

Монастирський Ю. А., Максименко І. С.  
*Криворізький національний університет***ПЕРСПЕКТИВИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ ГЛИБОКИХ  
КАР'ЄРІВ**

Зниження глибини видобутку корисних копалин в кар'єрах обумовлює необхідність пошуку шляхів зменшення викидів шкідливих речовин від автомобільного транспорту, який є основним в глибоких кар'єрах. На підставі дослідження зміни витрат палива при транспортуванні порід кар'єрними автосамоскидами і дизель тролейвозами вантажопідйомністю 90, 130 та 220 тон встановлені закономірності зміни лінійних витрат палива від тривалості руху з вантажем кар'єрними самоскидами з електромеханічною передачею. Середня розрахункова лінійна витрата палива для самоскидів вантажопідйомністю 90 т становить 10-12 л/км, 130 т – 16-18 л/км, 220 т – 24-26 л/км. Менші значення відповідають маршрутам більшої протяжності за рахунок меншої питомої частки витрат палива на непродуктивних операціях транспортного циклу. Встановлено параболічну залежність питомої витрати палива тролейбусного автомобіля від довжини маршруту та лінійну залежність питомої витрати палива тролейбусного автомобіля на тролейбусній ділянці маршруту. Встановлено, що абсолютна протяжність маршруту руху суттєво не впливає на питому витрату палива, більш істотний вплив має частка тролейбусної ділянки в загальній протяжності маршруту. При збільшенні тролейної частини колії від 30 до 70 % на найдовшій колії величина відносної витрати палива зменшується з 0,76 до 0,41. Для зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу при впровадженні тролейбусної допомоги необхідно мати маршрути максимальної довжини з максимальною довжиною тролейбусної ділянки, це може призвести до скорочення в 2,5 рази.

**Ключові слова:** кар'єрний автосамоскид, дизель тролейвоз, витрати палива, викиди шкідливих речовин, декарбонізація

**ВСТУП**

Автомобільний транспорт є основним технологічним транспортом в глибоких кар'єрах. Висока маневреність у поєднанні з мінімальними вимогами щодо шляхів руху обумовлюють використання саме автомобілів в обмеженому за розміром технологічному просторі нижньої зони кар'єру. [1, 2]. Одночасно проявляється одна з основних вад автомобільного транспорту - наявність викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигунів внутрішнього згоряння що дуже негативно позначається на атмосфері кар'єру. Спроби використання різних засобів штучного механічного перемішування повітря в кар'єрах із застосування авіаційних літакових та гвинтокрилих двигунів не дали позитивних ефективних результатів, тому наразі прийнято провітрювання глибоких кар'єрів за рахунок природних висхідних потоків повітря із центральної частини кар'єру та відповідно низхідних потоків по бортам кар'єру, які утворюються в наслідок природного більшого нагріву сонцем центру кар'єру [3]. Для зменшення викидів відпрацьованих газів необхідно зменшувати витрати палива кар'єрними автосамоскидами.

**АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.**

Одним з сучасних напрямів у розвитку кар'єрного автомобільного транспорту, який дозволяє вирішити проблему викидів відпрацьованих газів, є електрифікація автотранспорту та впровадження дизель тролейвозів. Цим шляхом йдуть основні світові виробники кар'єрних автосамоскидів, у тому числі Катерпіллар (Caterpillar), Комацу (Komatsu), Хітачі (Hitachi), Лібхер (Liebher), а також виробник електротехнічного обладнання світового рівня компанія Сіменс (Siemens) [4 - 11]. Реалізація відбувається шляхом модернізації у дизель тролейвози серійних кар'єрних автосамоскидів з електромеханічною трансмісією вантажопідйомністю від 90 т. В світі реалізовано більше 30 проектів встановлення тролейних ліній для технологічного автотранспорту, тенденція їх впровадження продовжує зростання. В Україні компанією Феррекспо (Fertexpro) планується встановити тролейне обладнання на 14 кілометрах кар'єрних автошляхів в кар'єрах Полтавського, Єристівського та Біланівського гірничо-збагачувальних комбінатів [12]. Розглядається перспективи застосування дизель тролейвозів на криворізьких гірничо-збагачувальних комбінатах [13, 14].

