

**О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, О.В. МАРТИНЕНКО, Ю.В. КОСТЕНКО, Ю.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК,
А.В. НАБОКОВ, І.В. МАЗУР**

ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕМЕНТАХ ВІЙСЬКОВИХ КОЛІСНИХ ТА ГУСЕНИЧНИХ МАШИН ПРИ БОЙОВОМУ ЗАСТОСУВАННІ

У роботі пропонується розроблена методика дослідження напружено-деформованого стану гарматного ствола, що враховує криві, які описують зміну тисків порохових газів по гарматі і швидкості руху снаряда по каналу ствола, на прикладі танкової гармати типу КБА-3 при пострілі БОПС типу ЗВБМ17 "Манго". Дослідження були проведені при використанні різних типів аналізу, статичному аналізі та аналізі перехідних процесів, використовуючи метод скінчених елементів.

Ключові слова: метод скінчених елементів, напружено-деформований стан, статичний аналіз, аналіз перехідних процесів, гарматний ствол, тиск порохових газів, швидкість руху снаряда.

The paper proposes a methodology developed by the study of stress-strain state of the gun barrel, which takes into account the curves describing change pressure of the powder gases on the barrel and the speed of the projectile motion along the bore, the example of a tank gun type КБА-3 with the shot APFSDS (APSD-FS) type "Mango". For the studies used different types of analysis, static analysis and transient analysis, by means the finite element method. According to the results of the research obtained change and the distribution of the maximum equivalent stress and the total displacement in the barrel during a shot and determined dynamic factor.

Keywords: finite element method, the stress-strain state, static analysis, transient analysis, gun barrel, the pressure of powder gases, the velocity of the projectile.

В работе предлагается разработанная методика исследования напряженно-деформированного состояния орудийного ствола, учитывающая кривые, описывающие изменение давлений пороховых газов по стволу и скорости движения снаряда по каналу ствола, на примере танковой пушки типа КБА-3 при выстреле БОПС типа ЗВБМ17 "Манго". Исследования были проведены при использовании различных типов анализа, статическом анализе и анализе переходных процессов, используя метод конечных элементов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, статический анализ, анализ переходных процессов, орудийный ствол, давление пороховых газов, скорость движения снаряда

Вступ

Зовнішні навантаження, які діють на елементи військових колісних і гусеничних машин при бойовому використанні, у т.ч. – у бронекорпусах, є динамічними і височастотними. Відповідно, виникає питання про виникнення резонансних ефектів, і, отже, – завдання відлаштування від резонансів. Для вирішення цього завдання використовується певна кількість методів. З одного боку, можна провести відлаштування від резонансних частот за рахунок зміни фізико-механічних властивостей матеріалів, а, з іншого боку, – провести конструктивні зміни компонування елементів і вузлів та корпусу в цілому.

При цьому діюче зовнішнє навантаження має різну природу свого впливу. Прикладом таких навантажень можуть бути нерівності дорожнього покриття, які призводять до розгойдування корпусів військових колісних і гусеничних машин. Також резонансні ефекти можуть виникати при здійсненні пострілів із артилерійських систем [1]. При цьому розміщення внутрішнього обладнання і агрегатів, боєкомплекту, особового складу тощо також впливає на резонансні ефекти, що виникають у бойових колісних і гусеничних машинах. Деякі аспекти даної задачі висвітлені в роботах [2-5].

Досить складним є дослідження динамічних процесів пов'язаних із накладенням різних виникаючих його складових. Групою авторів у роботі [6] представлені результати роботи створеного спеціалізованого програмно-модельного комплексу, за допомогою якого було проведено оціночне дослідження впливу пружних деформацій елементів транспортних засобів на прикладі БТР-3Е на збурення напрямку осі каналу ствола артилерійської системи при здійсненні пострілів.

