

УДК 622.271.4

**Слободянюк Р.В.**, магістр  
(Державний ВНЗ «КНУ»)

**РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ  
ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ КАР'ЄРУ**

**Слободянюк Р.В.**, магістр  
(Государственное ВУЗ «КНУ»)

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ  
ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

**Slobodyanyuk R.V.**, M.S. (Tech.)  
(State HEI «KNU»)

**THE SIMULATION MODEL OF AN  
EXCAVATOR-AND-TRUCK COMPLEX FOR THE OPENCAST MINES**

**Анотація.** Розроблено імітаційну модель, що дозволяє проводити оцінку впливу типу виймально-навантажувального і транспортного обладнання, відстані транспортування гірничої маси та параметрів кар'єрних доріг на роботу екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру. Визначено коло завдань, пов'язаних з оптимізацією роботи екскаваторно-автомобільного комплексу, для вирішення яких раціональне застосування імітаційного моделювання.

Встановлено, що для кожного типу екскаваторно-автомобільного комплексу існують економічно доцільні межі використання в залежності від відстані транспортування. Автосамоскиди більшої вантажопідйомності мають значний потенціал у раціональному використанні за значних відстаней транспортування. Встановлено, що зниження продуктивності екскаватора в екскаваторно-автомобільному комплексі при наявності однієї ділянки дороги з попереми́нним одностороннім рухом становить 3-5%, при наявності двох ділянок зниження продуктивності досягає 6-7%, при наявності трьох ділянок – 6-24%. Прийнята нормами технологічного проектування максимальна довжина ділянки з одностороннім рухом, що дорівнює 500 м, не впливає на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу, тільки якщо через дану ділянку обслуговується один екскаватор.

**Ключові слова:** імітаційна модель, екскаваторно-автомобільний комплекс

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Широке використання методу імітаційного моделювання у гірничому виробництві дозволить вирішити значну кількість задач високої складності. Імітаційне моделювання є важливим елементом систем підтримки прийняття рішень, тому що дозволяє досліджувати велику кількість альтернативних рішень, програвати різні сценарії за будь-яких вхідних даних [1]. В основі його лежить методологія системного аналізу, що включає взаємопов'язані етапи: змістовна постановка задачі, розробка концептуальної моделі, розробка і програмна реалізація імітаційної моделі, перевірка адекватності моделі та оцінка точності результатів моделювання, планування і проведення експериментів, прийняття рішень [1-4].

З використаннями імітаційного моделювання можливо вирішити широке коло питань оптимізації роботи екскаваторно-автомобільних комплексів з урахуванням конкретних гірничотехнічних умов:

- встановлення оптимальної кількості автосамоскидів для обслуговування виймально-навантажувального обладнання;
- визначення раціонального співвідношення ємностей кузова автосамоскиду та ковша екскаватору з врахуванням впливу відстані транспортування;
- обґрунтування оптимальної типажної структури екскаваторно-автомобільного комплексу;
- виявлення обмежуючих («вузьких») місць в організації технологічних процесів, що не дозволяють збільшити продуктивність комплексу;
- дослідження взаємодії екскаваторно-автомобільного комплексу з суміжними ланками кар'єрного транспорту (аналіз впливу параметрів та конструкції перевантажувальних пунктів комбінованого транспорту на продуктивність кар'єру);
- аналізу складних перетинів транспортних комунікацій з різними характеристиками (перетин залізничних шляхів з автомобільною дорогою) [6];
- перевірка можливості виконання виробничої програми кар'єру наявним комплексом гірничотранспортного обладнання;
- попередня перевірка можливого ефекту від зміни організації руху кар'єрного транспорту або застосування нових технологічних рішень у кар'єрі у масштабі від однієї конкретної технологічної одиниці до виробничого процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В Україні та за кордоном протягом більше 40 років методи імітаційного моделювання [1-10] є надійним інструментом для вирішення широкого кола логістичних завдань в промисловості та на транспорті. У роботах [5,6,10] ці методи використані для оптимізації роботи кар'єрного транспорту на рудних і вугільних кар'єрах. У роботах [7-9] імітаційні моделі застосовані для вирішення завдань оптимізації екскаваторно-автомобільних комплексів. Поетапно, в роботах [7-9] збільшується складність моделей і перелік врахованих вихідних даних. В той же час раціонально для вирішення більшості завдань, перерахованих на початку статті, використовувати єдину, універсальну модель, що описує транспортну схему глибокого кар'єру.

