

УДК 539.3: 004.94

М.А. ТКАЧУК, О.І. ШЕЙКО, А.В. НАБОКОВ, А.В. ГРАБОВСЬКИЙ, О.В. ЛИТВИНЕНКО

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРАКТИКА ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

З метою вирішення проблеми проектно-технологічного забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин розроблені теоретичні основи комп'ютерного моделювання процесів та станів найбільш навантажених і відповідальних конструкцій цих машин. При цьому враховуються різні важливі чинники, які раніше не враховувалися. Зокрема, це проектно-технологічні параметри бронекорпусів: вони впливають на міцність, жорсткість захищеність та динамічні властивості цих бронекорпусів. Шляхом цілеспрямованого варіювання параметрів досягається потрібний рівень тих чи інших тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин. Наведені ілюстрації досліджень.

Ключові слова: легкоброньована бойова машина, комп'ютерне моделювання, напружено-деформований стан, ударна хвиля, бронепробиття, бронезахищеність

In order to solve the problem of design and technological support of tactical and technical characteristics of the combat armor-Rowan machines developed the theoretical basis of computer modeling of processes and conditions the most loaded and critical structures of these machines. This takes into account a variety of important factors that were not considered previously. In particular, this design hulls process parameters that affect the strength, rigidity and security dinical properties of these hulls. Through targeted variation of parameters achieved the necessary level of certain performance characteristics of armored combat vehicles. These studies illustrate.

Keywords: lightly armored fighting vehicle, computer modeling, stress-strain state, the shock wave, armor, body armor

С целью решения проблемы проектно-технологического обеспечения тактико-технических характеристик боевых бронированных машин разработаны теоретические основы компьютерного моделирования процессов и состояний наиболее нагруженных и ответственных конструкций этих машин. При этом учитываются различные важные факторы, которые ранее не рассматривались. В частности, это проектно-технологические параметры бронекорпусов, которые влияют на прочность, жесткость защищенность и динамические свойства этих бронекорпусов. Путем целенаправленного варьирования параметров достигается необходимый уровень тех или иных тактико-технических характеристик боевых бронированных машин. Приведенные иллюстрации исследований.

Ключевые слова: легкобронированная боевая машина, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, ударная волна, бронепробиваемость, бронезащита

Вступ

У роботі [1] було поставлено актуальну і важливу для бронетанкобудування України проблему. Вона полягає у розробці теоретичних основ та комп'ютерних засобів проектно-технологічного забезпечення тактико-технічних характеристик (ТТХ) легкоброньованих бойових машин (ЛБМ).

Дійсно, ця проблема є значущою у будь-який час. Проте, з урахуванням військово-політичних умов, що склалися в Україні у зв'язку із проведенням бойових дій у східних областях, ця проблема набуває надзвичайної гостроти. Отже, загальний підхід, що представлений у роботі [1], набуває особливої ваги, адже він слугує методологічною основою побудови нових методів, моделей, засобів забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин шляхом обґрунтування відповідних проектно-технологічних рішень на основі комп'ютерного моделювання процесів та станів найбільш навантажених і відповідальних елементів конструкцій легкоброньованих бойових машин (ЛБМ).

Аналіз стану проблеми

Як зазначається у роботах [2–4], для забезпечення ТТХ сучасних бойових броньованих машин можуть бути застосовані найрізноманітніші засоби. Проте, як підкреслено в роботі [1], сама ця проблема є комплексною, а, отже, й інструменти її вирішення повинні носити комплексний характер. Відповідно, у роботі [1]

запропоновано застосовувати метод узагальненого параметричного моделювання процесів та станів у складних механічних системах [5], який був розвинений та адаптований для розв'язання задач синтезу проектно-технологічних параметрів бойових броньованих машин задля досягнення заданих ТТХ.

Певні аспекти запропонованого підходу викладені у роботах [4–7]. Разом із тим потребують своєї реалізації ті методи та моделі, що були описані у загальному вигляді. Також вони вимагають ілюстрації щодо потенційних можливостей застосування до розв'язання окремих частинних задач. Отже, постала актуальна і важлива науково-технічна проблема, що потребує свого вирішення та яка стала змістом цієї роботи.