В процесі роботи дизель тролейвозів спостерігається збільшення продуктивності та зниження витрат палива на одну тону видобутої гірничої маси, що обумовлює, одночасно, зниження викидів відпрацьованих газів до яких входять оксид вуглецю, неметанові леткі органічні сполуки, метан, діоксид азоту, сажа, оксид азоту, діоксид сірки, вуглекислий газ. Питання визначення показників роботи нового виду машин в кар'єрах потребує досліджень та порівняння серійних кар'єрних

автосамоскидів з дизель тролейвозами, у тому числі кількості викидів відповідно умов експлуатації машин.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В Україні прийнята «Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів» [15], в якій по суті кількість викидів різних речовин лінійно залежить від витрат палива. Звичайно витрати палива на експлуатацію автомобілів визначаються в літрах, але при визначенні кількості викидів застосовується коефіцієнт переведення у вагові одиниці, який для дизельного палива встановлений нормативно 0,85 кг/л [15].

При розрахунку витрат дизельного палива (табл.1) за методикою [16] були прийняті наступні вихідні дані: кар'єрний автосамоскид вантажопідйомністю 90 т двигун – Cummins KTA-38C, потужність 783 кВт; кар'єрний автосамоскид вантажопідйомністю 130 т двигун – Cummins KTTA-50C, потужність 1194 кВт; кар'єрний автосамоскид вантажопідйомністю 220 т двигун – Cummins QSK-60 C, потужність 1715 кВт; питомі витрати палива двигунами при номінальній потужності від 202 до 209 г/(кВт·год.), витрати палива кар'єрним автосамоскидом при русі з вантажем відповідають витратам палива двигуна при роботі при номінальному навантаженні; при маневруванні та русі без вантажу як кар'єрним автосамоскидом так і дизель тролейвозом витрати палива складають за рекомендаціями [10] 40 % від номінальних витрат, під час очікування завантаження, завантаження та очікування розвантаження витрати палива машин дорівнюють витратам палива при роботі двигуна на холостому ходу, під час руху в тролейному режимі витрати палива дизель тролейвозом дорівнюють витратам палива при роботі двигуна на холостому ході збільшеними на 5 % для забезпечення роботи обмотки збудження тягових електродвигунів.

Таблиця 1 – Сумарні витрати палива на трасах різної довжини самоскидами різної вантажопідйомності

Витрати палива, кг	Довжина руху з вантажем / загальний пробіг, км	1/2	2/4	3/6	4/8	5/10
	Вантажопідйомність 90 т		18,98	36,49	54,01	71,52
Вантажопідйомність 130 т		29,80	57,30	84,80	112,30	139,80
Вантажопідйомність 220 т		43,02	82,70	122,39	162,08	201,77

Середні розрахункові лінійні витрати палива з таблиці 1 для самоскидів вантажопідйомністю 90 т складають 10-12 л/км, 130 т – 16-18 л/км, 220 т – 24-26 л/км, при чому менші значення відповідають трасам більшої довжини за рахунок меншої питомої частини витрат палива під час непродуктивних операцій транспортного циклу. За даними криворізьких гірничо-збагачувальних комбінатів витрати палива кар'єрними автосамоскидами вантажопідйомністю 130 т знаходяться на рівні 15 - 20 л/км, а вантажопідйомністю 220 т – на рівні 25 – 30 л/км. Таким чином розрахункові значення витрат палива відповідають фактичним значенням, це підтверджує достовірність прийнятої методики виконання розрахунків.

На основі методики визначення параметрів роботи кар'єрного автомобільного транспорту [16] встановлені закономірності зміни питомих витрат палива, тобто відношення витрат палива кар'єрного автосамоскиду тролейвоза до витрат палива звичайного кар'єрного автосамоскиду які працюють на однакових трасах від довжини трас руху при різних частинах тролейної ділянки. Встановлено, що довжина траси руху на питомі витрати палива впливає по параболічній залежності не дуже суттєво, більш суттєвий вплив має питома вага тролейної ділянки в загальній довжині траси яка впливає по лінійній низпадаючій залежності показаній на рисунку 1.

Максимальне відносне зменшення витрат палива, практично в 2,5 рази (питомі витрати на рівні 0,4), спостерігається на найдовшій трасі (5 км) з найбільшою тролейною ділянкою (70 %). На найкоротшій трасі в 1 км при довжині тролейної ділянки у 300 м (30 %) зменшення витрат палива найменше і складає 1,3 рази. Такий висновок доводить, що для зменшення абсолютної величини витрат палива необхідно мати траси максимальної довжини з максимальною довжиною тролейної ділянки. Розглядалися траси в яких тролейна ділянка розташована на лінії руху з вантажем, у зворотному напрямку без вантажу рух виконується по звичайній лінії, як що на зворотній лінії встановити тролей, то суттєвих змін у витрат палива не буде внаслідок руху машин в режиму

гальмування з мінімальними витратами палива незалежно чи під тролеем чи без тролєю рухається машина.