**Постановка завдань дослідження.** Метою роботи є побудова імітаційної моделі екскаваторно-автомобільного комплексу і вирішення з її допомогою задач, що пов'язані з впливом відстані транспортування і параметрів автомобільних доріг на продуктивність і оптимальну структуру комплексу.

**Виклад основного матеріалу і результати.** Для цього дослідження на основі моделей [7-9] розроблено узагальнену і більш універсальну імітаційну модель. Використання її при дослідженні виймально-навантажувального та транспортного процесів, на даний момент, дозволяє вирішувати більшість з наведених вище питань.

Модель реалізується наступним чином: транспортні засоби (автосамоскиди)

розглядаються, як транзакти, які здійснюють рух по моделі. Одному транспортному засобу відповідає один транзакт моделі. Місця, де можливе одночасне обслуговування лише одного транзакту, моделюються, як одноканальний пристрій (ОКП). До них відносять місця навантаження (екскаваторні вибої), маневрів під час руху (примикання з'їздів до горизонтів, початок з'їзду з ненормативною шириною) та інші.

Місця, де відбувається паралельне обслуговування кількох транзактів (ЦПТ, майданчики розвантаження на відвалі, частина з'їзду з ненормативною шириною за його довжиною), моделюють як багатоканальні пристрої (БКП). Ємність БКП (число каналів) дорівнює максимальній кількості транзактів, що обслуговуються ним одночасно. Крім цього, транспортна система включає ділянки доріг з різними технологічними параметрами (довжина, нахил, ширина, якість покриття дороги), майданчики примикання автомобільних доріг до горизонтів. Характерна ділянка автомобільної траси (частина обмежуючого з'їзду, майданчик примикання з'їзду до горизонту) моделюється, як одноканальний пристрій (ОКП), що обслуговує автосамоскиди при їх русі від вибоїв до місця розвантаження та у зворотному напрямі. Вхід самоскидів в ОКП здійснюється, якщо він пустий. З'їзд по довжині моделюється, як БКП. Ділянка дозволяє пропускати транзакти лише в одному з напрямів руху одночасно. При цьому навантажені самоскиди мають вищий пріоритет при проходженні ділянки, ніж порожні.

Додатково в системі використовується підпрограма введення даних та моделювання простоїв екскаватора під час маневрувань автосамоскидів у вибої.

Схема роботи екскаваторно-автомобільного комплексу на рис. 1 включає три розкривних вибої, автомобільну трасу з чотирьох характерних ділянок з різними характеристиками, бульдозерний відвал. При іншій кількості екскаваторних вибоїв, пунктів розвантаження та топології автомобільних доріг принципова схема аналогічна.

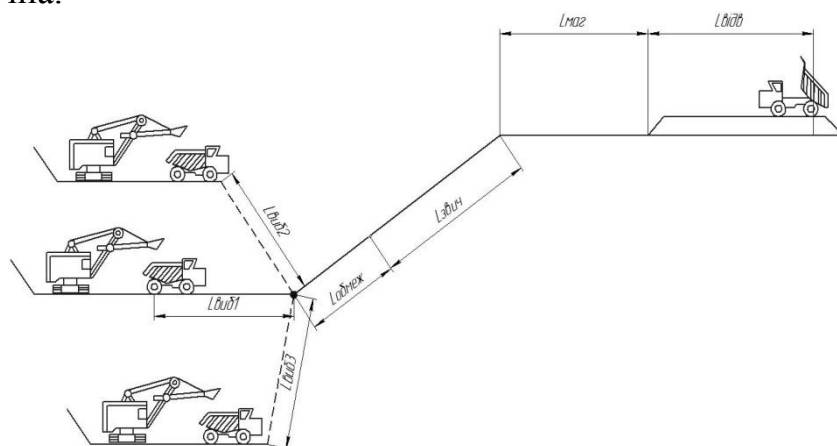


Рисунок 1 - Схема роботи екскаваторно-автомобільного комплексу

Модель включає 2 сегменти: сегмент, моделюючий роботу автосамоскидів і сегмент – таймер. Час у моделі вимірюється у секундах. Блок-схема сегментів моделі показана на рис. 2.

