженням ($\mu_{\text{ман.роз.}}$) визначається за формулою:

$$t_{\text{ман.роз.}} = \frac{4 \cdot l_{\text{ас}} + \pi \cdot (1.45 \cdot r_{\text{ас}}) + L_{\text{ос.дор.}}}{V_{\text{ср.разг.}}}, \quad (3.8)$$

а тривалість розвантаження ($t_{\text{разг.}}$)

$$t_{\text{разг.}} = 1.5 \cdot (t_{\text{под.куз.}} + t_{\text{опуск.куз.}}), \quad (3.9)$$

де $r_{\text{ас}}$ - мінімальний радіус повороту автосамоскида, м; $L_{\text{ман.}}$ - довжина маневрового шляху при виконанні маневрових операцій на розвантаження, м; $l_{\text{ас}}$ - довжина автосамоскида, м; $L_{\text{ос.дор.}}$ - відстань між осьовими лініями доріг, м; $V_{\text{ср.разг.}}$ - швидкість маневрування кар'єрних автосамоскидів у пунктах розвантаження, м/с; $t_{\text{под.куз.}}$ - час підйому кузова автосамоскида, сек; $t_{\text{опуск.куз.}}$ - час опускання кузова автосамоскида, сек.

Значення середньоквадратичного відхилення інтервалів надходження автосамоскидів до пункту розвантаження, а також тривалість маневрових операцій перед розвантаженням і самого розвантаження (σ_i) визначаються згідно з правилами 3-х сигм за формулою:

$$\sigma_i = \frac{t_i}{3}, \quad (3.10)$$

де i - тип операції (транспортівання, маневрування).

Оцінено адекватність аналітико-імітаційної моделі, що проводилося шляхом порівняння даних диспетчерських звітів автоколон за минулим періодом з результатами моделювання для тих самих умов експлуатації. В результаті розбіжність не перевищила 10%.

Проведено оцінку ступеня впливу позапланових простоїв на видобуток із вибою кар'єру. Наприклад, на рис. 3.5 представлено результати одного з обчислювальних експериментів з оцінки добового обсягу видобутку вибою з урахуванням різних видів простоїв. Імітувалася робота одного екскаваторно-автомобільного комплексу, що діє в умовах модельного середньостатистичного кар'єру (МСК).

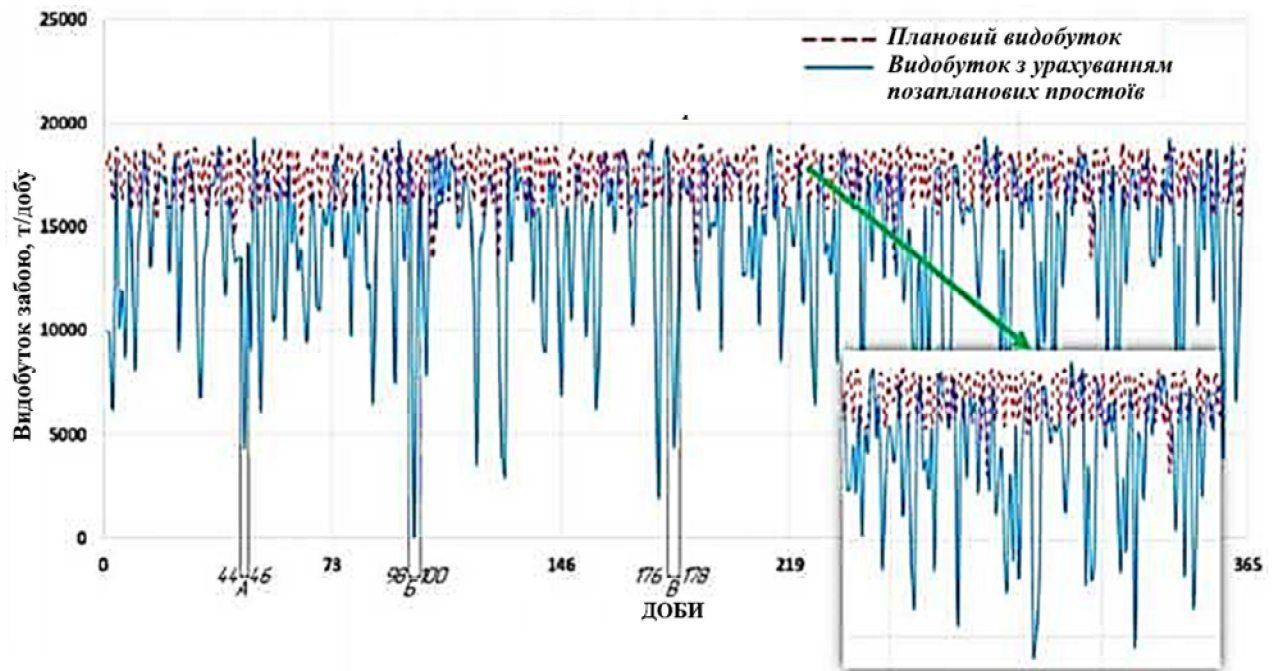


Рис. 3.5. Динаміка добового видобутку вибою з урахуванням простоїв

Пунктирна лінія відображає плановий видобуток вибою, суцільна – видобуток з урахуванням позапланових простоїв технічного й організаційного характеру. Видно, що плановий видобуток відрізняється від видобутку з урахуванням позапланових простоїв, де виникають «періоди провалів видобутку». Так, в період (А), протягом 44-46 діб відбувалися простої, пов'язані зі заміною гідроциліндра підйому стріли та гідромотора екскаватора, протяжкою коліс автосамоскидів, ремонтом їх пневмогідропідвіски (ПГП), охолодженням та ремонтом гідросистеми у автосамоскидів. У період (Б), 98-100 добу проводилися ремонт двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), заміна рукава високого тиску (РВТ), ремонт гідравлічної частини екскаватора, підкачування колеса, ремонт гідросистеми, ходової частини та системи

управління автосамоскидів і т.д. Аналогічним чином було проведено обчислювальні експерименти ще з низки кар'єрів.

