

УДК 621.878.4

КОРЕЛЯЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДОСЛІДЖЕННЯМИ ПРОЦЕСУ ПОДОЛАННЯ ОДИНИЧНОЇ НЕРІВНОСТІ КОРОТКОБАЗОВИМ НАВАНТАЖУВАЧЕМ

МУСАЄВ З. Р.^{1*}, асистент.

¹ Кафедра будівельних та дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Харківський національний автомобільно – дорожній університет», вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, Україна, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: 0336musaev@gmail.com, Тел. +380980444384, ORCID 0000-0002-5533-0897

Анотація. Постановка проблеми. Актуальність роботи полягає в створенні і вдосконаленні будівельних і дорожніх машин шляхом впровадження інформаційних технологій у проектування їх робочих процесів. У даній статті розглянуто транспортний режим малогабаритного навантажувача ПМТС 1200, а саме, процес подолання навантажувачем одиначної нерівності. Постійно зростаючі обсяги робіт у будівництві визначають необхідність випуску поряд з машинами середнього й важкого класу малогабаритних машин багатоцільового призначення, що дозволяють істотно знизити частку ручної праці. Завдяки універсальності, економічності, високій мобільності й маневреності, а також простоті керування в сполученні зі швидкою зміною робочих органів, короткобазові навантажувачі служать високоефективним засобом механізації ручної праці. З іншого боку, через коротку базу й центр мас, що конструктивно розташований ближче до задньої осі, у деяких випадках транспортного режиму, а саме, при подоланні нерівностей робочої поверхні короткобазовий навантажувач частково втрачає стійкість. Вітчизняний і закордонний досвід використання малогабаритних машин також свідчить про недостатню стійкість, особливо якщо мова йде про транспортні операції. Внаслідок цього, експлуатаційна продуктивність даного класу машин значно нижче заявленої. Комп'ютерна модель процесу переїзду одиначної нерівності короткобазовим навантажувачем виконувалася у програмних комплексах Autodesk Inventor 2016 та ANSYS 2013. За результатами досліджень були перевірені коректність імітаційної моделі згідно з результатами експерименту, проведена кореляція результатів комп'ютерного моделювання з даними отриманими шляхом експериментальних досліджень. **Мета.** Дати кількісну оцінку адекватності комп'ютерного моделювання транспортного режиму навантажувача в порівнянні з отриманими даними аналогічного процесу у польових умовах. **Висновок.** Кореляція даних отриманих методами комп'ютерного моделювання, яка проводилася за критерієм Пірсона свідчить про достатню адекватність комп'ютерної моделі натурної машини.

Ключові слова: моделювання; кореляція; транспортний режим; навантажувач; адекватність

КОРРЕЛЯЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ ПРОЦЕССА ПРЕОДОЛЕНИЯ ЕДИНИЧНОЙ НЕРОВНОСТИ КОРОТКОБАЗОВЫМ ПОГРУЗЧИКОМ

МУСАЕВ З. Р.^{1*}, асистент.

¹ Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение «Харьковский национальный автомобильно – дорожный университет», ул. Ярослава Мудрого 25, г. Харьков, Украина, Тел. +38(057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: 0336musaev@gmail.com, Тел. +380980444384, ORCID 0000-0002-5533-0897