Мета роботи – реалізація наукових основ проектно-технологічного забезпечення захищеності і міцності легкоброньованих бойових машин на основі результатів математичного та комп'ютерного моделювання фізико-механічних процесів і станів бронекорпусів при дії засобів ураження із урахуванням технологічних чинників і обґрунтування на їх основі раціональних проектно-технологічних

© Ткачук М.А., Шейко О.І., Набоков А.В.,
Грабовський А.В., Литвиненко О.В., 2016

рішень.

Методи та моделі

Для ілюстрації можливостей підходу, запропонованого в роботі [1] та описаного в [7], досліджені декілька фізико-механічних процесів та станів в бронекорпусах легкоброньованих машин, що впливають на ТТХ цих машин. У роботі описане розв'язання серії задач, що у сукупності спрямовані на забезпечення підвищення ТТХ легкоброньованих машин на основі моделювання різних фізико-механічних процесів і станів у бронекорпусах при їх бойовому застосуванні та обґрунтування відповідних проектно-технологічних параметрів бронекорпусів.

Зокрема, при побудові математичної моделі пружно-пластичного деформування бронекорпусів при проходженні ударної хвилі сформульовані нові рівні та критерії захищеності при дії ударної хвилі на бронекорпуси бойових броньованих машин. На додаток до традиційних критеріїв типу недопущення пластичних деформацій (тобто неперевищення еквівалентними напруженнями $\sigma_{\text{екв}}$ межі текучості σ_T) $\sigma_{\text{екв}} \leq \sigma_T$, або збереження герметичності (тобто неперевищення деформаціями допустимого рівня δ) $\varepsilon \leq \delta$, висувається вимога збереження цілісності бронекорпуса (тобто неперевищення $\sigma_{\text{екв}}$ межі міцності σ_B) – новий критерій, більш адекватний: $\sigma_{\text{екв}} \leq \sigma_B$.

У роботі, на відміну від традиційних підходів, враховані різні властивості й поведінка матеріалу бронепанелі і внутрішньої силової структури. Також вперше врахована залежність межі міцності і пластичності від швидкості деформування (рис. 1).

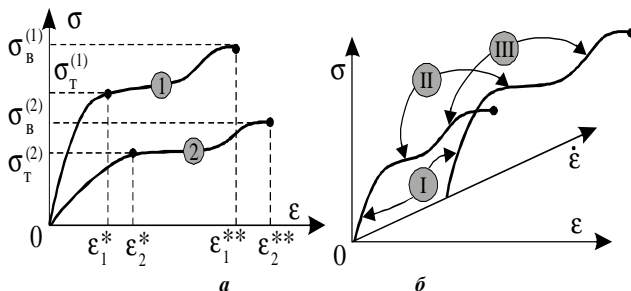


Рис. 1 – Залежність межі міцності і пластичності від швидкості деформування:

- а – діаграма « $\sigma - \varepsilon$ » для матеріалів бронепанелі 1 та внутрішнього силового каркасу 2 бронекорпусів;
б – діаграма характеру залежностей « $\sigma - \varepsilon - \dot{\varepsilon}$ » при швидкісному деформування матеріалів бронекорпусів

Використані закони пластичної течії інкрементального типу і геометрично нелінійні співвідношення для деформацій. Для опису процесу обтікання бронекорпусів ударною хвилею застосовуються рівняння Нав'є-Стокса. Математична модель процесу бронепробиття будується на основі рівнянь механіки суцільного середовища: збереження маси, енергії та кількості руху. Поряд із цим застосовуються емпіричні формули для оцінки інтегральних характеристик бронепробиття.

При дослідженні динамічного напружено-деформованого стану бронекорпусів при дії зусиль віддачі записується система лінійних рівнянь механіки суцільного середовища, а також початкові і крайові умови. Для статичного НДС тонкостінної конструкції встановлюється можливість лінеаризації його компонент при варіюванні проектно-технологічних параметрів. Ця закономірність поширена і на динамічний напружено-деформований стан.

У роботі для представлення функції відгуку запропоновано використовувати кусково-лінійну апроксимацію у кожному квадранті. Для цього використовується методологія "реперних" розв'язків. На відміну від відомих підходів, запропонована нова методологія уточнення скінченно-різницевої апроксимації на основі скінченних різниць – за "реперними" розв'язками.

