

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФРОНТАЛЬНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ**

© **Кириченко І.Г., Мусаєв З.Р., Вороновський Д.В.**

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

### **Інформація про авторів:**

**Кириченко Ігор Георгійович:** ORCID: 0000-0002-2128-3500; kyrig@ukr.net; доктор технічних наук; професор кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

**Мусаєв Заур Разілович:** ORCID: 0000-0002-5533-0897; zaur.musaiev92@gmail.com; кандидат технічних наук, асистент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

**Вороновський Деніс Валентинович:** аспірант кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

В статті представлені результати комп'ютерного моделювання навантажувачів середнього класу з шарнірними рамами, а також малогабаритних навантажувачів з бортовим механізмом повороту. Використання модульних технологій віртуального проєктування технічних об'єктів, а також модульного формування програмних засобів в середовищах Autodesk Inventor та Ansys дозволяє суттєво прискорити процес створення нових машин та їх віртуальних випробувань з метою оптимізації конструктивного виконання. Запропоновано впровадження віртуальних лабораторій для проведення науково-дослідницьких і проєктних робіт в машинобудівній царині. Представлені результати роботи викладачів і студентів механічного факультету ХНАДУ зі створення таких лабораторій і деяких результатів віртуальних досліджень на прикладі фронтальних навантажувачів.

**Ключові слова:** навантажувач, віртуальна лабораторія, комп'ютерне моделювання.

**Kyrychenko I., Musaiev Z., Voronovsky D.** «Computer simulation of front loaders».

The article presents the results of computer modeling of medium class loaders with articulated frames, as well as small-sized loaders with an on-board turning mechanism. The use of modular technologies for the virtual design of technical objects, as well as the modular formation of software tools in the Autodesk Inventor and Ansys environments, allows significantly speeding up the process of creating new machines and their virtual tests in order to optimize the constructive execution. It is proposed to introduce virtual laboratories for conducting research and project work in the field of machine building. The paper presents the results of the work of teachers and students of the Mechanical Faculty of Kharkiv National Automobile and Highway University dedicated to the creation of such laboratories, and some results of virtual research based on the example of front loaders.

**Keywords:** loader, virtual laboratory, computer simulation.

### **Вступ**

Сучасний стан виготовлення та експлуатації технологічних машин характеризується впровадженням модульних технологій і конструктивних рішень [8]. Відомі світові виробники дорожньо-будівельної і комунальної техніки намагаються не тільки розширювати діапазон основних параметрів машин, що вже випускаються, а й збільшувати різноманітність

технічних рішень робочого і ходового обладнання цих машин. Удосконалення методів проєктування машин за рахунок переходу на комп'ютерно-інтегровані технології розрахунків, виконання креслень і 3D моделей, на яких можна проводити віртуальні дослідження, дає можливість суттєво скорочувати час на розробку технічної документації і постановку серійного виробництва.

Комп'ютерне моделювання надає великі можливості для скорочення часу проєктування машин, тому що конструктор може відворити декілька варіантів технічних рішень і оцінити їх ефективність по вибраним критеріям. Але досвід роботи по створенню комп'ютерних моделей машин і їх віртуальним випробувань, що накопичений в ХНАДУ, показує на необхідність створення віртуальних лабораторій. Віртуальна лабораторія, в нашому уявленні, це система розроблених програмних засобів зорієнтованих на вирішення конкретних локальних задач при застосуванні середовищ Autodesk Inventor, Ansys та інших.

### **Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

Комп'ютерне моделювання один з найпотужніших інструментів яким в наш час користуються інженери, що розробляють зразки дорожньо-будівельної техніки. Комп'ютерне моделювання це процес проєктування реальної машини, а також проведення віртуальних експериментів на цифровому об'єкті замість реального [1-3]. Комп'ютерні 3D моделі дозволяють досліджувати віртуальні машини у такий спосіб, що є неможливим при теоретичних дослідженнях. Комп'ютерне моделювання машин вирішує дві головні задачі: перше, це моделювання реальних технічних об'єктів у вигляді деталей, вузлів, агрегатів і з рештою самої машини, по друге це створення спрощених 3D моделей об'єктів на яких можна проводити випробування, експерименти і дослідження замість реальних машин. У першому варіанті є можливість виконання всіх необхідних 2D креслень та інших графічних і нормативних документів, що необхідні при проєктуванні машин [1-4].