Аннотация. Постановка проблемы. Актуальность работы заключается в создании и совершенствовании строительных и дорожных машин путем внедрения информационных технологий в проектирование их рабочих процессов. В данной статье рассмотрены транспортный режим малогабаритного погрузчика ПМТС 1200, а именно, процесс преодоления погрузчиком единичной неровности. Постоянно растущие объемы работ в строительстве определяют необходимость выпуска рядом с машинами среднего и тяжелого класса малогабаритных машин многоцелевого назначения, позволяющие существенно снизить долю ручного труда. Благодаря универсальности, экономичности, высокой мобильности и маневренности, а также простоте управления в сочетании с быстрой сменой рабочих органов, короткобазовые погрузчики служат высокоэффективным средством механизации ручного труда. С другой стороны, из-за короткой базы и центра масс, конструктивно расположенного ближе к задней оси, в некоторых случаях транспортного режима, а именно, при преодолении неровностей рабочей поверхности машина частично теряет устойчивость. Отечественный и зарубежный опыт использования малогабаритных машин также свидетельствует о недостаточной устойчивости, особенно, если речь идет о транспортных операциях. В результате, эксплуатационная производительность данного класса машин значительно ниже заявленной. Компьютерная модель процесса переезда одиначной неровности короткобазовым погрузчиком выполнялась в программных комплексах Autodesk Inventor 2016 и ANSYS 2013. По результатам исследований были проверены корректность имитационной модели согласно результатам эксперимента, проведена корреляция результатов компьютерного моделирования с данными полученными путем экспериментальных исследований. **Цель.** Дать количественную оценку адекватности компьютерного моде-

лирования транспортного режима погрузчика по сравнению с полученными данными аналогичного процесса в полевых условиях. **Вывод.** Корреляция данных полученных методами компьютерного моделирования, которая проводилась по критерию Пирсона, свидетельствует о достаточной адекватности компьютерной модели натурной машины.

Ключевые слова: моделирование; корреляция; транспортный режим; погрузчик; адекватность

CORRELATION OF THE RESULTS OF COMPUTER MODELING WITH EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE PROCESS OF MOVING A SINGLE OBSTACLE BY COMPACT LOADER

MUSAIEV Z. R.^{1*}, *assistant.*

¹ Department of building and road machines, State Higher Education Establishment «Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudry str. 25, Kharkiv, Ukraine, Tel. +38 (057) 7003866, e-mail: admin@khadi.kharkov.ua, e-mail: 0336musaev@gmail.com, Тел. +380980444384, ORCID 0000-0002-5533-0897

Abstract. Problem setting. The topicality of the work lies in creation and perfection of building and road machines through the introduction of information technology in the design of working processes. In this article, the transport mode of the small loader PMTC 1200 is considered, namely, the process of moving over a single obstacle. Constantly growing amounts of work in construction determine the need for the release of small multi-purpose machines near the middle and heavy class machines, which can significantly reduce the share of manual labor. Due to its versatility, economy, high mobility and maneuverability, as well as ease of control, combined with the rapid change of working bodies, the short base and loaders serve as a highly efficient means of mechanizing manual labor. On the other hand, due to the short base and center of mass, structurally located closer to the rear axle, in some cases of the transport mode, namely, when overcoming the unevenness of the working surface of the short-loader, the loader partially loses stability. Domestic and foreign experience in using small-sized machines also indicates a lack of sustainability, especially when it comes to transport operations. As a result, the operational performance of this class of machines is significantly lower than stated. The computer model of the process of moving a single obstacle by loader was performed in the Autodesk Inventor 2016 and ANSYS 2013 software systems. The results of the studies tested the correctness of the simulation model according to the results of the experiment, correlating the results of computer simulation with the data obtained by experimental studies. **Goal.** Give a quantitative assessment of the adequacy of the computer modeling of the loading mode of the loader in comparison with the obtained data of a similar process in field conditions. **Conclusion.** Correlation of the data obtained by computer simulation methods, which was carried out according to the Pearson criterion, testifies to the sufficient adequacy of the computer model of a model car.