Таким чином, на відміну від технологій "чорної" та "білої (прозорої) скриньки", розроблена нова технологія "сірої скриньки". При цьому ступінь "прозорості" цієї "скриньки" збільшується шляхом поєднання двох процедур:

- 1) за рахунок зменшення кроку дискретизації області параметричного простору;
- 2) в результаті локалізації зони розміщення поточного наближення розв'язку.

У цьому – принципова відмінність даного методу. Він пропонує поєднання точності та оперативності розв'язання задач синтезу. Крім того, він зводить задачу синтезу до стандартної задачі лінійного програмування. Розроблений підхід застосовний для широкого кола задач: і бронезахищеності, і міцності, і відлаштування від резонансів.

При розв'язанні цієї задачі основний наголос робиться на впровадженні методу узагальненого параметричного моделювання та реалізації математичних моделей у вигляді спеціалізованих програмно-моделних комплексів (СПМК). Основна ідея – поєднання переваг потужності універсальних програмних пакетів і націленість на об'єкт досліджень за рахунок спеціалізованих модулів. Основою СПМК є параметризовані моделі, які дають змогу варіювати сам об'єкт досліджень, зберігаючи його цілісність із точки зору геометричної форми, властивостей матеріалів, діючих навантажень і граничних умов (рис. 2).

Створені підсистеми моделювання ударно-хвильової дії на бронекорпус, дії на нього кінематичних боеприпасів, динамічних зусиль, а також чутливості динамічних характеристик до зміни проектно-технологічних параметрів бронекорпусів. Вони були апробовані на тестових задачах про напружено-деформований стан легкоброньованих бойових машин (рис. 3).

Розроблено також програмний код та моделі для аналізу спектру власних частот (ВЧ) коливань при варіюванні проектно-технологічних параметрів. Так, для тестової

моделі корпусу бронетранспортера БТР-3Е (див. рис. 3) отримані власні частоти та форми коливань залежно

від зміни товщини панелей легкоброньованих машин (рис. 4–6).

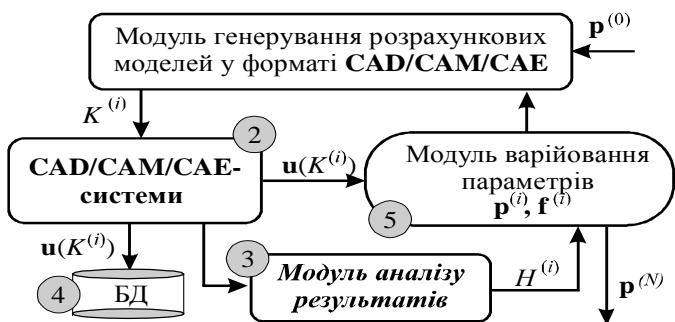


Рис. 2 – Структура спеціалізованого програмно-моделюючого комплексу для розв'язання задач аналізу та синтезу

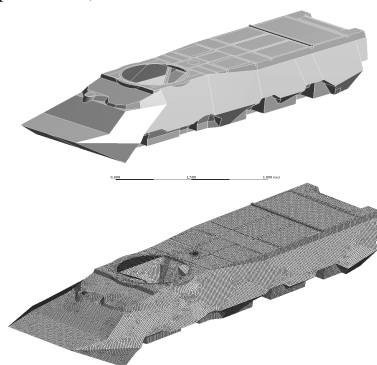


Рис. 3 – Геометрична та скінченно-елементна моделі бронекорпусів БТР-3Е

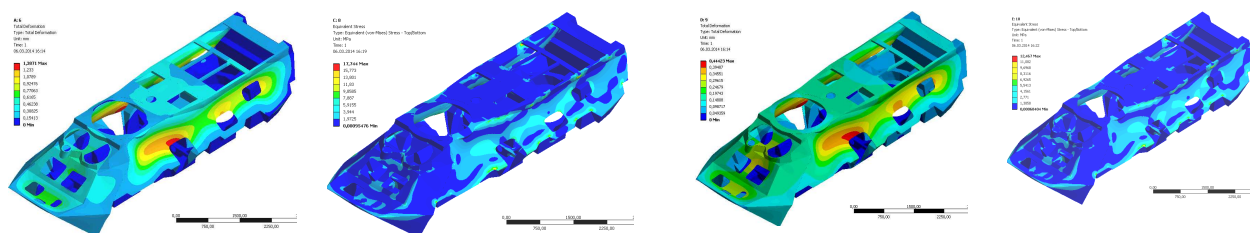


Рис. 4 – Характерні картини розподілу компонентів НДС при варіюванні товщини бронепанелей корпусу БТР-3Е: а – 6 мм, б – 8 мм, в – 9 мм, г – 10 мм