Тому головним завданням яке вирішувалося на цьому етапі було формулювання вимог і алгоритмів створення 3D моделей для проведення експериментальних досліджень з метою надання рекомендацій для конструкторів технологічних машин на прикладі фронтальних навантажувачів.

### **Основний зміст**

Комп'ютерне моделювання в ХНАДУ виконується за допомогою пакету Autodesk Inventor Series. Основою цього пакета була програма Inventor Professional, що дозволяла створювати докладну цифрову модель виробу – цифровий прототип – моделюючи не тільки геометрію деталей, але і їх основні фізичні властивості [6]. З виходом нових версій програми, у яких було додане середовище динамічного моделювання та розрахунків на основі методу скінченних елементів, з'явилася можливість не просто моделювати рух механізму, а й проводити віртуальні експерименти з розробленими цифровими прототипами. Важливим аспектом досліджень у цих питаннях стає визначення необхідної деталізації моделей і припустимих спрощень.

Однією з найбільш затребуваною групою машин в різноманітних сферах будівельного і комунального виробництва є фронтальні навантажувачі. Машини цього типу, крім іншої продукції виготовляють всесвітньо відомі фірми «Caterpillar», «Volvo», «Libherr», «JCB», «Komatsu», «GENL», «Mustang», «Case», «John Deere», «New Holland», а також деякі інші. Фронтальні навантажувачі умовно можна розділити на дві категорії в залежності від типу ходового обладнання: це машини з шарнірними рамами і машини з бортовим механізмом повороту.

Проєктування навантажувачів вступило в новий етап розвитку, коли разом із зростанням складності проєктів досягається скорочення термінів та підвищення якості розробок, значною мірою за рахунок автоматизації і комп'ютеризації інженерних робіт.

Найбільшого поширення дістали інтерактивні системи, які дозволяють конструктору в ході одержання проєктних рішень вести діалог з комп'ютером на природній мові комп'ютерної графіки, де застосовуються геометричні моделі об'єктів, процесів та явищ, як найбільш наочні і зрозумілі інженеру. Вони забезпечують впровадження математичних методів у проєктування та технологічні процеси, займаючи все більш помітне місце серед ефективних інструментів інженерної діяльності [5].

Аналіз конструктивного виконання навантажувачів від передових виробників показує, що фірмами застосовується система «генетичного» проєктування, тобто структура об'єкту, що проєктується, залишається практично незмінною. Машини відрізняються своїми основними параметрами, такими як місткість базового ківша, маса, потужність тощо.