Keywords: modeling; correlation; transport mode; loader; adequacy

Проблема. В умовах дорожнього, комунального, місцевого та промислового будівництва при підвищенні обсягу виконуваних робіт виникає необхідність збільшення виробництва короткобазових колісних навантажувачів(КБН). В Україні даний вид техніки виробляється на більш ніж 40 підприємствах серед яких Бердянський завод сільгосптехніки "Альфа", Харківський завод будівельних і дорожніх машин та ін., а також підприємства орієнтовані на експорт вітчизняної продукції за кордон. Цей тип навантажувачів широко використовується як у великих підприємствах, так і в промисловості малих масштабів, в особистих господарствах. Саме тому, у якості приклада було обрано даний вид ЗТМ. У зв'язку з впровадженням інформаційних технологій у проектування робочих процесів БДМ виникає проблема точності отриманих даних. Так за допомогою різноманітних програмних продуктів вирішуються складні задачі, що пов'язані із проектуванням машин та механізмів, проте адекватність даних імітаційних моделей викликає деякі запитання. Впровадження технології аналізу динаміки робочих і транспортних режимів будівельних та дорожніх машин дозволить вивести рішення завдань динамічного аналізу на новий якісний рівень. [1;2]

Аналіз публікацій. У роботах Єфименка О. В., Мусаєва З. Р. моделюється взаємодія пневматичної шини колеса з твердою опорною поверхнею [3; 4; 5; 6]. У роботах О. В. Чернікова, І. Г. Кириченка, А. І. Москаленка описуються методи визначення динамічних навантажень при зіткненні робочого обладнання навантажувача з жорсткою перешкодою [8; 9]. Розроблено методіку застосування комп'ютерних технологій при моделюванні переїзду навантажувача через перешкоду [10]. Було проведено дослідження моделювання руху фронтального навантажувача [3]. Також виявлені переваги комп'ютерного моделювання дорожніх машин [13;14].

Мета роботи полягає у встановленні кореляції результатів комп'ютерного моделювання з результатами експериментальних досліджень[7]. При цьому розглядався транспортний режим навантажувача, а саме, процес подолання КБН одиничної перешкоди. (рис. 1).

Викладення основного матеріалу. У якості об'єкту дослідження було обрано малогабаритний навантажувач ПМТС 1200 (рис.1а). Опису моделі передую огляд існуючих комп'ютерних пакетів, та їх чисельні методи, за допомогою яких можливо візуалізувати подібні динамічні процеси.

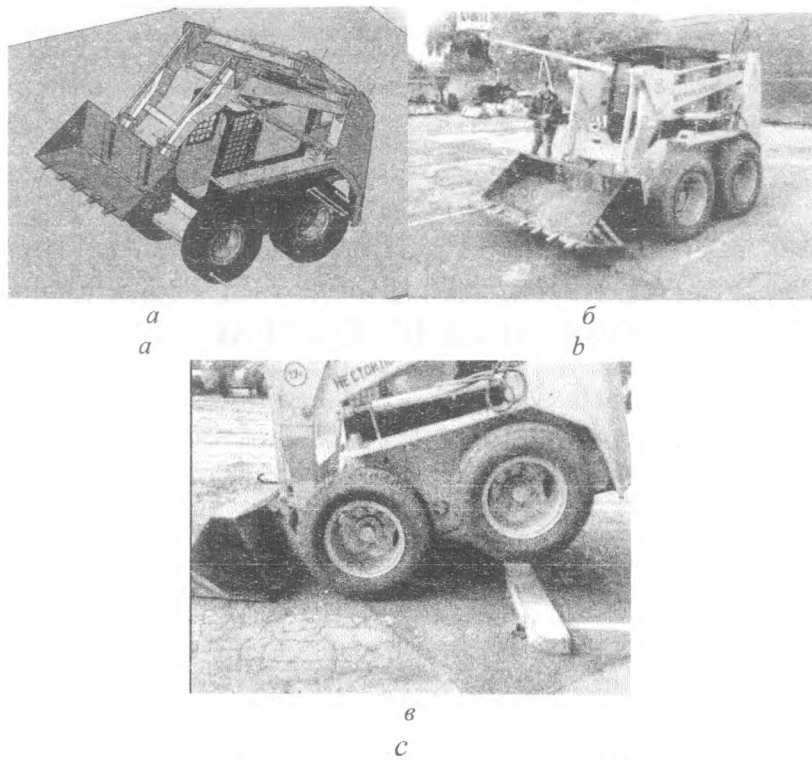


Рис. 1. Малогабаритний навантажувач ПМТС 1200

a) комп'ютерна модель; б) натурна машина; в) процес подолання КБН одиначної перешкоди