Однак при розгляді завдань у даному напрямку необхідно провести аналіз виникаючих динамічних ефектів в окремо розглянутих елементах бойових машин шляхом їх комп'ютерного моделювання. Такі дослідження допоможуть зрозуміти і оцінити ступінь впливу динамічних ефектів, створених в окремому елементі, і ступінь їхнього впливу на виникаючі динамічні ефекти в цілій системі бойової машини.

Прикладом такого елемента може бути ствол артилерійської системи, в якому можуть виникати динамічні ефекти при здійсненні пострілів. У роботі представлені результати дослідження динамічних ефектів, що виникають при стрільбі бронебійним опереним підкаліберним снарядом (БОПС) типу ЗВБМ17 "Манго" з танкового ствола типу КБА-3.

Постановка задачі

Внутрішня балістика займається вивченням руху снаряда вздовж каналу під дією порохових газів, результати якої використовуються як вихідні дані при проектуванні зарядів, снарядів, стволів та інших пристроїв. Внутрішня балістика має справу з високими температурами і тисками газу та малим часом процесу. Дані особливості досліджуваного процесу тягнуть за собою надзвичайну його складність і особливі труднощі при проведенні і вивченні експерименту.

© Веретельник О.В., Мартиненко О.В.,
Костенко Ю.В., Веретельник Ю.В.,
Набоков А.В., Мазур І.В., 2016

Таким чином, теоретичні методи наближені і базуються на недостатньо вивчених припущеннях та умовах [7].

Постріл є швидким процесом перетворення хімічної енергії пороху в теплову, а потім у кінетичну енергію системи "заряд – снаряд – ствол". Залежно від довжини ствола і типу заряду час пострілу лежить у діапазоні 2–7 мс.

Потрібно за цими вихідними даними розробити метод розрахунку напружено-деформованого стану ствола танкової гармати. При цьому однією з проблемних сторін є реалізація способу завдання рухомого навантаження на досліджуваний об'єкт.

Метод розв'язання

Як було відзначено, робота присвячена дослідженню напружено-деформованого стану танкового ствола типу КБА-3 при стрільбі бронебійним опереним підкаліберним снарядом типу ЗВБМ17 "Манго". Маючи у своєму розпорядженні дані про те, що початкова (дульна) швидкість відповідає 1700 м/с, а тиск газів в зарядній коморі – до 555 МПа при стрільбі БОПС типу ЗВБМ17 "Манго" [8], можна побудувати характерні криві, що описують зміну тиску порохових газів уздовж ствола і зміну швидкості руху снаряда уздовж каналу ствола під час пострілу. На рис. 1 представлені дані характерні криві (зміна тисків P порохових газів і швидкості v_d руху снаряда, відповідно) при моделюванні процесу пострілу (ці криві є характерними для більшості гарматних стволів).

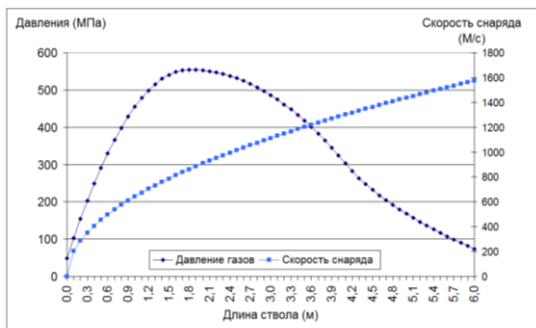


Рис. 1 – Зміна тиску порохових газів і зміна швидкості руху снаряда

Значення потрібних величин (тиск, час прикладання навантаження і ділянка, на якій прикладається цей тиск) отримані інтегруванням співвідношень:

$$v = \frac{ds}{dt} \Rightarrow \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v}, \quad (1)$$

при $t = 0: s = 0, v = 0$;

$$t = \int_0^s \frac{ds}{v(s)}, \quad (2)$$

$$\tau = \int_0^L \frac{ds}{v(s)}, \quad (3)$$

де τ – час проходження снаряда всієї довжини каналу ствола (для ствола типу КБА-3 $L = 6$ м, відповідно $\tau = 7,62$ мс).