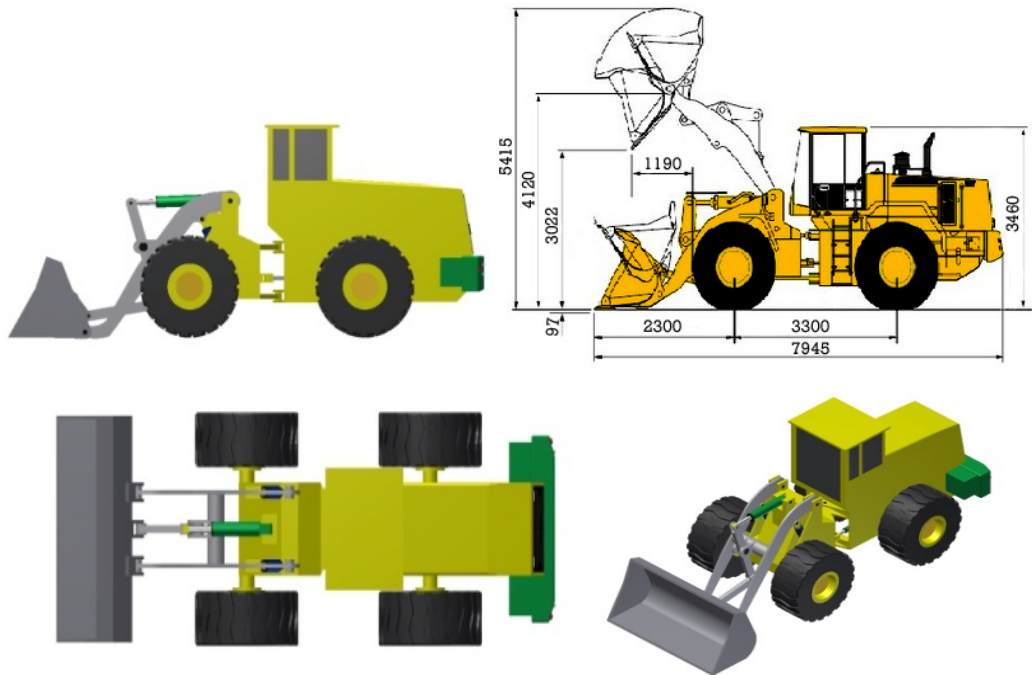
Таблиця 1 – Навантажувачі Libherr

Модель	Ківш (м <sup>3</sup> )	Маса (т)	Потужність (кВт)
L 524	1,7	10,4	86,0
L 538	2,2	12,8	104
L 550	3,1	17,8	168
L 560	3,5	23,5	200
L 580	4,5	26,9	219
L 586	5,0	32,6	263

Таблиця 2 – Навантажувачі JCB

Модель	Ківш (м <sup>3</sup> )	Маса (т)	Потужність (кВт)
407	1,0	5,11	48
409	1,2	5,95	55
411	1,4	8,72	81
417	1,6	9,60	97
427	2,4	14,31	123
437	2,7	15,17	145
457	3,5	20,19	210

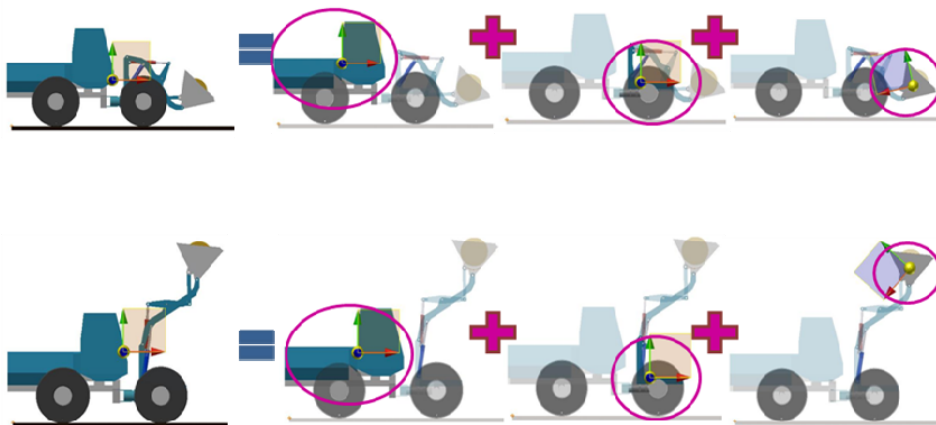
В таблицях представлені ці показники навантажувачів тільки на прикладі навантажувачів Libherr і JCB де місткість ківша  $q$  (м<sup>3</sup>), маса машини  $m$  (т), потужність двигуна  $N$  (кВт). В результаті обробки статистичної інформації встановлені наступні закономірності. Маса в тонах залежить від місткості ківша і визначається за формулою:  $m=(5,1-6,7)q$ , відповідно потужність залежить від маси машини:  $N=(8,1-10,4)m$ . Таким чином, для навантажувачів цієї групи достатньо розробити одну базову комп'ютерну модель, а потім тільки змінювати масштаб моделювання, як це робиться при створенні фізичних моделей. Слід зазначити, що проведення експериментів на комп'ютері дає змогу моделювати заданий процес із необмеженою кількістю варіантів і повторів, змінювати при цьому необхідні для дослідження параметри – це у свою чергу дозволяє одержати більше даних, які надалі можуть бути використані для оптимізації умов експлуатації фронтального навантажувача, або іншої машини [13]. В межах розробленої віртуальної лабораторії було сформовано декілька комп'ютерних моделей навантажувачів, які дозволяли вирішувати різноманітні конструкторські і дослідницькі завдання.