Fig. 1. Compact loader PMTS 1200

a) computer model; b) full-scale machine; c) process of overcoming a single roughness by a compact loader

Для оцінки вірогідності отриманих результатів здійснювалося узгодження експериментальних і розрахункових даних по зусиллю, яке розвивалось штоками гідроциліндрів підйому стріли (рис. 2).

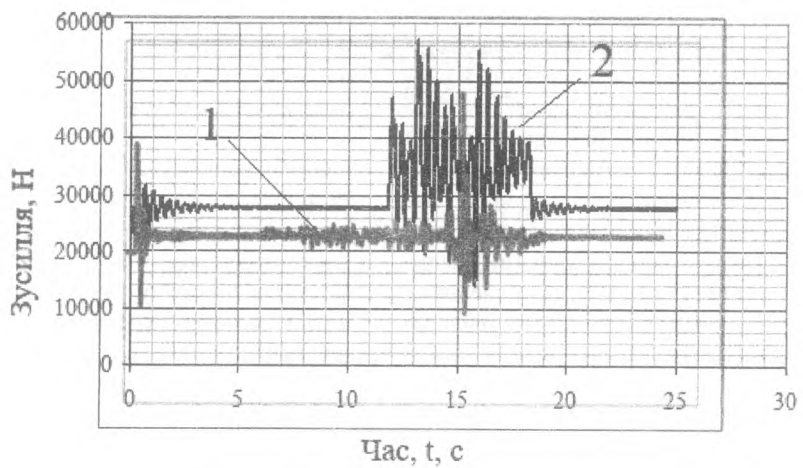


Рис. 2. Порівняння осцилограм зусиль гідроциліндра підйому стріли, отриманих при комп'ютерному моделюванні та експериментальних дослідженнях

1 – результати експериментальних досліджень; 2 – результати комп'ютерного моделювання

Fig. 2. Comparison of oscillograms of efforts of a hydraulic cylinder of raising of an arrow, received at computer modeling and experimental researches

1 – experimental results; 2 – computer simulation results

Оцінка адекватності комп'ютерної моделі натурної машини виконувалася за критерієм Пірсона χ^2 [7; 12]. При цьому, було обрано, приклад при найбільшій розбіжності експериментальних і розрахункових величин. Розрахунок було виконано у програмному середовищі Mathcad.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^q \frac{(f_i - Y_i)^2}{Y_i}, \quad (1)$$

де Y_i – експериментальне значення зусилля гідроциліндра, що розвивається штоком;

f_i – функція, задана рівнянням апроксимації;

q – число ступенів свободи.

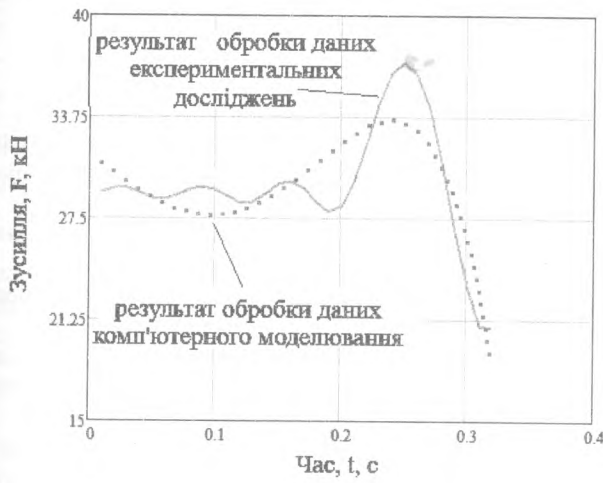
Число ступенів свободи визначається співвідношенням