3.3. Оцінка впливу позапланових простоїв гірничих машин на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу

Третій крок полягав у діях, за яких було сформовано рішення стосовно другого завдання. Виконано оцінку ступеня впливу пропозицій щодо мінімізації позапланових простоїв гірничих машин на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу. Як приклад використання аналітико-імітаційної моделі для мінімізації простоїв екскаватора і автосамоскидів була організована робота екскаватора в підготовлених вибоях на два під'їзди з задовільним станом під'їзних і забійних автодоріг (рис. 3.6).

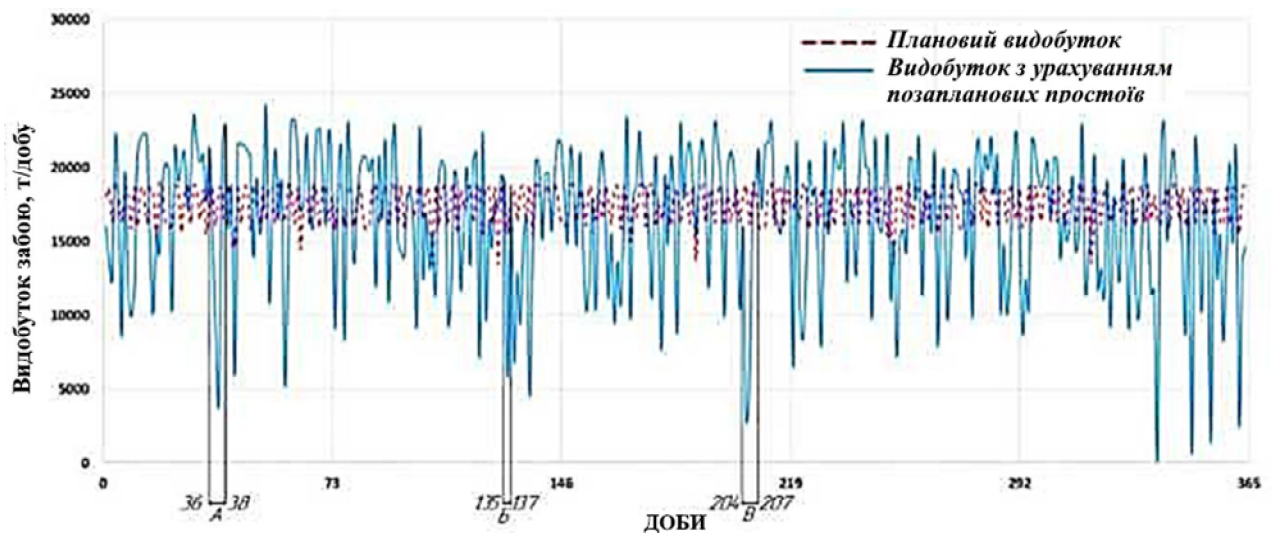


Рис. 3.6. Динаміка видобутку вибоєм з урахуванням різних видів простоїв (організація роботи екскаватора на два під'їзди)

Встановлено, що організація роботи екскаватора на два під'їзди не лише зменшує відхилення планового видобутку вибоєм від видобутку з урахуванням позапланових простоїв на 11,7%, а й збільшує видобуток вибоєм в середньому на 5,4%.

Досліджено характер впливу періодичності та тривалості позапланових простоїв на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу.

На прикладі умов з ЕАК, що включає екскаватор НІТАСНІ ЕХ-1900 з ковшем місткістю 11 м³ і чотири автосамоскиди марки БелАЗ-7513 вантажопідйомністю 130 тонн, встановлено ряд залежностей.

Наприклад, на рис. 3.7 видно, що збільшення періодичності позапланових простоїв кар'єрного екскаватора через ремонт його гідравлічного обладнання в інтервалі від 340 до 936 годин, збільшує експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу на 1,61-4,36%, при постійних тривалостях між 7,86 і 25,94 годин відповідно.