**Рис.1** – Загальний вид навантажувача та його 3D модель

Комп'ютерна 3D-модель навантажувача середнього класу (рис.1.), побудована в Autodesk Inventor, дозволяє ще на стадії проектування визначити критичні умови роботи машини. У розрахунках будівельних і дорожніх машин приймається, що центр ваги машини є фіксованим, нерухомим, а насправді він постійно змінює своє положення, як в статиці, так і при русі машини. Зміщення центру ваги значно впливає на ефективність роботи машини, на його тягові можливості, навантаженість металоконструкцій робочого і ходового обладнання, а з рештою і на стійкість, к у транспортному, так і в робочому режимах. Створення віртуальної лабораторії дозволяє досліджувати зміну положення центру тяжіння в реальному часі, при цьому з'являється можливість варіювати початковими параметрами машини.

Для дослідження зміни положення центру ваги була розроблена 3D модель (рис.2.), яка складалася з трьох конструктивних модулів: енергетичного (задня напіврама з кабіною), двигуном і приводом ведучих колес), технологічного (передня напіврама з робочим обладнанням) і окремо ківша (з можливістю зміни його розмірів і характеру вантажів) [9].



**Рис. 2** – Схема зміщення положення координат центру ваги для верхнього і нижнього положень

Інші комп'ютерні моделі, у межах цієї віртуальної лабораторії дозволяли досліджувати фактори, що діють у транспортних режимах. Визначалися реакції на ведучих колесах при наїзді на перешкоду, або при русі по наперед заданому профілю дороги, при цьому експерименти проводилися для різних значень швидкості, а також при заданому характері зміни швидкості. Були встановлені критичні бокового ухилу і швидкості повороту машини з точки зору її стійкості в транспортному режимі. Найскладнішим питанням виявилось моделювання тягово-зчепних якостей і отримання кривої ковзання (рис.3.)