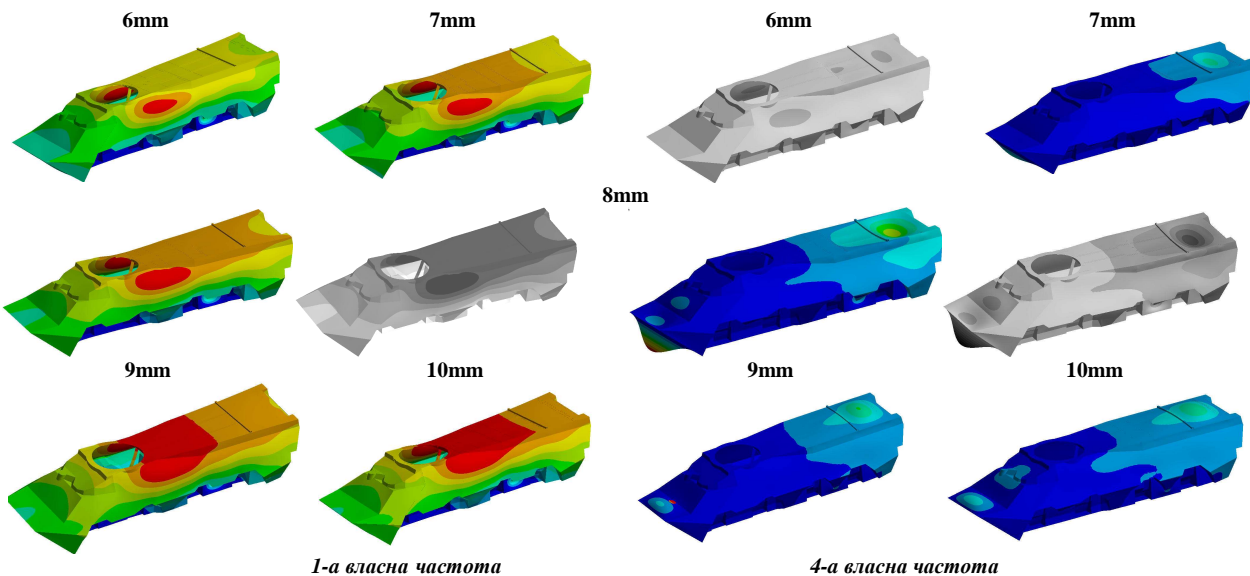


Рис. 5 – Деякі власні форми коливань для номінального (8 мм) розподілу товщини і при варіюванні товщини

Висновки

У роботі отримала рішення актуальна науково-практична проблема розробки теоретичних основ проектно-технологічного забезпечення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин шляхом обґрунтування технічних рішень бронекорпусів за критеріями захищеності, міцності, жорсткості, віброзбудливості від дії комплексу уражаючих чинників, що має велике значення для бронетанкобудування України.

Отримані наступні наукові результати:

1. На основі розвитку методу узагальненого параметричного моделювання та поширення його на проектно-технологічні рішення розроблений новий підхід до забезпечення заданих тактико-технічних характеристик легкоброньованих бойових машин, який полягає в їх забезпеченні як результату взаємодії та взаємовпливу конструктивних рішень, технологічних режимів і умов виробництва. При цьому вперше множина технологічних чинників залучена як така, що певною мірою визначає рівень ТТХ і як варійована, шукана.