На рис. 2 представлені часові залежності зміни

розподілу тиску порохових газів, швидкості руху і переміщення снаряда в каналі ствола гармати.

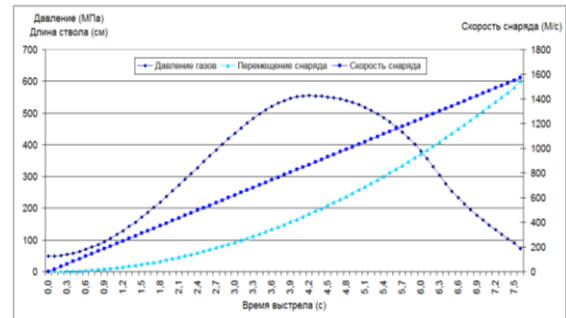


Рис. 2 – Часові зміни розподілу тиску порохових газів, швидкості руху і переміщення снаряда

Для дослідження процесу пострілу і аналізу отриманих напружень і переміщень ствола була побудована тривимірна геометрична модель в пакеті SolidWorks [9]. Далі геометрична модель була експортована в пакет Ansys Workbench [10]. У ньому була побудована вже скінченно-елементна модель (СЕМ), з призначенням відповідних фізико-механічних властивостей матеріалів, з визначенням навантаження і закріплення. Як навантаження прикладався тиск на вузли, які лежать на внутрішній поверхні каналу ствола. Величина тиску визначалась за кривою зміни тиску порохових газів (див. рис.1) для ділянки довжини внутрішнього каналу, що відповідає ділянці шляху, пройденому снарядом під час пострілу. Швидкість прикладання навантаження визначалась згідно швидкісного режиму проходження снаряда вздовж каналу ствола (див. рис. 1, 2).

Для аналізу використовувалися аналіз перехідних процесів (transient analysis) та статичний аналіз (static analysis). Розрахунок моделі з використанням різних типів аналізу дозволить визначити динамічний коефіцієнт навантаження, тим самим дасть змогу у подальших дослідженнях використовувати статичний аналіз з урахуванням динамічного коефіцієнта навантаження, і не використовувати аналіз перехідних процесів, що істотно скоротить розрахунковий час моделювання.

Чисельна реалізація

Геометрична модель була обрана в деякому наближенні (без дотримання точних розмірів та форм) до ствола танкової гармати типу КБА-3, з внутрішнім діаметром 125 мм, довжиною 6 м. Геометрична форма була побудована із спрощеннями. Дані спрощення стосувалися казенної частини – в моделі казенна частина виконана як єдине ціле тіло, і внутрішнього каналу ствола, який був виконаний у вигляді порожнини циліндричної форми. Також була використана симетрія у двох площинах, тобто була виділена 1/4 поздовжня частина ствола. Скінченно-елементна модель представлена на рис. 3. Скінченно-елементна модель налічувала 110 тис.

20-тивузлових кубічних елементів. Геометрична модель із доданим закріпленням зображена на рис. 4, а на рис. 5 – з накладеною симетрією.

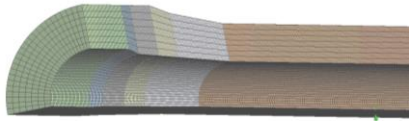


Рис. 3 – Скінченно-елементна модель ствола

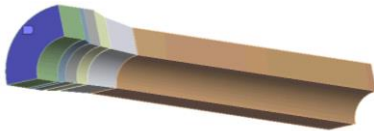


Рис. 4 – Геометрична модель із прикладеним закріпленням

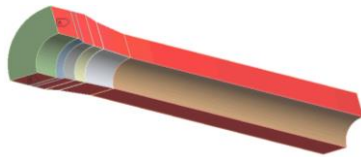


Рис. 5 – Геометрична модель із накладеною симетрією

Результати розрахунків

За результатами досліджень були отримані компоненти напружено-деформованого стану гарматного ствола. Були визначені максимальні числові показники для еквівалентних напружень і відповідні їм еквівалентні напруження та повні переміщення уздовж ствола (на рис. 6 представлений шлях, уздовж якого були отримані еквівалентні напруження і повні переміщення). На рис. 7, 8 зображені криві зміни еквівалентних напружень і повних переміщень уздовж шляху (див. рис. 6) проходження снаряда по стволі.