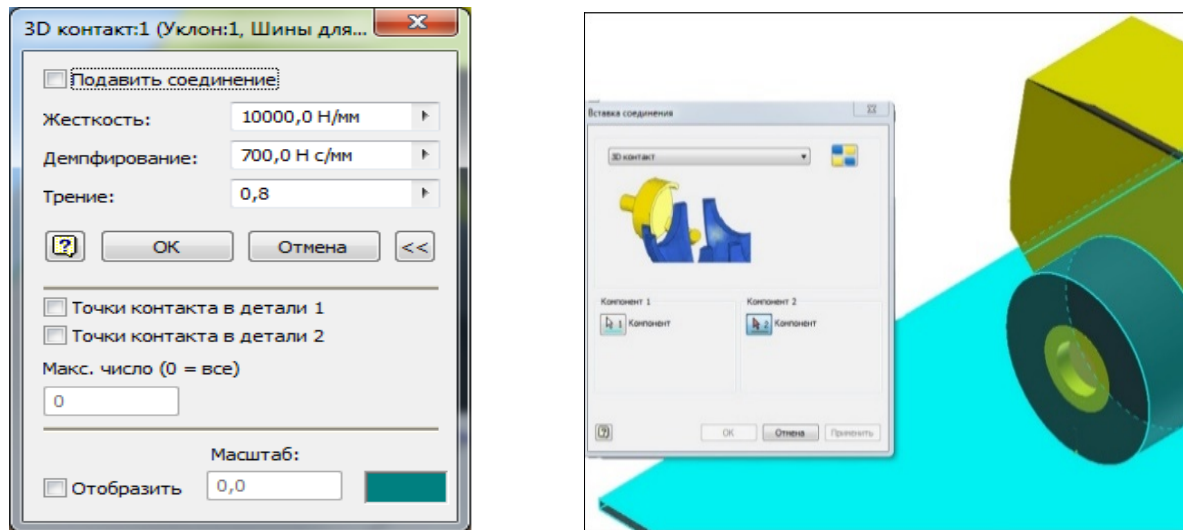


Рис. 3 – Параметри 3D контакту з опорною поверхнею

Друга група машин, що моделювалися у відповідній віртуальній лабораторії були навантажувачі з бортовим механізмом повороту. Найбільш відомими виробниками таких машин є «BOBCAT», «Caterpillar», «Volvo», «JCB», «Komatsu», «GENL», «Mustang», «Case», «John Deere», «New Holland», «Locust» та ін. В цих машинах застосовується гідрооб'ємний привід ходового обладнання [7; 10]. Для цієї групи машин співвідношення між місткістю ківша, масою машини і потужністю двигуна виглядає наступним чином [14]:

$$m=(2,8-4,3)q, N=(10,2-12,1)m.$$

Autodesk Inventor дозволяє підтримувати роботу з достатньо складними проектами і моделями. Але в інженерній і дослідницькій практиці краще використовувати спрощені комп'ютерні моделі з метою прискорення отримання результатів. Моделювання малогабаритних навантажувачів здійснювалося з використанням модульної технології будови програмних продуктів власного виробництва [8], а також використовувались модулі бібліотеки стандартних компонентів (рис.4.). В середовищі «Simulation» закладені закономірності Ньютонівської механіки, але ми не можемо знати якими саме рівняннями користується комп'ютер. Тому слід використовувати кібернетичний підхід при отриманні результатів віртуальних дослідів з машинами, або їх складовими частинами [11-12].

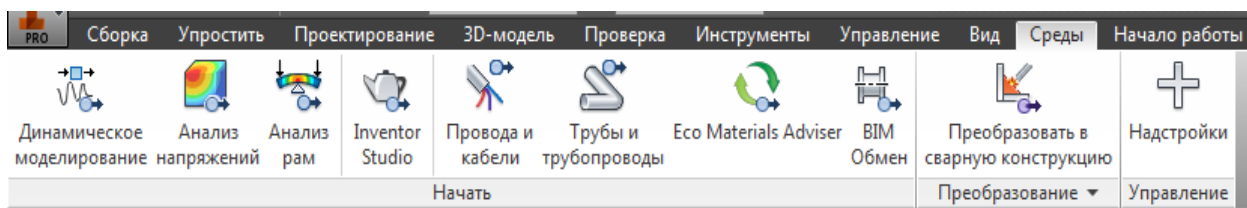


Рис. 4 – Розрахункові модулі програмного комплексу Autodesk Inventor

Всі необхідні команди для розрахунку динамічних процесів було проаналізовано та обрано у додатковому модулі «Динамічне моделювання», який розташовано у вкладці «середовища».