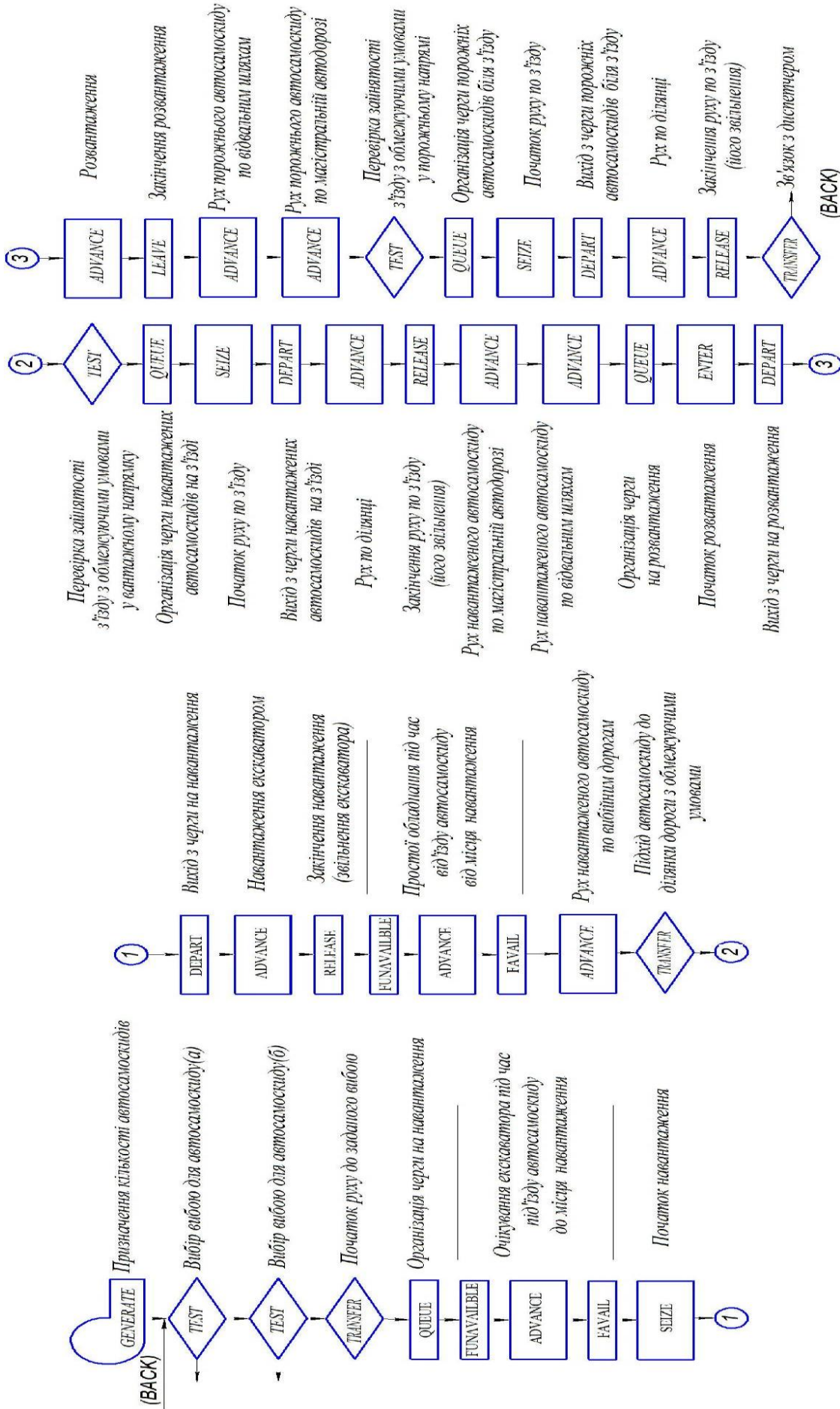


Рисунок 2 - Модель екскаваторно-автомобільного комплексу

Вихідні дані - інформація про роботу пристроїв, черги до них, відстані транспортування та швидкість руху автосамоскидів на конкретних ділянках.

При моделюванні, в залежності від поставленої задачі, кількість автосамоскидів, що обслуговують екскаватор, змінювалась від 1 до 18 одиниць, кількість екскаваторних вибоїв – від 1 до 3, відстань транспортування - від 1 до 10 кілометрів, а сумарна довжина ділянок автодоріг з ненормативною шириною – від 0 до 562,5 метрів.

Застосуємо розроблену модель для визначення раціонального сполучення виймально-навантажувального та транспортного обладнання.