$$q = m - S - 1, \quad (2)$$

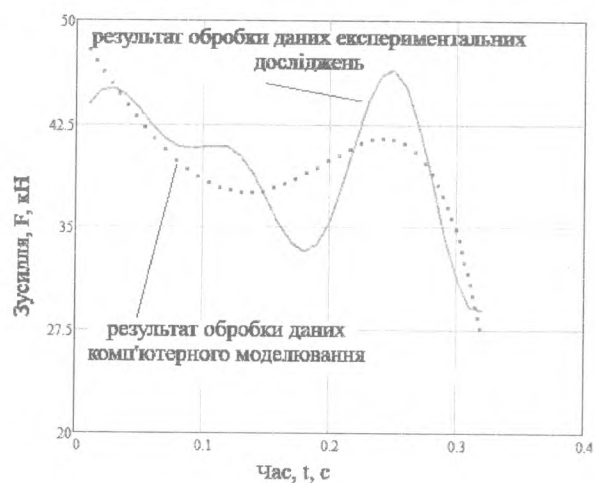
де m – число експериментальних точок ($m = 32$);

S – число констант рівняння регресії ($S = 4$).

Після підстановки даних було отримано, що $\chi^2 = 3.733$.



а
а



б
б

Рис. 3. Залежність зусилля в гідроциліндрі підйому стріли КБН від часу при: а і б відповідно мінімальне і максимальне заповнення ковша.

Fig. 3. Dependence of the force in the cylinder lifting the boom from time to time a and b respectively, the minimum and maximum filling of the bucket

Зіставлення розрахункових даних отриманих шляхом комп'ютерного моделювання і експериментальних осцилограм показує, що за максимальним значенням простежується деяка невідповідність, але по характеру кривих вони схожі (рис. 3). Це пов'язано з особливостями моделювання використовуваних у даній роботі програмних пакетах. Справа в тому що, такі програми як SolidWorks або Autodesk Inventor не