Рис. 6 – Шлях уздовж ствола

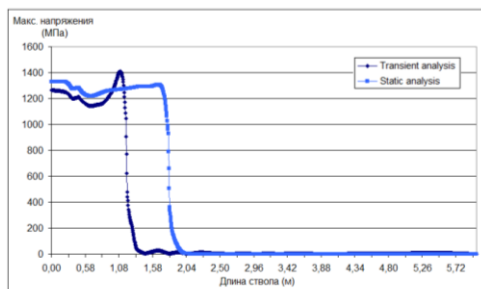


Рис. 7 – Еквівалентні напруження вздовж шляху

На рис. 9, 10 представлені криві, які описують зміну максимальних еквівалентних напружень і максимальних повних переміщень в стволі при моделюванні процесу пострілу, отримані в ході проведених розрахунків за допомогою різних аналізів – статичного аналізу та аналізу перехідних процесів, відповідно.

На рис. 11-14 представлені характерні поля розподілу еквівалентних напружень і повних переміщень для різних типів аналізу (статичного аналізу та аналізу перехідних процесів), відповідно.

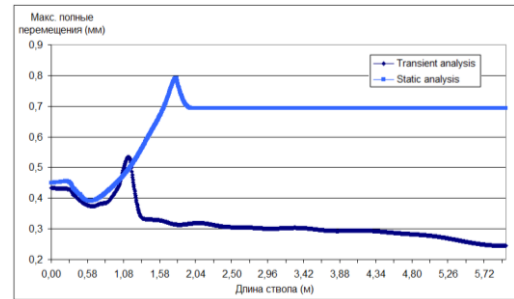


Рис. 8 – Повні переміщення вздовж шляху

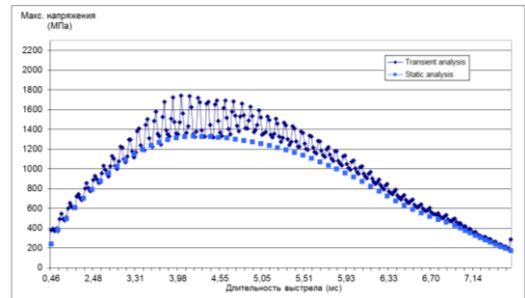


Рис. 9 – Максимальні еквівалентні напруження в стволі

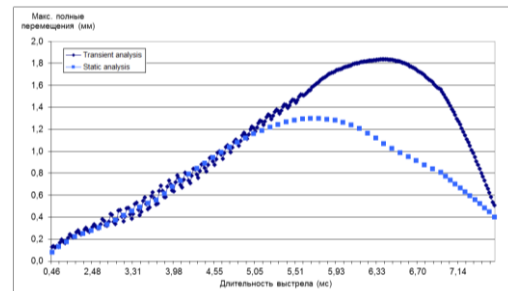


Рис. 10 – Максимальні повні переміщення в стволі

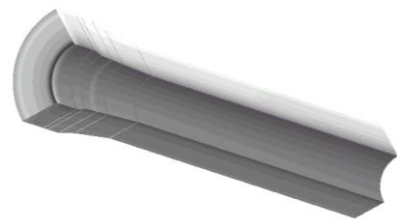


Рис. 11 – Еквівалентні напруження по von Mises (static analysis)

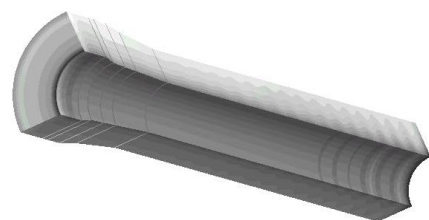


Рис. 12 – Еквівалентні напруження по von Mises (transient analysis)