Розглянуто дві групи варіантів екскаваторно-автомобільного комплексу, що відрізняються типом основного обладнання. У першому в якості виймально-навантажувального обладнання використовується екскаватор ЕКГ-10, у другому - ЕКГ-12,5. Кожен з варіантів містить по 3 підваріанти, що відрізняються типом транспортного обладнання (автосамоскиди з вантажопідйомністю 90 т, 120 т, 160 т).

У виконаному дослідженні розподіл часу руху, навантаження і розвантаження автосамоскидів змінювався за рівномірним законом. За результатами імітаційного моделювання розраховувалася фактична продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу та приведені витрати на 1 м<sup>3</sup> гірничої маси.

Аналіз результатів моделювання виконувався по двом групам, що відрізнялись типом виймально-навантажувального обладнання. У всіх варіантах відбувалось зростання експлуатаційної продуктивності екскаватора у міру збільшення кількості автосамоскидів, досягаючи 2,8-3,4 тис.м<sup>3</sup>/зм. На рис. 3 наведено результати моделювання роботи екскаваторно-автомобільного комплексу, що складається з екскаватора з ємкістю ковша 10м<sup>3</sup> і автосамоскидів вантажопідйомністю 160 т.

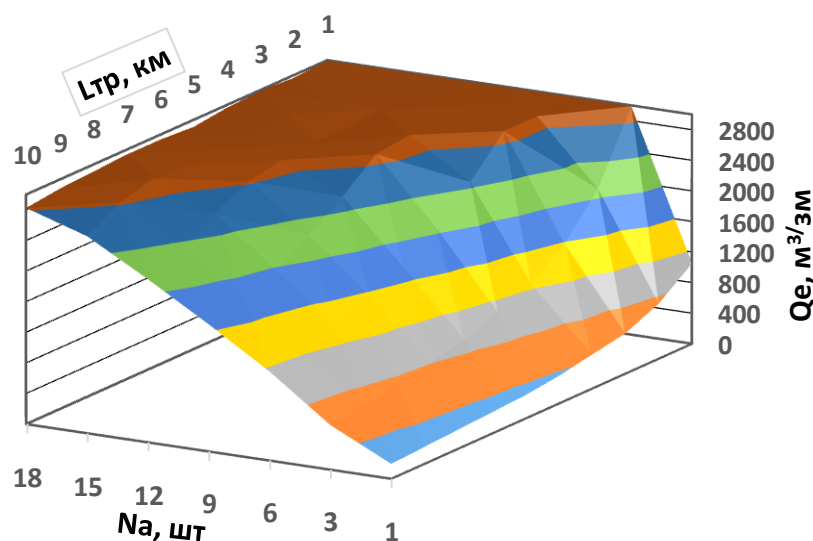


Рисунок 3 - Графік залежності продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу ( $Q_e$ ) від кількості автосамоскидів ( $N_a$ ) і відстані транспортування гірничої маси ( $L_{tr}$ )

При цьому, для обох груп існує закономірність досягнення потенційно бі-

льшої змінної продуктивності комплексами, в яких використовують автосамоскиди більшої вантажопідйомності. Так, середня різниця продуктивності екскаватору з автосамоскидами 90 т та 160 т сягає  $380 \text{ м}^3/\text{зм}$  (ЕКГ-10) і  $325 \text{ м}^3/\text{зм}$  (ЕКГ-12,5). Це спричинено зростанням часу основної роботи екскаватору, внаслідок зменшення загальної тривалості маневрових операцій автосамоскидів у вибої під час зміни.

Проведений розрахунок питомих приведених витрат ( $\text{USD}/\text{м}^3$  видобутої гірничої маси) показав (рис. 4), що перехідний момент в економічній доцільності використання комплексу настає за довжини відстані транспортування 4,8-5,5 км. За більшої довжини використання автосамоскидів вантажопідйомністю 160 т завжди доцільніше, ніж моделей меншої вантажопідйомності.