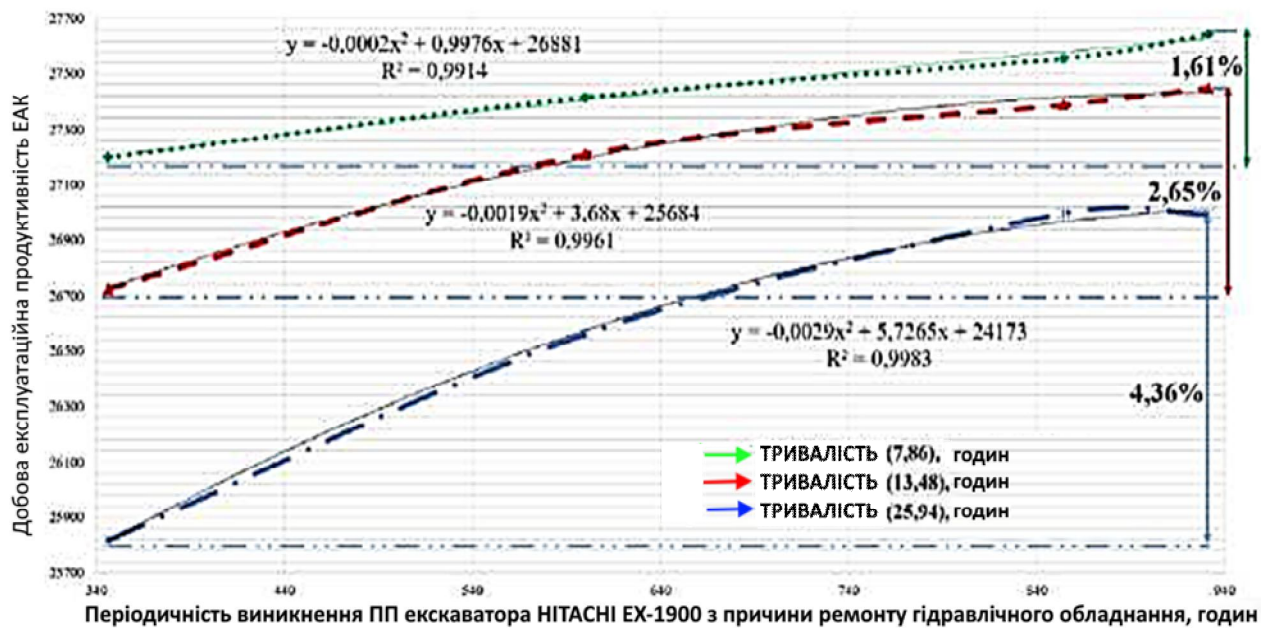


Рис. 3.7. Ремонт гідравлічного обладнання екскаватора Hitachi EX-1900 (періодичність)

Розроблено критерій оцінки впливу періодичності та тривалості позапланових простоїв на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу. Одним з найбільш поширених та опрацьованих формалізмів виявлення ступеня впливу факторів на відгук у моделях, що враховують імовірнісні процеси, є дисперсійний аналіз. Так як ПП характеризується періодичністю його виникнення та тривалістю, переважно застосовують двофакторний дисперсійний аналіз.

У цьому прийнято, що чинник A_i - математичне очікування тривалості i -го ймовірнісного простою, сек; фактор B_j - математичне очікування періодичності виникнення j -го ймовірнісного простою; відгук Y_{ij} - добова

експлуатаційна продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу т/добу. Вибірковий коефіцієнт детермінації кожного з факторів, що показує ступінь його впливу, визначався за формулою:

$$\tilde{\rho}_k^2 = \frac{\tilde{\sigma}_k^2}{\tilde{\sigma}_Y^2}, \quad (3.11)$$

де $\tilde{\rho}_A^2$ - дисперсія групових середніх за k -им фактором; $\tilde{\sigma}_Y^2$ - загальна вибіркова дисперсія.

Для розрахунку значимості впливу ймовірнісного простою на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу запропоновано критерій:

$$K_i = \frac{\tilde{\rho}_A^2 + \tilde{\rho}_B^2}{2}. \quad (3.12)$$

де $\tilde{\rho}_A^2$ - вибірковий коефіцієнт детермінації фактора – тривалість простою, $\tilde{\rho}_B^2$ - вибірковий коефіцієнт детермінації фактора – періодичність простою при наступних обмеженнях:

$$\tilde{\rho}_A^2 \neq 0; \tilde{\rho}_B^2 \neq 0.$$

Здійснено ранжування ступеня впливу позапланових простоїв на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу. З використанням розробленого критерію (формула (3.12)) встановлено, що найбільше впливають позапланові простої через відсутність автосамоскидів ($K_i = 47,22\%$), а найменше – очікування навантаження ($K_i = 28,20\%$). Урахування тільки найбільш значущих позапланових простоїв на основі критерію, що визначається за допомогою двофакторного дисперсійного аналізу з повтореннями, дозволяє спростити процес оптимізації параметрів гірничих машин за рахунок виключення безлічі простоїв, що справляють менший вплив на експлуатаційну продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу.

На четвертому кроці подано рішення третього завдання. Для цього визначено цільові функції та обмеження оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу з урахуванням позапланових простоїв. При виборі параметрів ЕАК з одночасним урахуванням

технологічного (експлуатаційна продуктивність) і економічного (питомі витрати на транспортування та навантаження гірських порід) показників ефективності, виникає протиріччя: продуктивність необхідно максимізувати, а витрати – мінімізувати. При цьому необхідно враховувати вагомість кожного з показників ефективності, залежно від вимог дослідника. *Таким чином, виникає завдання багатокритеріальної оптимізації.*

Для вирішення цього завдання запропоновано комплексний критерій оптимізації показників ефективності екскаваторно-автомобільного комплексу, заснований на методі згортки, а саме – мультиплікативної в агрегованому вигляді

$$F = \frac{Q_{\text{еак}}^{\alpha}}{C^{\beta}} \rightarrow \max \quad (3.13)$$

де $Q_{\text{еак}}$ - добова експлуатаційна продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу, т/добу.; C - питомі витрати на навантаження та транспортування гірських порід, грн./т.; α - ваговий коефіцієнт експлуатаційної продуктивності; β - ваговий коефіцієнт питомих витрат на завантаження та транспортування гірських порід. За наступних обмежень:

$$\alpha + \beta = 1; \alpha \in (0;1); \beta \in (0;1);$$

$$C \neq 0; h_{\text{гел.}} < 1,5 H_{\text{ч. max}};$$

$$V_{\text{max}} < 30;$$

де $h_{\text{гел.}}$ - висота уступу, м; $H_{\text{ч. max}}$ - максимальна висота черпання екскаватора, м; V_{max} - максимально допустима середня технічна швидкість руху автосамоскидів на ділянках траси, км/год; (відповідно до вимог техніки безпеки); $3 \leq N_k \leq 10$; N_k - кількість ковшів, розвантажуваних екскаватором в кузов автосамоскида, шт.; $45 \leq q_{\text{max}} \leq 130$ (видобуток); $30 \leq q_{\text{max}} \leq 450$ (розкрит); $1 \leq N_{\text{ас}} \leq 20$; $N_{\text{ас}}$ - кількість автосамоскидів, закріплених за екскаватором, шт.; $5 \leq E_{\text{екс}} \leq 11$ (видобуток); $5 \leq E_{\text{екс}} \leq 35$ (розкрит); $E_{\text{екс}}$ - місткість ковша екскаватора, м³.