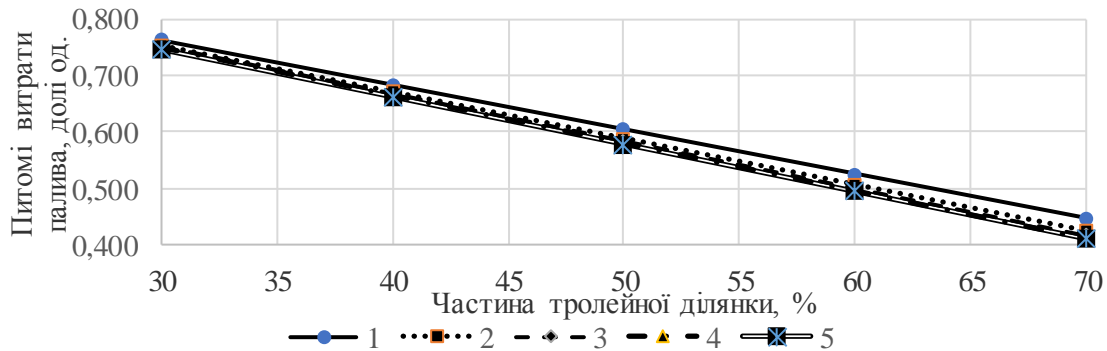


Рисунок 1 – Закономірності зміни питомих витрат палива від частини тролєйної ділянки (у процентах) при різних довжинах руху з вантажем (у кілометрах).

Для встановлених закономірностей отримана, за допомогою методики раціонального планування експериментів, двохфакторна аналітична залежність питомих витрат палива від довжини траси та питомої частини тролєйної ділянки:

$$PP = -0.0008p + 0.0022l^2 - 0.0194l + 1.021, \text{ долі одиниць,}$$

де  $p$  - питома частина тролєйної ділянки, процент від загальної довжини руху з вантажем, % (межі від 30 до 70 %),

$l$  - загальна довжина руху з вантажем, км (межі від 1 до 5 км).

Використовуючи встановлені закономірності можливо визначати прогнозні витрати палива для конкретних трас руху при оцінці доцільності використання дизель-тролейвозів на базі кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю від 90 до 220 т. Означені закономірності витрат палива також можуть бути використані для автосамоскидів іншої вантажопідйомності з відповідним корегувальним коефіцієнтом потужності двигуна та питомих витрат палива.