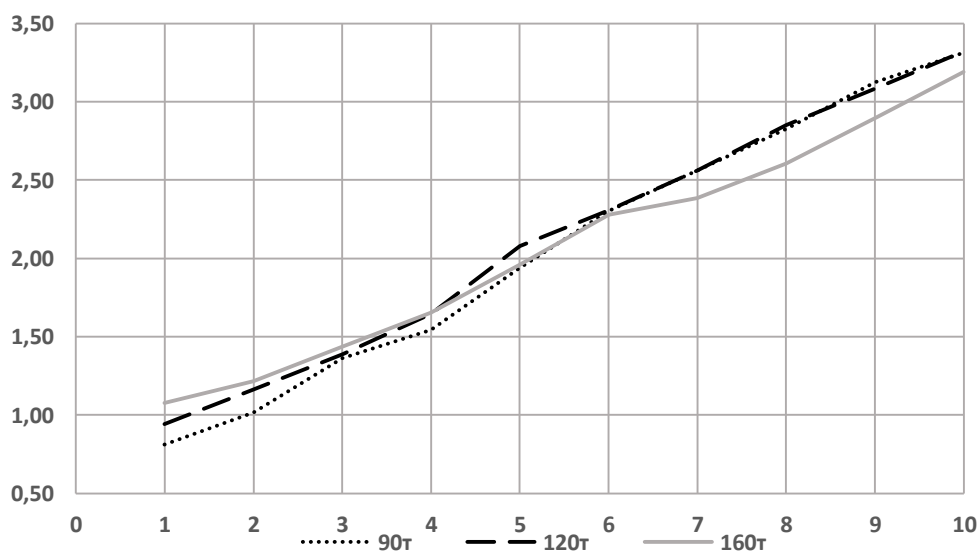


Рисунок 4 - Залежність приведених питомих витрат ( $\text{USD}/\text{м}^3$  видобутої гірничої маси) на виймально-навантажувальні та транспортні роботи від відстані транспортування і типу автосамоскидів у комплексі, що використовує екскаватор ЕКГ-10

При відстані транспортування, що не перевищує 3-3,4 км, автосамоскиди найменшої вантажопідйомності (90 т) показують кращий результат.

Тобто, можна сформулювати умовну перехідну область зменшення економічної різниці у використанні різнотипних автосамоскидів, початкова границя якої відзначається відстанню 3,0-3,4 км, а кінцева – 4,8-5,5 км. В області проявляються невеликі зони з максимальною доцільністю використання автосамоскидів з вантажопідйомністю 120 т.

На ряді кар'єрів в експлуатації знаходяться ділянки технологічних доріг з шириною меншою, ніж передбачено нормативними документами. Практичний інтерес становить дослідження впливу на продуктивність комплексу відстані транспортування, типу основного обладнання та наявності доріг з ненормативною шириною.

У дослідженні впливу доріг з ненормативною шириною на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу розглянуто дві групи варіантів:

1. Автосамоскиди БілАЗ-7513 (130 т). Нормативна ширина двосмугової до-

роги 30-34м, односмугової - 21м. За умовою моделювання один із з'їздів на шляху руху самоскидів має ширину, що не дозволяє організувати двосторонній рух. На даній обмежуючій ділянці рух автосамоскидів в кожному з напрямків здійснюється у порядку черги, що утворюється біля обмежуючого з'їзду з боку вантажного і порожнього напрямів.

2. Автосамоскиди БілАЗ -7555 (60 т). Нормативна ширина двосмугової дороги 25 м, односмугової – 15 м. Параметри всіх з'їздів дозволяють розташувати на них технологічну автодорогу з двостороннім рухом.

Для кожного з варіантів розглянуто три підваріанти, що розрізняються кількістю вантажопотоків, що проходять через обмежуючу ділянку траси. Розглянуті варіанти з одним, двома і трьома екскаваторами.

Для першого варіанту також розглядається вплив на продуктивність кількості обмежуючих з'їздів на шляху транспортування (загальна довжина ділянки обмеження руху). Розглянуті варіанти з довжиною обмежуючого з'їзду, рівною 187,5 м, 375 м, 562,5 м, що відповідає висоті підйому автосамоскиду на 15 м, 30 м і 45 м, а також -за відсутності ділянки з обмежуючими умовами.

Аналіз результатів моделювання для обох варіантів та всіх їх підваріантів показав, що у міру збільшення кількості автосамоскидів експлуатаційна продуктивність екскаватора зростає, досягаючи максимально можливого значення для даних умов. Але у міру збільшення кількості робочих вибоїв та транспортної техніки, що їх обслуговує, значно зростає вплив вузьких ділянок на шляху транспортування (автошляхи з ненормативною шириною) на загальну продуктивність комплексу та продуктивність кожної його складової ланки. Результати моделювання відображені на рис.5-6.