Використовуючи результати, які були отрима-

ні при використанні різних типів аналізу, було визначено коефіцієнт динамічності навантаження. З розгляду числових показників максимальних еквівалентних напружень, отриманих для двох аналізів (максимальні величини еквівалентних напружень, рівні $1,33 \cdot 10^3$ МПа і $1,74 \cdot 10^3$ МПа для статичного аналізу та аналізу перехідних процесів, відповідно) і з використанням формули (4), видно, що коефіцієнт динамічності дорівнює 1,3. Дана величина коефіцієнта динамічності зумовлена тим, що із розгляду власних частот і форм коливань можна зробити висновок про наступне: частота коливань, відповідна "оболонковим" коливанням, починається з 1061 Гц, це відповідає тому, що один період коливання проходить за 0,94 мс. Як було описано вище, весь процес пострілу відбувається головним чином за 2–6 мс. При дослідженні процесу прикладання навантаження по кроках, час відповідно менше. При цьому найменший часовий крок навантаження дорівнює 0,98 мс. Таким чином, різниця не перевищує 1% між інтервалом прикладеного навантаження і тривалістю одного періоду коливання досліджуваної системи.

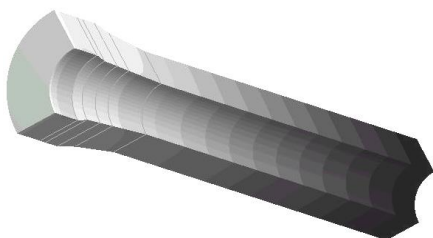


Рис. 13 – Повні переміщення в стволі (static analysis)

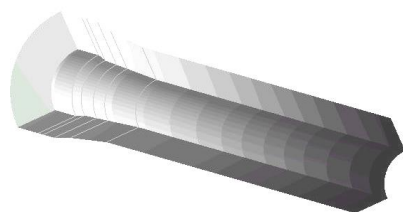


Рис. 14 – Повні переміщення в стволі (transient analysis)

При розгляді отриманих максимальних повних переміщень для різних типів аналізу спостерігається наступне: криві зміни максимальних повних переміщень в часі мають характерний вигляд зі зміщенням максимуму на середину третьої чверті процесу для статичного аналізу. При цьому в другій половині часового інтервалу самого процесу пострілу величини максимальних повних переміщень, отримані при аналізі перехідних процесів, істотно перевищують величини, отримані при статичному аналізі, і максимум зміщується до початку четвертої чверті процесу.

Що стосується максимальних значень еквівалентних напружень, то дані величини спостерігаються в середині першої половини процесу пострілу.

Висновки

У результаті проведення даного дослідження була зроблена методика аналізу напружено-деформованого стану гарматного ствола на прикладі танкової гармати типу КБА-3 при пострілі БОПС типу ЗВБМ17 "Манго". Ця методика дослідження, використовуючи криві, які описують

зміну тисків порохових газів уздовж ствола і швидкості руху снаряда уздовж каналу ствола, дозволяє визначити характеристики навантаження (величину внутрішнього тиску і швидкість руху ділянки цього тиску на певній ділянці каналу ствола для відповідного кроку навантаження). З огляду на те, що гарматні сталі володіють високою межею плинності, то, природно, при аналізі напружено-деформованого стану та оцінці міцності ствола потрібно враховувати пружно-пластичне деформування матеріалу, а також можливість проведення операцій типу автофретування, зміцнення, напilenня тощо.

Надалі планується застосувати запропоновані моделі до більш докладного дослідження напружено-деформованого стану танкових гармат при здійсненні пострілу.