Експлуатаційна продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу визначається з використанням аналітико-імітаційної моделі.

Питомі витрати на навантаження та транспортування гірських порід:

$$C = C_{но.р.} + \sum_{i=1}^N \frac{C_{перехл.}}{N}, \quad (3.14)$$

де: $C_{но.р.}$ - питомі витрати на навантаження розпушених підриванням гірських порід екскаватором в авто-самоскиди., грн./т; $C_{трансп.}$ - питомі витрати на транспортування гірських порід автосамоскидами, грн./т, N - кількість автосамоскидів, шт.

Цільові функції (3.15), (13.6) включають 38 параметрів, з яких 9 є факторами оптимізації:

$$\begin{aligned} Q_{ЭАК} &= f_1(R_{gt}, R_{fm}, R_{gm}, R_{ЭАК}) \rightarrow \max, \\ C &= f_2(R_{gm}, R_{gt}, R_{ЭАК}) \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3.15, 3.16)$$

де R_{gt} - множина параметрів гірничо-технічних умов експлуатації; R_{gm} - множина параметрів гірничих машин; $R_{ЭАК}$ - множина параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу.

Характер досліджуваної цільової функції у складній і структурно, і функціонально аналітико-імітаційній моделі реального екскаваторно-автомобільного комплексу, в якій є зворотні зв'язки та різномірні заявки, дозволяє говорити про незастосовність точних методів вирішення оптимізаційних завдань.

Численні надійно апробовані методи на основі алгоритмів евристичного класу дозволяють знайти оптимальні параметри систем, які досліджуються, за найкоротший час з високою точністю, при цьому немає необхідності в повному дослідженні області допустимих значень та аналітичному описі цільової функції [48].

Розроблено адаптацію генетичного алгоритму оптимізації, який включає п'ять кроків (рис. 3.8).

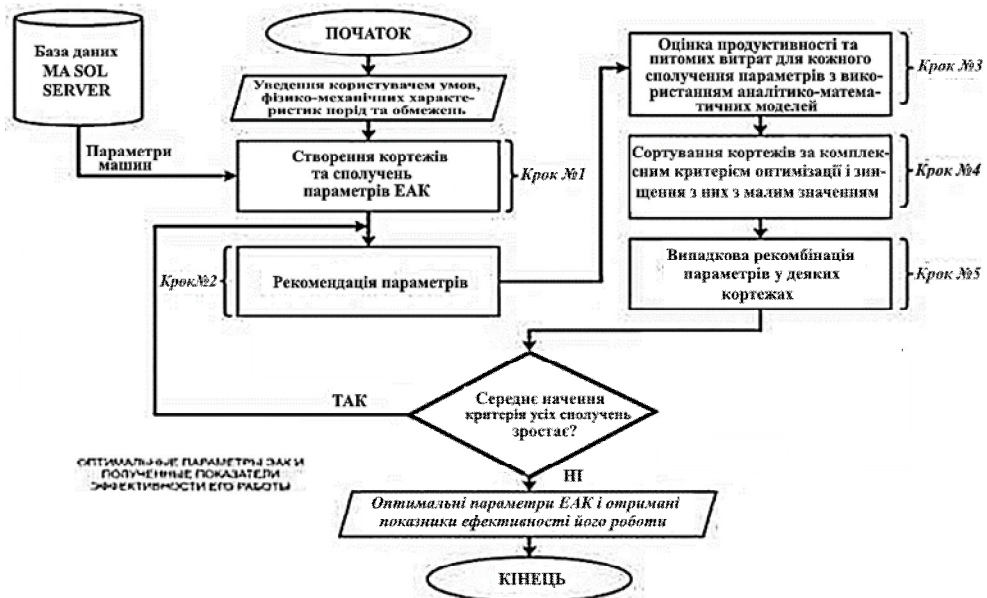


Рис. 3.8. Оптимізація параметрів ЕАК за допомогою еволюційного алгоритму

На першому кроці, створюється велика кількість прокортежів, тобто – поєднання параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу. Потім відбувається рекомбінація параметрів. Число кортежів збільшується у 2 рази, при цьому нові кортежі генеруються як поєднання вже існуючих параметрів. На третьому кроці для кожного поєднання параметрів відбувається оцінка продуктивності з використанням аналітико-імітаційної моделі та значних витрат. На четвертому етапі всі кортежі сортуються за значенням комплексного мультиплікативного критерію оптимізації в агрегованому вигляді. Половина з них, які мають найменші значення критерію, видаляється. На п'ятому кроці в деяких кортежах відбувається рекомбінація параметрів: деяким з них випадково присвоюються нові значення. Потім кроки 2-5 повторюються, поки середнє значення критерію оптимізації всіх поєднань параметрів не перестане зростати.

Розроблено програмно-методичне забезпечення для визначення оптимальних параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу з урахуванням позапланових простоїв на основі аналітико-імітаційної моделі, структурна схема якого представлена на рис. 3.9.