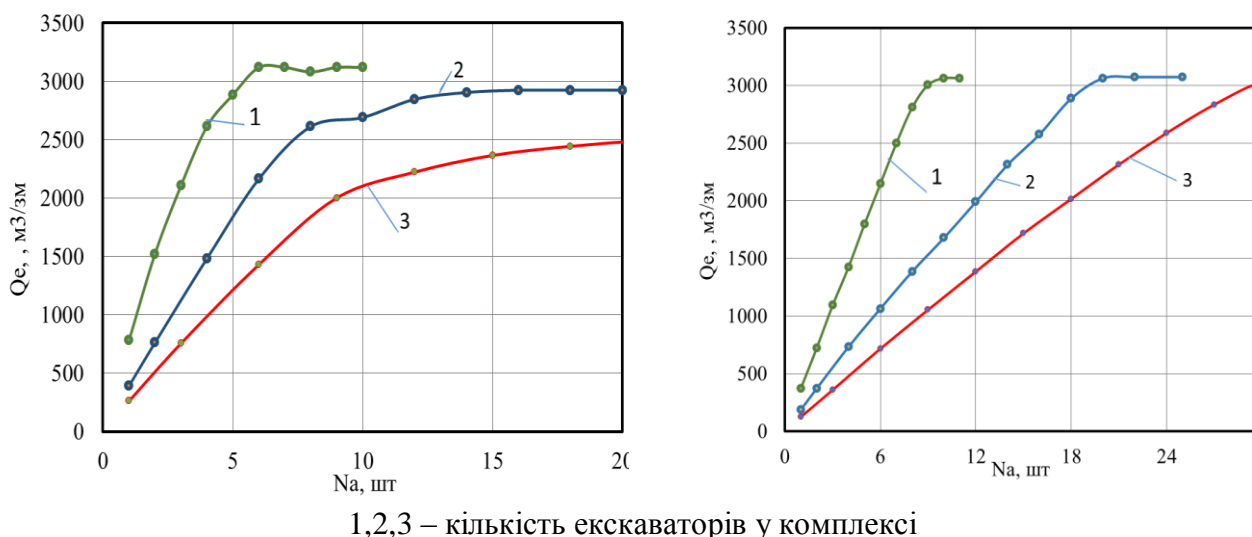
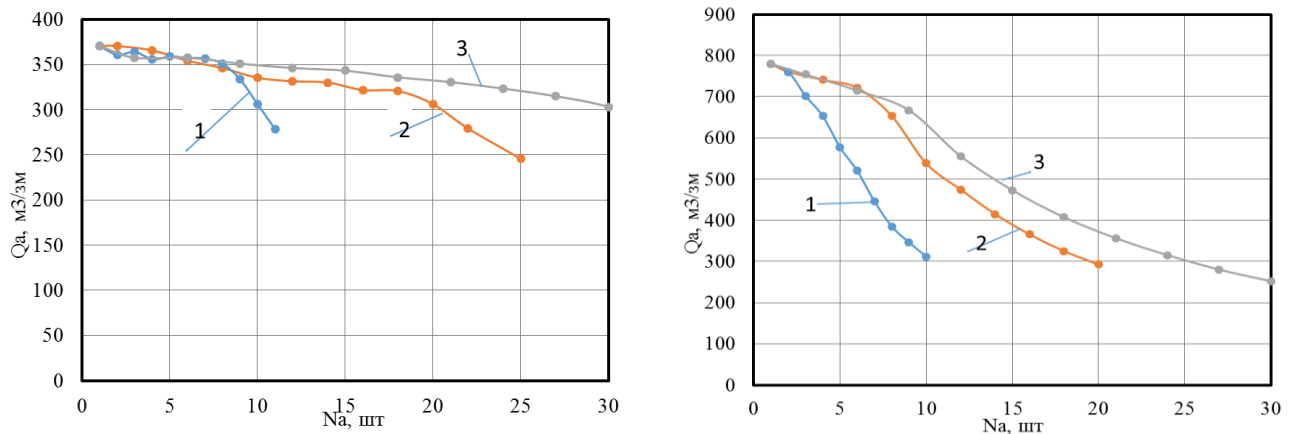


Рисунок 5 - Графік залежності середньої продуктивності екскаватора від кількості автосамоскидів, що обслуговують комплекс при: а) довжині ділянки з обмежуючими умовами 562,5 м; б) використанні автосамоскидів меншої ширини



1,2,3- кількість екскаваторів у комплексі

Рисунок 6 - Графік залежності середньої продуктивності автосамоскидів від кількості екскаваторів у комплексі при: а) довжині ділянки з обмежувачими умовами 562,5 м б) використанні автосамоскидів меншої ширини