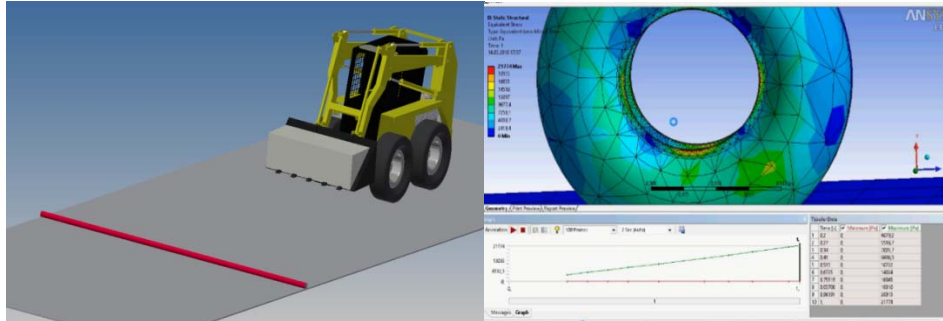


Рис. 5 – Візуалізація переїзду через перешкоду та навантаження колеса

Програмний модуль Autodesk Inventor «Динамічне моделювання» дозволяє вирішувати контактні задачі, зокрема визначати зміну нормальних реакцій на колесах навантажувача в різноманітних режимах роботи. Було досліджено зміну навантажень на колесах навантажувача при подоланні одиночної перешкоди. При проведенні віртуальних експериментів змінювалися параметри перешкоди (розміри, форма). Разом з цим була перевірена можливість експорту моделей в програмний комплекс ANSYS Workbench для подальшого аналізу деформованого стану колеса при подоланні перешкоди (рис.5.). Отримані при проведенні віртуальних експериментів результати були порівнювались з результатами отриманими на фізичних моделях.

### Висновки

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання навантажувачів різноманітного конструктивного виконання, а також порівняння отриманих даних з матеріалами експериментальних досліджень, що проводилися на натурних зразках машин, або на фізичних моделях, показує що відхилення окремих показників складають від 10 до 35 %.

Моделювання деяких процесів реальних машин викликають певні труднощі і поки що не можуть бути застосовані в науково-дослідницькій роботі і бути підґрунтям для формування практичних рекомендацій щодо зміни конструктивного виконання машин, зокрема навантажувачів. В першу чергу це стосується процесів взаємодії робочих органів з ґрунтом та іншими матеріалами.

Перспективним напрямком удосконалення методів комп'ютерного моделювання є створення віртуальних лабораторій на базі яких з мінімальними затратами часу можуть бути отримані достовірні результати робочих і транспортних операцій машин і їх окремих складових частин.

### Список використаних джерел:

1. Younis W. Up and Running with Autodesk® Inventor® Simulation 2011: A step-by-step guide to engineering design solutions / W. Younis. – Oxford : Elsevier, 2010. – 444 p.
2. Технология цифровых прототипов. Autodesk Inventor 2010. Официальный учебный курс. – Серия: САПР от А до Я. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 944 с.
3. Allen L. AutoCAD: Professional Tips and Techniques (Really Useful Ebooks) / L. Allen, S. Onstott. – Indianapolis : Wiley Publishing Inc., 2007. – 336 p.
4. Marsh D. Applied Geometry for Computer Graphics and CAD / D. Marsh. – 2 ed. – London : Springer, 2005. – 366 p.
5. Основи технічного регулювання будівельно-дорожніх машин : навч. посіб. МОН / І. Г. Кириченко [та ін.]. – Харків : ХНАДУ, 2014. – 512 с.

6. Аврунін Г. А. Гідравлічне обладнання будівельних та дорожніх машин : підручник / Г. А. Аврунін, І. Г. Кириченко, В. Б. Самородов. – Харків, 2016. – 436 с.
7. Объёмный гидропривод в мобильных подъёмниках с рабочими платформами / И. Г. Кириченко [и др.]. – Харьков : ХНАДУ, 2018. – 295 с.
8. Кириченко І. Г. Особливості комп'ютерного і фізичного моделювання екскаваторів / І. Г. Кириченко, О. Г. Гурко, О. В. Ярижко // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование.* – 2018. – Вып. 103. – С. 75–82.
9. Назаров Л. В. Динамическая устойчивость короткобазового погрузчика с бортовой системой поворота / Л. В. Назаров, Л. В. Разаренов // *Науковий вісник будівництва.* – 2009. – Вип. 55. – С. 217–224.
10. Єфименко О. В. Аналіз завантаженості гідроприводу малогабаритного навантажувача за допомогою simulink-моделей / О. В. Єфименко, О. В. Ярижко // *Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр.* – 2012. – Вип. 57. – С. 117–120.
11. Гейчук В. М. Динамічне моделювання механізмів верстатів та машин в Autodesk Inventor : навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / В. М. Гейчук, С. В. Вакулєнко. – Київ : НТУУ "КПІ", 2015. – 167 с.
12. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 у математиці й моделюванні : повний посіб. користувача / В. П. Дьяконов. – М. : Солоний-Пресс, 2003. – 576 с.
13. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
14. Нефьодов І. О. Засоби зменшення динамічних навантажень на вантажопідійомник фронтального навантажувача : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Нефьодов Іван Олександрович ; Одес. нац. політехн. ун-т. – Одеса, 2014. – 22 с.