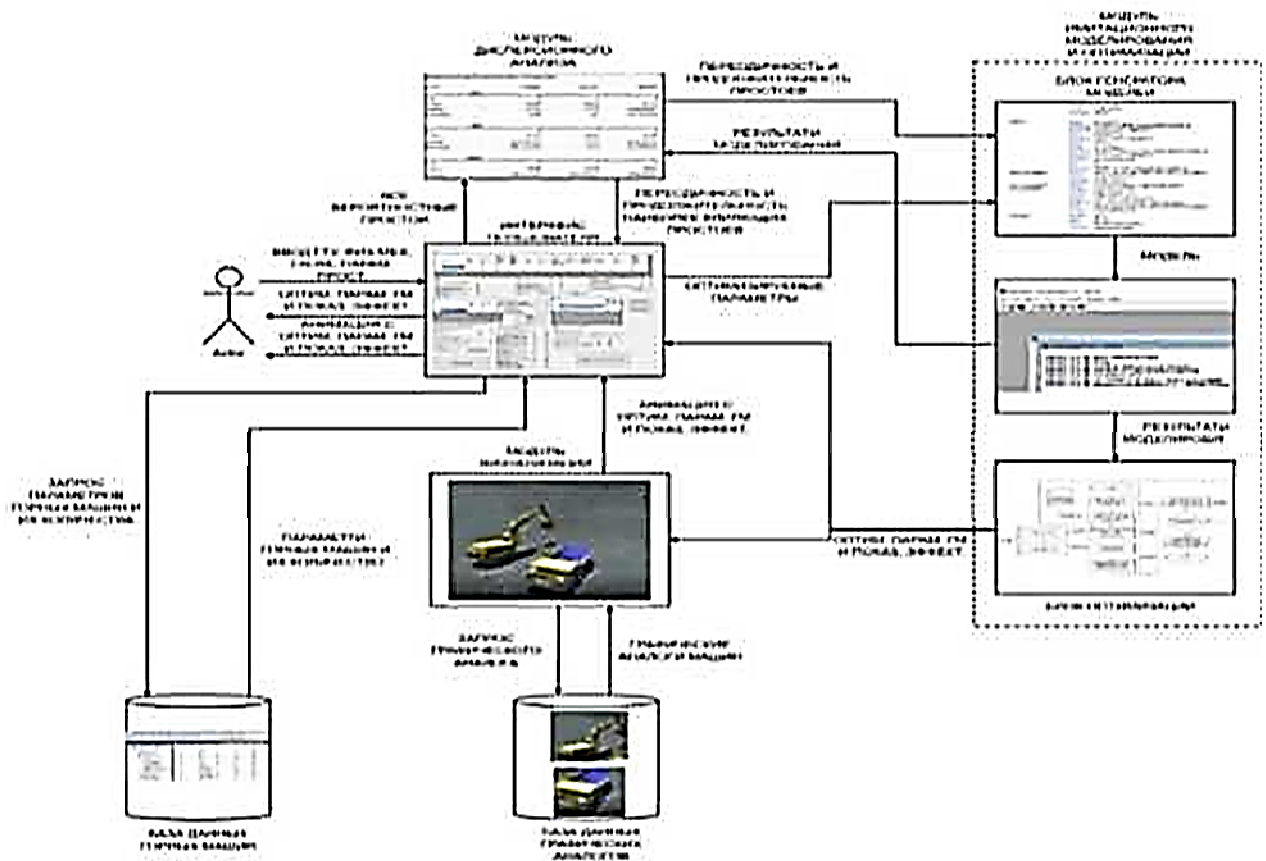


Рис. 3.9. Структурна схема програмно-методичного забезпечення оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу

Програмно-методичне забезпечення включає модулі: дисперсійного аналізу для оцінки ступеня впливу ймовірнісних простоїв на продуктивність; імітаційного моделювання та оптимізації для оцінки варіантів поєднань параметрів та вибору ефективного рішення; візуалізації для виведення результатів моделювання разом з анімацією роботи екскаваторно-автомобільного комплексу, а також інтерфейс користувача для інтерактивної взаємодії [49, 50].

Визначено оптимальні параметри екскаваторно-автомобільного комплексу та сформульовано рекомендації щодо використання екскаватора та автосамоскидів (табл. 3.2).

Згідно з даними, отриманими з диспетчерських звітів автоколон, при використанні на розкривному вибої дев'яти автосамоскидів вантажопідйомністю 130 тонн, закріплених за екскаватором ЕКГ-10, а також дванадцяти автосамоскидів вантажопідйомністю 130 тонн у розкривному

вибої №32, закріплених добова продуктивність із двох вибоїв становила 96,09 тис.т/добу при питомих витратах на навантаження та транспортування гірської породи 20,88 грн./т. Значення критерію ефективності становить 2,97.

Застосування значень параметрів, що рекомендуються, дозволяє збільшити добову експлуатаційну продуктивність на 41,8%, при цьому скоротивши питомі витрати на навантаження і транспортування гірських порід на 10,7%. Значення критерію ефективності екскаваторно-автомобільного комплексу підвищується на 39,1%.

Таблиця 3.2

***Результати експериментів пошуку оптимальних параметрів з
урахуванням ПП гірничих машин***

Висновки за розділом 3

Згідно з даними, отриманими з диспетчерських звітів автоколон, при використанні на розкривному вибої дев'яти автосамоскидів вантажопідйомністю 130 тонн, закріплених за екскаватором ЕКГ-10, а також дванадцяти автосамоскидів вантажопідйомністю 130 тонн у розкривному вибої №32, добова продуктивність із двох вибоїв становила 96,09 тис.т/добу при питомих витратах на навантаження та транспортування гірської породи 20,88 грн/т. Значення критерію ефективності становить 2,97.