Так при довжині ділянки з однополосним рухом 187,5 м відчутне падіння середньої експлуатаційної продуктивності екскаватора відбувається лише за умови одночасної роботи 3 екскаваторних вибоїв і складає: 90-100  $m^3/zm$ . При обмежувачих ділянках більшої довжини (375 м, 562,5 м) починає проявлятися значне падіння продуктивності екскаватора і у комплексах з двома вибоями - досягає 50  $m^3/zm$  та 170  $m^3/zm$  відповідно. А у випадку одночасної роботи 3 вибоїв падіння середньої продуктивності екскаватора у комплексі складає 7 % і 24% його можливої продуктивності при сприятливих гірничотехнічних умовах (120  $m^3/zm$  та 600  $m^3/zm$  відповідно).

Результати свідчать, що кожного разу при існуванні на шляху транспортування ділянок з умовами, обмежувачими рух, необхідно обґрунтувати раціонально допустиму довжину ділянки (як правило, до 150-250 м) та провести техніко-економічне порівняння варіантів з можливістю виключення даного впливу на продуктивність комплексу.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Розроблено імітаційну модель, що дозволяє проводити оцінку впливу типу виймально-навантажувального і транспортного обладнання, відстані транспортування гірничої маси та параметрів кар'єрних доріг на роботу екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру. Встановлено, що існує потенціал у досягненні високої продуктивності екскаватора за умови використання автосамоскидів більшої вантажопідйомності, оскільки час основної роботи виймально-навантажувального обладнання зростає при зменшенні сумарної тривалості маневрових операцій транспорту у вибої під час зміни. Наочно показано, що для кожного типу екскаваторно-автомобільного комплексу існують економічно доцільні межі використання в залежності від відстані транспортування. Автосамоскиди більшої вантажопідйомності мають значний потенціал у раціональному використанні за значних відстаней транспортування.



Встановлено, що зниження продуктивності екскаватора в екскаваторно-автомобільному комплексі зі значною кількістю вантажопотоків при наявності однієї ділянки дороги з поперемінним одностороннім рухом становить 3-5%, при наявності двох ділянок зниження продуктивності досягає 6-7%, при наявності трьох ділянок – 6-24%. Прийнята норма технологічного проектування максимальна довжина ділянки з одностороннім рухом, що дорівнює 500 м, не впливає на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу, тільки якщо через дану ділянку обслуговується один екскаватор.

В подальшому планується виконати дослідження з оптимізації техніко-економічних показників глибоких залізрудних кар'єрів на основі комплексного управління структурою і параметрами кар'єрних вантажопотоків.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жерновий Ю.В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування: Практикум / Ю.В. Жерновий. – Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 2007. – 312 с.
2. Sturgul, R. Mine Design: Examples Using Simulation / R. Sturgul. // Littleton: SME. – 2000. – 102 p.
3. Ракович, Г.М. Застосування засобу імітаційного моделювання GPSS WORLD для рішення задач планування та обробки експерименту / Г. М. Ракович // Сучасні проблеми моделювання. -2014. - Вип. 2. -С.108-118
4. Schriber, T. J. Simulation using GPSS / T. J.Schriber. - New York: John Wiley & Sons -1974. – 209 p.
5. Kolonja, B. Simulation of In-Pit Crushing Systems Using AutoMod / B.Kolonja, R.Stanic and J. Hamovic // 19th Mining Congress, 1-5 November 2003, New Delhi. p. 517-531.
6. Литвинов, С.В. Обоснование рациональных схем пересечения автомобильных и железных дорог карьеров / С.В. Литвинов: Автореф. дисс. ... канд.техн.наук. - Кривой Рог, КНУ, 1990. -19 с.
7. Слободянюк, Р.В. Определение рационального количества карьерных автосамосвалов / Р.В. Слободянюк // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ НАН України. - Дніпропетровськ, 2012. — Вип. 103. — С. 196-202.
8. Слободянюк, Р.В. Вплив відстані транспортування на оптимальну структуру екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру / Р.В. Слободянюк // Київ: Вісник НТУ «КП». – 2015. – С. 100–105.
9. Слободянюк, Р.В. Дослідження впливу параметрів технологічних автодоріг на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу / Р.В. Слободянюк // Житомир: Вісник ЖДТУ. – 2015. – С. 9–14.
10. Surface Mining: 2nd edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 1990. – 234 p.