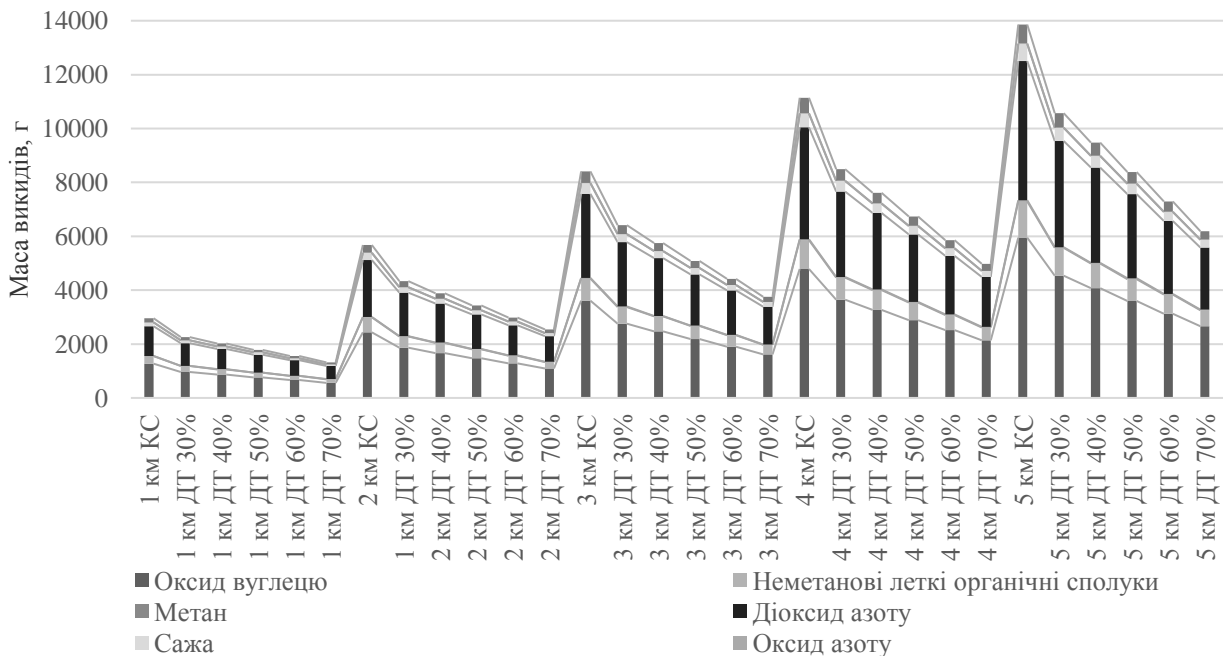


Рисунок 2 – Закономірності зміни викидів основних шкідливих речовин від нових машин вантажопідйомністю 130 т в залежності від довжини траси руху та частини тролєйної ділянки. КС – кар'єрний автосамоскид, ДТ xx% - дизель тролєйвоз на трасі з xx % тролєйною частиною

Для встановлених витрат палива для найбільш розповсюдженого в Україні (80 % парку всіх машин вантажопідйомністю більше 100 т) технологічного кар'єрного автосамоскиду

вантажопідйомністю 130 т встановлені зміни викидів основних шкідливих речовин від нових машин в залежності від довжини траси руху та частини тролейної ділянки (рис.2).

### **ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ**

На всіх трасах тролейвоз значно менше витрачає дизельного палива ніж звичайний кар'єрний автосамоскид і відповідно менше робить викидів шкідливих речовин в атмосферу кар'єру.

Встановлено, що дизель тролейвоз, який працює на трасі довжиною 5 км сумарно викидає менше забруднюючих речовин ніж звичайний кар'єрний автосамоскид який працює на трасах від 3 км незалежно від довжини тролейної ділянки. Дизель тролейвоз на трасі у 2 км з 60 % тролейною ділянкою викидає стільки ж забруднюючих речовин, як і кар'єрний автосамоскид на вдвічі меншій трасі. Таким чином показано що впровадження дизель тролейвозів дозволяє суттєво зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу. Аналогічні значення з відповідним корегування до витрат палива спостерігаються і для кар'єрних автосамоскидів та дизель тролейвозів на їх базі інших машин. Абсолютні значення змінюються, а відносні значення викидів від двигуна внутрішнього згорання дизель тролейвозу до викидів двигуна внутрішнього згорання кар'єрного автосамоскиду залишаються незмінними, що може бути розповсюджено і на інші машини.

### **ВИСНОВКИ**

Питання зменшення витрат палива кар'єрного транспорту завжди є пріоритетним, особливо в умовах розвитку світової промисловості зі зменшенням витрат викопного палива та обмеження енергетичних ресурсів, при цьому одночасно вирішується і питання декарбонізації, тобто зменшення викидів вуглецю та його сполуки в атмосферу. Впровадження в глибоких кар'єрах України дизель тролейвозів дозволяє до 2,5 разів зменшити викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигунів внутрішнього згорання та забезпечити більш якісні умови роботи персоналу в складних, обмежених у просторі та недостатньо провітрюваних умовах кар'єрів глибиною 300 - 400 м і більше.

### **ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1.Yurii Monastyrskiy, Volodymyr Sistuk, Volodymyr Potapenko, and Ivan Maksymenko. The sustainable future of open-pit trucks operation/ The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic. E3S Web of Conferences 166, 07005 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607005>.

2.Монастирський Ю.А. Аналіз адекватності моделі технічної експлуатації системи технологічного автотранспорту / Ю.А. Монастирський, Максимова О.С., Потапенко В.В., Максименко І.С. // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті : наук. журн. / Луц. нац. техн. ун-т. – Луцьк, 2020. – № 2 (15). – С. 77-85. DOI: 10.36910/automash.v2i15.395.

3.Наливайко, В. Г. Коновалюк, В. А. Розробка ефективних способів і засобів нормалізації атмосфери робочих зон кар'єрів/ Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Збірник наукових праць. Випуск 34, Київ: КНУБА, 2020, с. 29-39.

4.Siemens patented all-electric Mobile Mining Truck based on proven technology / <https://imining.com/2021/11/04/siemens-patented-electric-mobile-mining-truck-based-proven-technology/>.