Список літератури

1. Ткачук М.А. Залежність динамічних характеристик бронекорпусів від варійованих параметрів / Ткачук М.А., Грабовський А.В., Набоков А.В., Мазур І.В., Рикунів О.М. // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ. Збірник тез доповідей Міжн. наук.-техн. конф. (Львів, травень 2015 р.). – Львів: АСВ, 2015. – С. 57–58.
2. Толстолуцкий В.А. Математическое моделирование и анализ процессов в шасси колесных и гусеничных машин / В.А. Толстолуцкий; под ред. Д.О. Волонцевича. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. – 171 с.
3. Александров Е.Е. Математическое моделирование процессов возмущенного движения агрегатов и систем бронетанковой техники: Учеб. пособие в 2-х т. – Т.1. / Е.Е. Александров, Д.О. Волонцевич, В.В. Душенко, В.В. Елифанов, Н.В. Кохановский. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2012. – 356 с.
4. Гриценко Г.Д. Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем / Гриценко Г.Д., Малакей А.М., Миргородский Ю. Я., Ткачук Н.А., Ткачук А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Механика и машиностроение. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – № 1. – С. 6-13.
5. Ткачук Н.А. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения / Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Механика и машиностроение. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – № 1. – С. 184-194.
6. Ткачук Н.А. Влияние массово-инерционных характеристик боевого модуля, бронекорпуса и подвески на динамические процессы при осуществлении стрельбы / Ткачук Н.А., Рикунів О.Н., Танченко А.Ю. [и др.] // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ "ХПИ", 2014. – № 1. – С. 83-91.
7. Горохов М.С. Внутренняя баллистика ствольных систем / Горохов М.С. – М.: ЦНИИ информации, 1985. – 160 с.
8. <http://morozovkmdb.com/>.
9. Solidworks – <http://www.solidworks.com/>.
10. ANSYS Workbench – <http://www.ansys.com/>.

Bibliography (transliterated)

1. Tkachuk M.A. Zalezhnist' dynamichnykh kharakterystyk bronekorpusiv vid varyiovanykh parametrov / Tkachuk M.A., Hrabovs'kyu A.V., Nabokov A.V., Mazur I.V., Rykunov O.M. // Perspektivy rozvytku ozbroynyia ta viys'kovoyi tekhniki Sukhoputnykh viys'k. Zbirnyk tez dopovidey Mizhn. nauk.-tekhn. konf. (L'viv, traven' 2015 r.). – L'viv: ASV, 2015. – P. 57–58.

2. **Tolstolitskiy V.A.** Matematicheskoe modelirovaniye y analiz protsessov v shassy kolesnykh y husenychnykh mashyn / **V.A. Tolstolitskiy**; pod red. **D.O. Volontsevycha**. – Kharkov: NTU "KhPI", 2013. – 171 p.

5. **Tkachuk N.A.** Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnykh mekhanicheskikh sistem: tehnologiya avtomatizirovannoy generacii i parametrizovannogo opisaniya / **N.A. Tkachuk, G.D. Gricenko, A.D. Chepurnoj, E.A. Orlov, N.N. Tkachuk** // *Mekhanika ta mashinobuduvannya* – Harkiv: N3. Aleksandrov E.E. Matematicheskoe modelirovaniye processov vozmushhennogo dvizheniya agregatov i sistem bronetankovoy tehniki: Ucheb. posobie v 2-h t. – T.1. / E.E. Aleksandrov, D.O. Voloncevich, V.V. Dushhenko, V.V. Epifanov, N.V. Kohanovskij. – Kharkov: NTU "KhPI", 2012. – 356 p.

4. **Gricenko G.D.** Integrirovaniye metody issledovaniya prochnostnykh, zhestkostnykh i dinamicheskikh kharakteristik jelementov slozhnykh mekhanicheskikh sistem / **Gricenko G.D., Malakej A.M., Mirgorodskij Ju. Ja., Tkachuk N.A., Tkachuk A.V.** // *Vestnik NTU "KhPI". Seriya: Mekhanika i mashinostroeniye*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2002. – No 1. – P. 6-13.