Застосування значень параметрів, що рекомендуються, дозволяє збільшити добову експлуатаційну продуктивність на 41,8%, при цьому скоротивши питомі витрати на навантаження і транспортування гірських порід на 10,7%. Значення критерію ефективності екскаваторно-автомобільного комплексу підвищується на 39,1%.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Результатом даної випускової магістерської роботи є узагальнення сучасних рішень щодо наукового забезпечення вибору оптимальних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів з урахуванням позапланових простоїв гірничих машин, що забезпечує підвищення ефективності відкритих гірничих робіт та має важливе значення для розвитку відкритих розробок України.

У роботі проаналізовано ряд взаємопов'язаних задач на підставі чого можна констатувати наступне:

1. Результатом розв'язання задачі – «Розробка аналітико-імітаційних моделей функціонування ЕАК з урахуванням позапланових простоїв» є:

- систематизація простоїв екскаваторів та автосамоскидів з розподілом на планові та позапланові. Встановлено, що періодичність та тривалість ПП екскаваторів та автосамоскидів відповідає гамма-розподілу з обмеженою правосторонньою областю;

- розроблено концептуальну модель функціонування ЕАК із застосуванням теорії масового обслуговування та виконано її програмну реалізацію за допомогою мови імітаційного моделювання GPSS World, що дозволяє оцінювати добову продуктивність ЕАК і питомі витрати на навантаження та транспортування гірничої маси з урахуванням ПП екскаваторів та автосамоскидів. Максимальна похибка вихідних модельних даних порівняно з даними диспетчерських звітів не перевищує критичного значення 10%;

- встановлено, що розбіжність добового планового видобутку з видобутком при урахуванні ПП становить у середньому 17,2% за довірчої ймовірності 95,0%.

2. Результатом розв'язання задачі – «Визначення ступеня впливу позапланових простоїв на експлуатаційну продуктивність ЕАК» на прикладі ряду кар'єрів є:

- встановлено, що організація роботи екскаватора на два під'їзди з урахуванням ПП дозволить підвищити видобуток із вибою на 5,43%;

- встановлено, що збільшення тривалості ПП екскаватора через ремонт гідравлічного обладнання в інтервалі від 7 до 26 годин, лінійно знижує експлуатаційну продуктивність ЕАК на 2,36-5,08%, при постійній періодичності між 346 і 931 годинами відповідно. Зростання періодичності ПП екскаватора через ремонт гідравлічного обладнання в інтервалі від 340 до 936 годин, збільшує експлуатаційну продуктивність ЕАК на 1,61-4,36%, при постійних тривалостях між 7,86 і 25,94 годин відповідно. Збільшення тривалості ПП автосамоскидів через ремонт ДВЗ в інтервалі від 3 до 392 годин, лінійно знижує експлуатаційну продуктивність ЕАК на 0,79-25,61%, при постійній періодичності між 1623,3 і 19265,6 годин відповідно. Збільшення періодичності ПП автосамоскидів через ремонт ДВС в інтервалі від 1623 до 19295 годин, збільшує експлуатаційну продуктивність ЕАК на 0,24-19,95%, при постійній тривалості між 3,4 і 392,4 годин відповідно.

- розроблено критерій оцінки впливу ПП на експлуатаційну продуктивність ЕАК (K_i), який визначається як середнє арифметичне між коефіцієнтами детермінації факторів періодичності та тривалості позапланового простою.

- виконано ранжування позапланових простоїв екскаваторів та автосамоскидів з використанням розробленого критерію K_i для умов глибоких кар'єрів: відсутність автосамоскидів ($K_i \sim 47,22\%$); ремонт робочого обладнання екскаватора ($K_i \sim 46,23\%$); ремонт гідравлічного обладнання екскаватора ($K_i \sim 45,80\%$); ремонт ходового та механічного обладнання екскаватора ($K_i \sim 43,98\%$); ремонт електроустаткування екскаватора ($K_i \sim 41,91\%$); ремонт/заміна автошин ($K_i \sim 39,23\%$); ремонт системи управління автосамоскида ($K_i \sim 38,66\%$); ремонт електроустаткування автосамоскида ($K_i \sim 34,48\%$); ремонт двигуна внутрішнього згоряння ($K_i \sim 30,58\%$); ремонт гідросистеми автосамоскида ($K_i \sim 29,90\%$); очікування навантаження ($K_i \sim 28,20\%$).

3. Результатом розв'язання задачі – «Розробка програмно-методичного забезпечення для визначення оптимальних параметрів ЕАК з урахуванням позапланових простоїв» є:

- визначено цільові функції оптимізації параметрів ЕАК, які встановлюють зв'язок між вхідними параметрами: 27 параметрів гірничо-технічних умов (множина R_{gt}), 2 параметри фізико-механічних властивостей гірських порід (множина R_{jm}), 8 параметрів гірничих машин (множина R_{gm}), 1 параметр ЕАК (множина R_{EAK}) та відгуком: експлуатаційною продуктивністю (Q_{EAK}), питомими витратами на навантаження та транспортування гірничої маси (C).

- розроблено програмно-методичне забезпечення, що дозволяє оцінювати експлуатаційну продуктивність ЕАК, а також питомі витрати на навантаження та транспортування гірничої маси і вибирати оптимальні параметри ЕАК за допомогою імітаційного моделювання спільної роботи гірничих машин з урахуванням їх ПП.