#### REFERENCES

1. Zhernovyi Iu.V. (2007), Imitatsiine modeliuвання system masovoho obsluhovuvannya [Simulation of queueing systems], Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine
2. Sturgul, R. (2000), “ Mine Design: Examples Using Simulation” , Littleton, CO.
3. Rakovych, G.M. (2014) "Application of simulation modeling GPSS WORLD for problem solving and treatment planning experiment", *Suchasni problemy modeliuвання*, no. 2. pp.108-118.
4. Schriber, T. J.(1974), “Simulation using GPSS”, *John Wiley & Sons*, New York, USA.
5. Kolonja, B., Stanic, R. and Hamovic, J. (2003), “Simulation of In-Pit Crushing Systems Using AutoMod”, *19th Mining Congress*, New Delhi, 1-5 November 2003, pp. 517-531.
6. Litvinov, S.V. (1990), "The Substantiation of rational schemes of crossing roads and railways quarrie", Abstract of Ph.D. dissertation, Kryvyi Rih, Ukraine, pp. 19-35.
7. Slobodyanyuk, R.V. (2012), “Determination of the rational number of dump trucks”, *Geo Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no.103, pp. 196-202.
8. Slobodyanyuk, R.V. (2015), “Influence of distance of transportation on the optimal structure of Open-Pit's excavator-automobile complex”, *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu “Kyivskyy politekhnichnyi instytut”*, pp. 100–105.
9. Slobodyanyuk, R.V. (2015), “Research of influence of technological roads parameters on the perfor-

mance of excavator –automobile complex”, *Visnyk Zhytomyrskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu*, pp. 9–14.

10. Surface Mining (1990) (2nd edition), *Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.*, Littleton, Colorado, USA.

---

#### Про автора

**Слободянюк Роман Валерійович**, магістр, інженер, Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет» (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна, [slobod\\_roman@mail.ru](mailto:slobod_roman@mail.ru).

#### About the author

**Slobodyanyuk Roman Valeriyovych**, Master of Science, Engineer, State Higher Educational Institution «Kryvyi Rih National University» (SHEI “KNU”), Kryvyi Rih, Ukraine, [slobod\\_roman@mail.ru](mailto:slobod_roman@mail.ru).

---

**Аннотация.** Разработана имитационная модель, позволяющая проводить оценку влияния типа выемочно-погрузочного и транспортного оборудования, расстояния транспортирования горной массы и параметров карьерных дорог на работу экскаваторно-автомобильного комплекса карьера. Определен круг задач, связанных с оптимизацией работы экскаваторно-автомобильного комплекса, для решения которых рационально применение имитационного моделирования.

Установлено, что для каждого типа экскаваторно-автомобильного комплекса существуют экономически целесообразные границы использования в зависимости от расстояния транспортирования. Автосамосвалы большой грузоподъемности имеют значительный потенциал рационального использования при больших расстояниях транспортирования. Установлено, что снижение производительности экскаватора в экскаваторно-автомобильном комплексе при наличии одного участка дороги с попеременным односторонним движением составляет 3-5%, при наличии двух участков снижение производительности достигает 6-7%, при наличии трех участков - 6-24%. Принятая нормами технологического проектирования максимальная длина участка с односторонним движением, равная 500м, не влияет на производительность экскаваторно-автомобильного комплекса, только если через данный участок обслуживается один экскаватор.

**Ключевые слова:** имитационная модель, экскаваторно-автомобильный комплекс.

**Abstract.** A simulation model was designed in order to estimate impact of the cutter, loader and truck type, distance for the rock mass transporting and parameters of the pit roads on the operation of excavator-and-truck complex in the opencast mines. A scope of tasks associated with optimization of excavator-and-truck complex work was determined for solving of which a simulation modeling was applied.

It was found that certain economically expedient limits exist for usage of each type of excavator-and-truck complex depending on distance of the rock transportation. Dump trucks with greater carrying capacity have significant potential for rational using at considerable distances of transporting. It is stated that productivity of an excavator in the excavator-and-truck complex decreases by 3-5% in case of one road segment with alternately one-way traffic, by 6-7% - in case of two such segments and 6-24% - in case of three segments. Maximal length 500 m for a segment with one-way traffic accepted by norms of process engineering does not impact on productivity of the excavator-and-truck complex if only one excavator operates in this segment.

**Keywords:** simulation model, excavator-and-truck complex

*Статья поступила в редакцию 05.08.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук М.С. Четвериком*