враховують пружні властивості еластичних матеріалів, хоча й мають достатню точність. Перевірка за критерієм Пірсона свідчить, що дані, отримані методами комп'ютерного моделювання збігаються з експериментальними на 73%, що свідчить про достатню адекватність комп'ютерної моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виноградова Н. А. Автоматизированные системы научных исследований / Н.А. Виноградова, А.А. Есюткин, Г.Ф. Филаретов. // М. 2005, Вып. № 4, с. 87.
2. Гузненков В. Н., Журбенко П. А. AUTODESK INVENTOR 2012. Трёхмерное моделирование деталей и создание чертежей / Гузненков В. Н., Журбенко П. А. // Учебное пособие. – Литресс: 2012.
3. Єфименко О. В. Експериментальні дослідження малогабаритного навантажувача при переїзді через одиночну перешкоду / О. В. Єфименко, Т. В. Плугіна, З. Р. Мусаєв // Строительство Материаловедение Машиностроение: сб. науч. тр. – 2018. – Вып. 103. С. 83 – 90.
4. Єфименко О. В. Моделювання робочих процесів однокішшових навантажувачів за допомогою «Auto-Desk Inventor» / О. В. Єфименко, Т. В. Плугіна, З. Р. Мусаєв // Строительство Материаловедение Машиностроение: сб. науч. тр. – 2016. – Вып. 88. С. 179 – 184.
5. Єфименко О. В. Моделювання робочого обладнання малогабаритного навантажувача за допомогою сучасних програмних засобів / О. В. Єфименко, Т. В. Плугіна, З. Р. Мусаєв // Вісник східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля: науковий журнал. – 2017. – Вып. 4. С. 98 – 102.
6. Єфименко О. В. Проектування будівельних та дорожніх машин шляхом порівняння результатів їх комп'ютерного та фізичного дослідження / О. В. Єфименко, Т. В. Плугіна, З. Р. Мусаєв // Строительство Материаловедение Машиностроение: сб. науч. тр. – 2017. – Вып. 97. С. 99 – 105.
7. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. — М.: Наука, 1973.
8. Кириченко І. Г., Черніков О. В. Комп'ютерне моделювання дорожніх машин / І. Г. Кириченко, О. В. Черніков // XIV Международная научно-техническая конференция «Прогрессивная техника, технология и инженерное образование» Севастополь, 25-28 июня 2013 г: Материалы конференции. – Киев: НТУУ «КПИ», 2013. – Ч. 2. – С. 46-48.
9. Москаленко А. І., Черніков О. В. Применение компьютерных технологий при моделировании переезда фронтального погрузчика через препятствие / А. І. Москаленко, О. В. Черніков // Прикл. геометрія та інж. графіка. – К.: КНУБА, 2011. – Вып. 88. – С. 234-238.
10. Хачатуров А. А. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель / А.А Хачатуров // М.: Машиностроение, 1967. – 323 с.
11. Хмара Л. А., Дахно О. В., Моделювання процесу копання ґрунту телескопічним робочим обладнанням однокішшового гідравлічного екскаватора [Електронний ресурс] / Л. А. Хмара, О. Дахно // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. - 2014. - Вып. 84. - С. 11-23.
12. Хмара Л. А., Спільник М. А., Тимошпольский А. Ю. Порівняльний аналіз ефективності використання напівкруглого днища у ковшах скреперів [Електронний ресурс] / Л. А. Хмара, М. А. Спільник, А. Ю. Тимошпольский // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Подъёмно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. - 2014. - Вып. 79. - С. 71-79.
13. Черніков О. В., Кириченко І. Г., Москаленко А. І. Комп'ютерне моделювання та аналіз кінематичних особливостей робочого обладнання фронтального навантажувача. / О. В. Черніков, І. Г. Кириченко, А. І. Москаленко // Прикл. геометрія та інж. графіка. – К.: КНУБА, 2010. – Вып. 86. – С. 107-111.
14. Черніков О. В., Москаленко А. І., Оболенський О. С. Дослідження руху фронтального навантажувача в пакеті Autodesk Inventor / О. В. Черніков, А. І. Москаленко, О. С. Оболенський // Прикл. геометрія та інж. графіка. – К.: КНУБА, 2012. – Вып. 89. – С. 382-386.

REFERENCES

1. Kirichenko I.G., Chernikov O.V. *Kompyuternoe modelirovanie dorozhnyx mashin*. [Modeling of computer road vehicles]. XIV mezhdunarodnaya nauchno-texnicheskaya konferenciya «progressivnaya texnika, texnologiya i inzhenernoe obrazovanie» sevastopol, 25-28 iyunya 2013 g [Materials of conference]. K: NTU «KPI», 2013. – ch. 2. – s. 46-48.
2. Chernikov O.V., Kirichenko I.G., Moskalenko A.I. *Komp'yuterne modelyuvannya ta analiz kinematichnix osoblivostej robochogo obladdannya frontalnogo navantazhuvacha*. [Computer simulation and analysis of the kinematic features of working equipment front loader.]. Prikl. geometriya ta Inzh. grafika K.: KNUBA, 2010. – Vyp. 86. – S. 107-111.