- визначено оптимальні параметри ЕАК, що дозволяють підвищити його добову експлуатаційну продуктивність на 41,8%, а також скоротити витрати на навантаження та транспортування гірських порід на 10,7%, і підвищити значення критерію оптимізації на 39,1%. Сформовано рекомендації щодо використання гірничих машин для типових вибоїв: перший – екскаватор Hitachi EX-5500, автосамоскиди БелАЗ-7557 або Caterpillar-777D та БелАЗ-7513 або Caterpillar-785D; другий – екскаватор Caterpillar 7295, автосамоскиди БелАЗ-7513 або Hitachi EH-3000, БелАЗ-7518 і БелАЗ-7531 або Komatsu HD-830E.

Напрямок подальших досліджень, на нашій погляд, варто зосередити на наступних завданнях:

1. Розширення функціоналу програмно-методичного забезпечення підвищення ефективності вибору оптимальних параметрів ЕАК з допомогою урахування параметрів буровибухових робіт, а також показників надійності гірничих машин, які змінюються залежно за умовами їх експлуатації та терміном служби.

2. Дослідження й оптимізації параметрів ЕАК при автоматизації та роботизації гірничих машин, у тому числі при спільній роботі ЕАК та комплексу глибокої розробки покладів корисних копалин при видобутку їх відкрито-підземним способом.

Бібліографія.

1. Пригунов О.С. Технологічні основи відкритої розробки підірваних скельних порід комплексами машин безперервної дії: дисерт. докт. наук. ДГУ, 1999. Режим доступу: <https://uacademic.info/ua/document/0599U000398#!>
2. Пригунов О.С. Поточна технологія – основний напрямок розвитку відкритої розробки підірваних скельних порід // Геотех. механіка. 1998. Вип. 5.
3. Бро С.М. Порівняльний аналіз енерговитрат різними видами кар'єрного транспорту / С.М. Бро, О.С. Пригунов, С.А. Шипунов // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. - 2012. - № 38. - С. 84-89. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2012_38_14
4. Дриженко А.Ю. // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. - К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2008. - Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-21744>
5. Дриженко А.Ю. Кар'єрні технологічні гірничо-транспортні системи: моногр./А.Ю. Дриженко. – Д.: Державний ВНЗ «НГУ», 2011.
6. Дриженко А.Ю. Гірничо-транспортні схеми складування порід розкриву у виробленому просторі глибоких кар'єрів // МГП. 2005. № 3.
7. Новожилов М.Г. Высокопроизводительные глубокие карьеры / М.Г. Новожилов, А.Ю. Дриженко, А.М. Маевский. – М.: Недра, 1984. – 188 с.
8. Бизов В.Ф. Вплив перетинів автомобільних та залізничних вантажопотоків на роботу автотранспорту кар'єрів [Текст] / В.Ф. Бизов, Ю.Г. Вілкул, С.В. Литвинов, В.О. Завсєгдашній // Розробка рудних родовищ: республ. міжвід. наук.-техн. збірник / відп. ред. В.Ф. Бизов. – К., 1989. – Вип. 47. – С. 69-74.
9. Бизов В.Ф. Про специфіку сучасного стану та перспективи комплексного освоєння залізрудних родовищ [Текст] / В.Ф. Бизов, С.О. Жуков, В.П. Цвілій // Розробка рудних родовищ: наук.-техн. зб. / М-во освіти України. - Кривий Ріг, 1997. - Вип. 61. - С. 15-19.
10. Бакка М.Т., Гуменик І.Л., Редчиць В.С. Екологія гірничого виробництва: Навчальний посібник. – Житомир: ЖДТУ, 2004. – 307 с.
11. Перегудов В.В., Гамалинський І.А., Романенко О.В., Федін К.А. Сучасна методологія формування гірничотранспортної системи кар'єру з використанням ГІС К-MINE на прикладі кар'єру «Південний ГЗК» // Металургійна та гірничорудна промисловість. - Дніпропетровськ: Укрметалургінформ, №7, 2013, - С. 126-130.
12. Ржевский В.В. Научные основы проектирования карьеров / В.В. Ржевский, М.Г. Новожилов, Б.П. Юматов. – М.: Недра, 1971. – 600 с.
13. Трубецькой К.М. Розвиток принципів управління режимом гірничих робіт на глибоких кар'єрах при комплексному освоєнні родовищ / К.М. Трубецькой, О.О. Пешков // Розвиток теорії відкритих гірничих робіт. 1991. - С. 15-22.
14. Аністратов Ю.І. Проектування кар'єрів: Навчальний посібник для ВУЗів / Ю.І. Аністратов. – М.: Гемос Лімітед, 2002. – 176 с.
15. Холодняков Г.О. Визначення основних параметрів відкритої розробки комплексних родовищ / Г.О. Холодняков. - Л.: Вид-во ЛДУ, 1988. – 160 с.