5.Caterpillar introduces trolley assist system for CAT® electric drive mining trucks / [https://www.cat.com/en\\_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html](https://www.cat.com/en_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html).

6.Trolley assist for diesel-electric trucks in mining: 3 reasons why it is taking off. Thanks to Boliden's recent trial at its Aitik open-pit mine, in Sweden, the subject of trolley assist is back on the mining industry's agenda. / <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/systems-solutions/mining-electrification/trolley-assist-for-diesel-electric-trucks>.

7.Trolley-assisted haul roads construction and maintenance / <https://www.globalroadtechnology-blog.com/industry-articles/trolley-assisted-haul-roads-construction-and-maintenance>.

8.Liebherr Trolley Trucks Testing Success at Austrian Mine <https://www.heavyliftnews.com/liebherr-trolley-trucks-testing-success-at-austrian-mine/>

9.An introduction to trolley-assist haulage systems/ <https://globalroadtechnology.com/trolley-assist-haulage-systems/>

10.5 things you may not have known about the Trolley Assist System <https://www.liebherr.com/en/ind/latest-news/news-press-releases/detail/5-things-you-may-not-have-known-about-the-trolley-assist-system.html>.

- 11.Can a dirty industry come clean? How mining equipment is becoming more sustainable / <https://www.mobilehydraulictips.com/can-a-dirty-industry-come-clean-how-mining-equipment-is-becoming-more-sustainable/>
- 12.Ferrexpo планує електрифікувати кар'єрний транспорт / <https://gmk.center/ua/news/ferrexpo-planuie-elektrizuvati-kar-iernij-transport/?fbclid=IwAR2skv5J7ZG2qbdh0AZ4Qvq6M582hm1xVMqIiPjchVgsEg8q5iv2rBPxixA>.
- 13.Y. Monastyrskiy, V. Sistuk, I. Maksymenko Prospects for using truck trolley-assisted haulage systems in deep iron ore open pit mines. Vytautas Ostaševičius (pirmininkas). (2023). Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International Scientific Conference. P.705 – 709. <https://ebooks.ktu.edu/pdfreader/transport-means-2023.-part-ii.-proceedings-27th-international-scientific-conference>. doi:10.5755/e01.2351-7034.2023.P2.
- 14.Монастирський Ю.А., Максименко І.С. Перспективи застосування дизель-тролейвозів на залізничних кар'єрах Криворізького басейну// Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства», м. Кривий Ріг, КНУ, 2023 р. С.157.
- 15.Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0452202-08#Text>.
- 16.Technical and operational characteristics of Caterpillar machines. Directory. Published by Caterpillar Inc., Peoria, Illinois. 2007. - 1330 p.

## REFERENCES

- 1.Yurii Monastyrskiy, Volodymyr Sistuk, Volodymyr Potapenko, and Ivan Maksymenko. The sustainable future of open-pit trucks operation/ The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic. E3S Web of Conferences 166, 07005 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607005>.
- 2.Monastyrskiy Yu.A. Analiz adekvatnosti modeli tekhnichnoi ekspluatatsii systemy tekhnolohichnoho avtotransportu / Yu.A. Monastyrskiy, Maksymova O.S., Potapenko V.V., Maksymenko I.S. // Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti : nauk. zhurn. / Luts. nats. tekhn. un-t. – Lutsk, 2020. – № 2 (15). – S. 77-85. DOI: 10.36910/automash.v2i15.395.
3. Nalyvaiko, V. H. Konovaliuk, V. A. Rozrobka efektyvnykh sposobiv i zasobiv normalizatsii atmosfery robochykh zon karieriv/ Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia. Zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 34, Kyiv: KNUBA, 2020, s. 29-39.
- 4.Siemens patented all-electric Mobile Mining Truck based on proven technology / <https://imining.com/2021/11/04/siemens-patented-electric-mobile-mining-truck-based-proven-technology/>
- 5.Caterpillar introduces trolley assist system for CAT® electric drive mining trucks / [https://www.cat.com/en\\_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html](https://www.cat.com/en_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html)
- 6.Trolley assist for diesel-electric trucks in mining: 3 reasons why it is taking off. Thanks to Boliden's recent trial at its Aitik open-pit mine, in Sweden, the subject of trolley assist is back on the mining industry's agenda. / <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/systems-solutions/mining-electrification/trolley-assist-for-diesel-electric-trucks>
- 7.Trolley-assisted haul roads construction and maintenance / <https://www.globalroadtechnology-blog.com/industry-articles/trolley-assisted-haul-roads-construction-and-maintenance>
- 8.Liebherr Trolley Trucks Testing Success at Austrian Mine <https://www.heavyliftnews.com/liebherr-trolley-trucks-testing-success-at-austrian-mine/>
- 9.An introduction to trolley-assist haulage systems/ <https://globalroadtechnology.com/trolley-assist-haulage-systems/>
- 10.5 things you may not have known about the Trolley Assist System <https://www.liebherr.com/en/ind/latest-news/news-press-releases/detail/5-things-you-may-not-have-known-about-the-trolley-assist-system.html>
- 11.Can a dirty industry come clean? How mining equipment is becoming more sustainable / <https://www.mobilehydraulictips.com/can-a-dirty-industry-come-clean-how-mining-equipment-is-becoming-more-sustainable/>
- 12.Ferrexpo планує електрифікувати кар'єрний транспорт / <https://gmk.center/ua/news/ferrexpo-planuie-elektrizuvati-kar-iernij-transport/?fbclid=IwAR2skv5J7ZG2qbdh0AZ4Qvq6M582hm1xVMqIiPjchVgsEg8q5iv2rBPxixA>.