3. Chernikov O.V., Moskalenko A.I., Obolenskij O.S. *Doslidzhennya ruxu frontalnogo navantazhuvacha v paketi autodesk inventor*. [Investigation of the front loader package Autodesk Inventor]. Prikl. geometriya ta Inzh. grafika. K.: KNUBA, 2012. – Vyp. 89. – S. 382-386.
4. Gusnenkov V.N., Jurbenko P.A. *Autodesk Inventor 2012. Trohmernoje modelirovanie detalei I sosdanie chertegei* [Three-dimensional modeling of parts and the creation of drawings]. *Uchebnoe posobie* [Tutorial]. Litress: 2012.
5. Hachaturov A.A. *Dinamika sistemy doroga-shina-avtomobil-voditel* [system dynamics road-tire-car-driver]M.: Mashinostroenie, 1967. – 323 s.
6. Yefymenko O.V. Eksperymentalni doslidzhennia malohabarytnoho navantazhuvacha pry pereizdi cherez ody-nochnu pereshkodu [experimental studies of small loader when moving through a single obstacle] / O.V. Yefymenko, T.V. Pluhina, Z.R. Musaiev // *Stroytelstvo Materialovedenye Mashynostroenye: sb. nauch. tr.* – 2018. – Vyp. 103. S. 83 – 90.
7. Yefymenko O.V. Proektuvannia budivelnykh ta dorozhnykh mashyn shliakhom porivniannia rezultativ yikh kompiuternoho ta fizychnoho doslidzhennia [design of construction and road machines by comparing their computer and physical experiment] / O.V. Yefymenko, T.V. Pluhina, Z.R. Musaiev // *Stroytelstvo Materialovedenye Mashynostroenye: sb. nauch. tr.* – 2017. – Vyp. 97. S. 99 – 105.
8. Kendall M., Styuart A. *Statisticheskie vyivodyi i svyazi* [statistical inferences and relationships]. — M.: Nauka, 1973.
9. Khmara L.A., Dakhno O.V., Modeliuvannia protsesu kopannia gruntu teleskopichnym robochym obladnanniam odnokivshevoho hidravlichnoho ekskavatora [Simulation of soil digging process by telescopic work equipment of a single-hull hydraulic excavator] [Elektronnyi resurs] / L.A. Khmara, O. Dakhno // *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny.* - 2014. - Vyp. 84. - S. 11-23.
10. Khmara L.A., Spilnyk M.A., Tymoshpolskyi A. Yu. Porivnialnyi analiz efektyvnosti vykorystannia napiv-krulohlo dnyshcha u kovshakh skreperiv [Comparative analysis of the effectiveness of the use of a semi-circular bottom in scraper buckets] [Elektronnyi resurs] / L.A. Khmara, M.A. Spilnyk, A. Yu. Tymoshpolskyi // *Stroytelstvo. Materialovedenye. Mashynostroenye. Seryia : Pod'emno-transportnye, stroytelnye y dorozhnye mashyny y oborudovanye.* - 2014. - Vip. 79. - S. 71-79.
11. Moskalenko A.I., Chernikov O.V. *Primenenie kompyuternykh tekhnologiy pri modelirovanii perezda frontalnogo pogruzchika cherez prepyatstvie* [Application of computer technologies in modeling movement through obstacles loader]. Prikl. geometriya ta Inzh. grafika. K.: KNUBA, 2011. – Vip. 88. – S. 234-238.
12. Vinogradova N.A. *Avtomatizirovannyye sistemy nauchnykh issledovaniy* [automated research systems] / N.A. Vinogradova, A.A. Esyutkin, G.F. Filaretov. // M. 2005, Vyp. # 4, s. 87.
13. Yefymenko O.V. Modelyuvannia robochoho obladnannya malohabarytnoho navantazhuvacha za dopomohoyu suchasnykh prohramnykh zasobiv [Modeling of the working equipment of a small-sized loader with the help of modern software] / O.V. Yefymenko, T.V. Pluhina, Z.R. Musaiev // *Visnyk skhidnoukrayins'koho natsional'nogo universytetu im. Volodymyra Dalya: naukovyy zhurnal.* – 2017. – Vyp. 4. S. 98 – 102.
14. Yefymenko O.V. Modelyuvannia robochykh protsesiv odnokivshovykh navantazhuvachiv za dopomohoyu «AutoDesk Inventor» [Modeling of work processes of single-member loaders using "AutoDesk Inventor"] / O.V. Yefymenko, T. V. Pluhina, Z. R. Musaiev // *Stroytel'stvo Materialovedenye Mashynostroenye: sb. nauch. tr.* – 2016. – Vyp. 88. S. 179 – 184.