5. **Tkachuk N.A.** Struktura specializirovannykh integrirovannykh sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza jelementov transportnykh

sredstv special'nogo naznacheniya / **Tkachuk N.A., Brul' S.T., Malakej A.N., Gricenko G.D., Orlov E.A.** // *Vestnik NTU "KhPI". Seriya: Mekhanika i mashinostroeniye*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2005. – No 1. – P. 184-194.

6. **Tkachuk N.A.** Vliyanie massovo-inercionnykh kharakteristik boevogo modulja, bronekorpusa i podveski na dinamicheskie processy pri osushhestvlenii strel'by / **Tkachuk N.A., Rikunov O.N., Tanchenko A.Ju.** [i dr.] // *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2014. – № 1. – P. 83-91.

7. **Gorohov M.S.** Vnutrennjaja ballistika stvol'nykh sistem / **Gorohov M.S.** – Moscow: CNII informacii, 1985. – 160 p.

8. <http://morozovkmdb.com/>.

9. Solidworks – <http://www.solidworks.com/>.

10. ANSYS Workbench – <http://www.ansys.com/>.

Поступила (received) 10.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Динамічні процеси в елементах військових колісних та гусеничних машин при бойовому застосуванні / **О.В. Веретельник, О.В. Мартиненко, Ю.В. Костенко, Ю.В. Веретельник, А.В. Набоков, І.В. Мазур** // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР*. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – № 39 (1211). – С. 45-49. – Бібліогр. 10 назв. ISSN 2079-0775.

Динамические процессы в элементах военных колесных и гусеничных машин при боевом применении / **О.В. Веретельник, А.В. Мартиненко, Ю.В. Костенко, Веретельник Ю.В., А.В. Набоков, И.В. Мазур** // *Вестник НТУ "ХПІ". Серія: Машиноведение и САПР*. – Харьков: НТУ "ХПІ", 2016. – № 31(1140). – С. 45-49. – Библиогр. 10 назв. –ISSN 2079-0775.

Dynamic processes in the elements of the military wheeled and tracked vehicles during combat employment / **O. Veretel'nik, O. Martinenko, Ju. Kostenko, Yu. Veretelnyk, A. Nabokov, I. Mazur** // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD*. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 39 (1211). – P. 45–49.–ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів / About the Authors

Веретельник Олег Вікторович – НТУ "ХПІ", молодший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин", Харків; тел.: (057) 707-69-01;

Veretelnyk Oleg – NTU "KhPI", junior researcher the department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", Kharkiv, phone: +38 (057) 707-69-01;

Мартиненко Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, НТУ "ХПІ", науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01; e-mail: MartynenkoAV@tmm-sapr.org.

Martynenko Oleksandr – Ph.D., NTU "KhPI", senior researcher at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, tel.: (057) 707-69-01; Kharkiv, e-mail: MartynenkoAV@tmm-sapr.org.

Костенко Юрій Вікторович – кандидат технічних наук, НТУ "ХПІ", молодший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин", Харків; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: kostenko.yuriy@gmail.com

Kostenko Yuriy – candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NTU "KhPI", junior researcher the department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", Kharkiv, phone: +38 (057) 707-69-01; e-mail: kostenko.yuriy@gmail.com

Веретельник Юрій Вікторович – *Індустріальна група "УПЕК", Харків*

Veretelnyk Yuriy – *Industrial group "UPEC", Kharkiv*

Набоков Анатолій Володимирович – НТУ "ХПІ", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", Харків; тел.: (057) 707-69-01;

Nabokov Anatoly – NTU "KhPI", graduate student of "Theory and computer aided design mechanisms and machines", Kharkiv, phone: +38 (057) 707-69-01

Мазур Ігор Віталійович – НТУ "ХПІ", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; ДП "Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова", інженер – конструктор, Харків

Mazur Igor – NTU "KhPI", graduate student of "Theory and computer aided design mechanisms and machines"; State Enterprise "Kharkiv Machine Building Design Bureau named after AA Morozov", engineer – designer, Kharkiv