16. Ракішев Б.Р. Проектування кар'єрів / Б.Р. Ракішев. – Алмати, 2013. – 298 с.
17. Хохряков В.С. Метод роздільного математичного моделювання кар'єрів на родовищах складної форми при календарному плануванні за допомогою ЕОМ / В.С. Хохряков, А.З. Яшкін // Вісті вузів. Гірничий журнал. – №4. – 1971. – С. 13–19.
18. S. Ramazan and R. Dimitrakopoulos, Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem, *Optim. Eng.* 14 (2) (2013), pp. 361–380. doi:10.1007/s11081-012-9186-2.
19. S. Jain, W.J. Foley, Dispatching strategies for managing uncertainties in automated manufacturing systems, *Eur. J. Oper. Res.* 248 (1) (2016), pp. 328–341. doi:10.1016/j.ejor.2015.06.060.
20. E. Topal and S. Ramazan, Mining truck scheduling with stochastic maintenance cost, *J. Coal Sci. Eng.* 18 (3) (2012), pp. 313–319. doi:10.1007/s12404-012-0316-4.
21. S. Alarie and M. Gamache, Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines, *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 16 (1) (2002), pp. 59–76. doi:10.1076/ijsm.16.1.59.3408.
22. C. Cullenbine, R.K. Wood, and A. Newman, A sliding time window heuristic for open pit mine block sequencing, *Optim. Lett.* 5 (3) (2011), pp. 365–377. doi:10.1007/s11590-011-0306-2.
23. Кузнецов І.С. Оптимізація параметрів кар'єрних екскаваторно-автомобільних комплексів з обліком позапланових простоїв: Дисерт. канд. наук. - Кемерово: КДТУ, 2022. Режим доступу: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2022/kuz/Dissertation.pdf>
24. https://uk.wikipedia.org/wiki/Bagger_293
25. <https://www.ixbt.com/live/offtopic/kak-vyglyadit-samy-bolshoy-v-mire-gidravlicheskiy-eks-kavator-terex-rh400.html>
26. <https://www.olx.ua/uk/transport/spetstechnika/eks-kavatory/q-liebherr>
27. <https://www.lectura-specs.com.ua/ua/model/budivel-na-tehnika/gusenichni-eks-kavatori-komatsu/pc8000-6-11731058>
28. <https://h-cpc.cat.com/cmms/v2?&f=product&it=product&cid=406&lid=X355&gid=18312767&pid=18490663&nc=1>
29. <https://www.hitachim.ua/produkcija/eks-kavatory/gornye-eks-kavatory/ex8000-6/>
30. <https://www.volvoce.com/europe/en/products/excavators/ec950f/>
31. <https://www.takraf.com/about-us/company/>
32. Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau https://www.youtube.com/@RPTU_Kaiserslautern-Landau
33. <https://rptu.de/newsroom/pressemitteilungen/detail/news/computergenerierte-daten-reproduzierbar-erzeugen-was-kann-wissenschaft-leisten-und-was-nicht>
34. Johannes Lenhard. Catapult future fest 2024. <https://katapultfuturefest.com/voices/johannes-lenhard>
35. <https://www.volkswagenstiftung.de/de/foerderung/was-wir-foerdern/pro-filbereich-wissen-ueber-wissen-reflexion-und-praxis-der-wissenschaft>
36. Литвин О.І. Обґрунтування раціональних технологічних параметрів виконання розкривних робіт зворотними гідравлічними лопатами

на розрізах Кузбасу: Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04. – Кемерово: КДТУ, 2012. – 119 с.

37. Е.І. Єфремов, В.Д. Петренко. Механіка вибухового руйнування порід різної структури. – К.: Наукова думка, 1984.

38. Жуков С.О., Тищенко С.В. Фізичні процеси вибухових геотехнологій. Монографія. ISBN 966-8224-33-6. – Кривий Ріг: Мінерал, 2007. – 212 с.

39. Шапурін О.В., Кирик П.Я. Руйнування гірських порід вибухом: Навчальний посібник. -К: ІСДО, 1995.

40. Скачков А.А., Жуков С.О. Конструктивний розвиток технології підривання порід свердловинними зарядами з диференційованим енергонасиченням масиву. Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2018. – Дніпропетровськ: - НГУ. вип. 53. - С. 79-87.

41. Удосконалення транспортних схем видачі руди для умов ПАТ «Південний ГЗК» //Протасов В.П., Федін К.А. й ін.// Вид-во «Діоніс», Кривий Ріг, 2012, - 342 с.

42. Перегудов В.В., Жуков С.О. Теоретичні передумови та методи ведення БВР у складних умовах глибоких кар'єрів. Монографія. - Кривий Ріг: Видавничий дім, ISBN 966-7388-46-8. 2002.

43. Генкуленко С.М., Загорський Д.В., Тітов Д.А. Проблеми кар'єрів міської агломерації. // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства». // -Кривий Ріг: КНУ, -2025. Том 1.

44. Герике Б.Л., Герике П.Б., Шахманов В.Н. Динамічна діагностика машинних агрегатів гірничого обладнання // ГІАБ. 2011. №S5. - С. 80-89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-dagnostika-mashinnyh-agregatov-gornogo-oborudovaniya> (дата обращения: 26.09.2025).

45. Квагинідзе В.С. Екскаватори на кар'єрах. Конструкції, експлуатація, розрахунок / В.С. Квагинідзе, Г.И. Козовой, Ф.А. Чакветадзе, Ю.А. Антонов, В.Б. Корецкий.

46. Кузієв Д.А. Гірничі машини й устаткування. Конструкторсько-технологічне забезпечення машинобудівних виробництв. Режим доступу: <https://www.geokniga.org> › authors

47. A. Krause. Adaptive submodularity: Theory and applications in active learning and stochastic optimization. // Journal of Artificial Intelligence Research 42 (1), 427-486.

48. Dowd P.A. Optimizing open pit design and scheduling / P.A. Dowd, A.H.Onur // 23rd APCOM. – 1992. – P. 411–422.

49. Kennedy Bruce A. Surface Mining / Bruce A. Kennedy. – 2nd edition. – Society for Mining Metallurgy & Exploration, 1990. – 1206p. – ISBN 978-0873351027.

50. C. Burt, L. Caccetta, L. Fouché, and P. Welgama. An MILP approach to multi-location, multi-period equipment selection for surface mining with case studies. J. Ind. Manage. Optim. 12 (2) (2016), pp. 403–430. doi:10.3934/jimo.2016.12.403.