13.Y. Monastyrskiy, V. Sistuk, I. Maksymenko. Prospects for using truck trolley-assisted haulage systems in deep iron ore open pit mines. Vytautas Ostaševičius (pirmininkas). (2023). Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International Scientific Conference. P.705 – 709. <https://ebooks.ktu.edu/pdfreader/transport-means-2023.-part-ii.-proceedings-27th-international-scientific-conference>. doi:10.5755/e01.2351-7034.2023.P2.

14.Monastyrskiy Yu.A., Maksymenko I.S. Perspektyvy zastosuvannya dyzel-troleivoziv na zalizorudnykh karierakh Kryvorizkoho baseinu// Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Rozvytok promyslovosti ta suspilstva», m. Kryvyi Rih, KNU, 2023 r. S.157.

15.Metodyka rozrakhunku vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn ta parnykovykh haziv u povitria vid transportnykh zasobiv. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0452202-08#Text>.16. Technical and operational characteristics of Caterpillar machines. Directory. Published by Caterpillar Inc., Peoria, Illinois. 2007. - 1330 p.

**Y. Monastyrskiy, I. Maksymenko. The future of decarbonization for cars used in quarries.**

Increasing the depth of mining in quarries makes it necessary to find ways to reduce emissions of harmful substances from road transport, which is the main one in deep quarries. Based on the study of changes in fuel consumption during the transportation of rocks by quarry dump trucks and trolley assist with a lifting capacity of 90, 130 and 220 tons, we can find that regularities of changes in linear fuel consumption from the duration of movement with cargo by quarry dump, що trucks with electromechanical transmission are established. The average calculated linear fuel consumption for dump trucks with a load capacity of 90 tons is 10-12 L/km, 130 tons – 16-18 L/km, 220 tons – 24-26 L/km. Lower values correspond to longer routes due to a lower share of fuel consumption during unproductive operations of the transport cycle. A parabolic dependence of the specific fuel consumption of a trolley assist on the length of the route and a linear dependence of the specific fuel consumption of a trolley assist on the trolleybus section of the route has been proven. It is established that the absolute length of the route does not significantly affect the specific fuel consumption; thus, the trolley section in the total length of the route has a more significant impact. With an increase in the trolley part of the track from 30 to 70%, the value of relative fuel consumption decreases from 0.76 to 0.41 on the longest track. To reduce emissions of harmful substances into the atmosphere when implementing trolley assistance, it is necessary to have routes of maximum length with the maximum length of the trolley section, this can lead to a reduction of 2.5 times.

**Keywords:** quarry dump truck, trolley assist, fuel consumption, harmful substance emissions, decarbonization.

*МОНАСТИРСЬКИЙ Юрій Анатолійович*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту Криворізького національного університету, e-mail: monastirskiy08@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8282-3929>

*МАКСИМЕНКО Іван Сергійович*, аспірант Криворізького національного університету, e-mail: ivan2020maksimenko@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8285-9606>

*Yuri MONASTYRSKIY*, Doctor of Technical Sciences , Professor, Head of Automobile Facilities Department, Kryvyi Rih National University, e-mail: monastirskiy08@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-8282-3929>

*Ivan MAKSYMENKO*, Graduate Student of Kryvyi Rih National University, e-mail: ivan2020maksimenko@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8285-9606>

DOI 10.36910/automash.v1i22.1367