#### References

1. Younis, W 2010, *Up and Running with Autodesk® Inventor® Simulation 2011 : A step-by-step guide to engineering design solutions*, Elsevier, Oxford.
2. *Tekhnolohiya tsyfrovyykh prototypov. Autodesk Inventor 2010. Ofytsyalniy uchebniy kurs, Seryia: SAPR ot A do Ya* 2010, DMK Press, Moskva.
3. Allen, L & Onstott, S 2007, *AutoCAD: Professional Tips and Techniques*, Wiley Publishing Inc., Indianapolis.
4. Marsh, D 2005, *Applied Geometry for Computer Graphics and CAD*, 2nd edn, Springer, London.
5. Kyrychenko, IH, Trishch, RM, Yanushkevych, DA, Moliavko, VI & Petrukovych, DІe 2014, *Osnovy tekhnichnoho rehulivannia budivelno-dorozhnikh mashyn*, Kharkivskiyi natsionalniy avtomobilno-dorozhniy universytet, Kharkiv.
6. Avrunin, HA, Kyrychenko, IH & Samorodov, VB 2016, *Hidravlichne obladnannia budivelnykh ta dorozhnikh mashyn*, Kharkiv.
7. Kirichenko, IH, Avrunin, GA, Samorodov, VB & Yaryzhko, AV 2018, *Obyemnyy gidroprivod v mobilnykh podyemnikakh s rabochimi platformami*, Kharkivskiyi natsionalniy avtomobilno-dorozhniy universytet, Kharkiv.
8. Kyrychenko, IH, Hurko, OH & Yaryzhko, OV 2018, 'Osoblyvosti kompiuternoho i fizychnoho modelivannia ekskavatoriv', *Stroytelstvo. Materyalovedenye. Mashynostroenye*, Seryia Podyemno-transportnyye, stroitelnyye, dorozhnyye mashiny i oborudovaniye, iss. 103, pp. 75-82.
9. Nazarov, LV & Razarenov, LV 2009, 'Dinamicheskaya ustoychivost korotkobazovogo pogruchika s bortovoy sistemoy povorota', *Naukoviy visnyk budivnytstva*, Kharkivskiyi derzhavniy tekhnichnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury, Kharkiv, iss. 55, pp. 217-224.
10. Iefymenko, OV & Yaryzhko, OV 2012, 'Analiz navantazhenosti hidropriyvodu malohabarytnoho navantazhuvacha za dopomohoiu simulink-modelei', *Visnyk Kharkivskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universytetu*, iss. 57, pp. 117-120.
11. Heichuk, VM & Vakulenko, SV 2015, *Dynamichne modelivannia mekhanizmiv verstativ ta mashyn v Autodesk Inventor*, Natsionalniy tekhnichnyi universytet Ukrainy Kyivskiyi politekhnichnyi instytut, Kyiv.
12. Dyiakoniv, VP 2003, *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 u matematytsi y modelivanni*, Soloniy-Press, Moskva.
13. Aliamovskiy, AA (et al.) 2005, *Solid Works. Kompiuternoe modelyrovanye v ynzhenernoі praktyke*, BKhV-Peterburh, Sankt-Peterburh.
14. Nefodov, IO 2014, 'Zasoby zmenshennia dynamichnykh navantazhen na vantazhopididomnyk frontalnoho navantazhuvacha', *Kand.tekhn.n. abstract*, Odeskiy natsionalniy politekhnichnyi universytet, Odesa.

Стаття надійшла до редакції 10 січня 2023 року