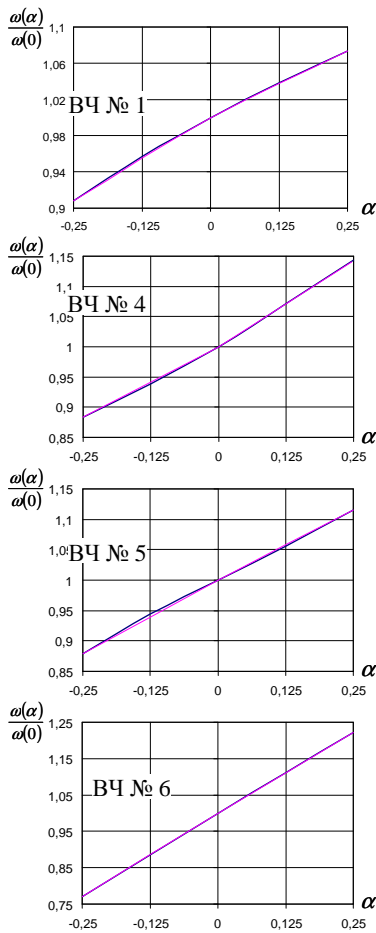


Рис. 6 – Власні частоти коливань бронекорпуса, віднесені до значень ВЧ з базовим значенням товщини панелей (8 мм), в залежності від ступеня стонцювання / потовщення цих панелей

2. Запропонований новий підхід інтегрований у комплекс математичних моделей, які, на відміну від відомих спрощених, є нелінійними та більш адекватними, і в них імплементовано усі варійовані, у тому числі технологічні, параметри. Також у цих моделях відображені не тільки фізичні, геометричні, структурні нелінійності, але і параметричні, що відрізняє їх від відомих. При цьому новими якостями створених моделей є те, що складові ТТХ можуть визначатися у ході аналізу фізико-механічних процесів і станів як їхній прямий результат. Важливою відмінною особливістю даних моделей є врахування раніше невраховуваних фізичних чинників, зокрема: залежність напружень не тільки від деформацій, а й від швидкості деформування; наявність декількох ділянок на кривій "напруження-деформації", а, відповідно, і формування критеріїв захищеності за різними умовами і рівнями; вплив технологічно зумовлених неоднорідностей за товщиною бронепанелей та в їх плані, що викликається термохімічними впливами при прокатці, гарячому штампуванні і при зварюванні бронелистів, на їхні захисні властивості; вплив проектно-технологічних параметрів на динамічний напружено-деформований стан і віброзбудливість бронекорпусів; розширено множину чинників, що враховуються при моделюванні

уражаючих впливів.

3. Комплекс математичних моделей на основі нового підходу реалізований у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу, який, на відміну від відомих, побудований на поєднанні переваг універсальних програмних продуктів і спеціалізованих модулів, які враховують особливості того чи іншого конкретного об'єкта досліджень і переводять їх у предметну область. На цій основі створені моделі газодинамічного обтікання бронекорпусів машин типу МТ-ЛБ, БТР-80, БТР-3Е та інших, а також їх пружно-пластичного деформування і руйнування під дією ударної хвилі та кінетичних боєприпасів, моделі динамічного напружено-деформованого стану та віброзбудливості бронекорпусів при дії зусиль віддачі та інших чинників. Створений СПМК дає змогу інтегрувати його у системи автоматизованого проектування, технологічної підготовки виробництва та досліджень, експлуатованих в КБ, НДІ, університетах, на підприємствах, причому у режимі їх штатного функціонування.

4. Проведений та описаний у роботі комплекс числових досліджень реакції бронекорпусів ЛБМ на дію засобів ураження дав можливість установити закономірності їх впливу на захищеність та розробити рекомендації щодо обґрунтування проектно-технологічних параметрів.

Надалі запропоновані підходи будуть застосовані для обґрунтування параметрів перспективних легкоброньованих бойових машин.

Список літератури

1. **Ткачук М.А.** Науковий супровід проектно-технологічних розробок задля забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин / **М.А. Ткачук, О.В. Литвиненко, А.В. Грабовський** // Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід (Київ, 22-23 вересня 2015). – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр", 2015. – С. 61–65.
2. **Чепков І.Б.** Модель обоснования технических решений защитных устройств боевых бронированных машин / **И.Б. Чепков** // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2011. – № 4. – С. 42-46.
3. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения: монография: [в 4 т.]. Т. 4. Методология исследования сложных систем военного назначения / **С.В. Лапицкий, А.В. Кучинский, А.И. Сбитнев [и др.]**; ред.: С.В. Лапицкий. – К.: 2013. – 477 с.
4. **Чепков І.Б.** Основні напрями розвитку озброєння і військової техніки. Організаційні і економічні механізми державної підтримки оборонної промисловості / **І.Б. Чепков** // Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід (Київ, вересень 2015). – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр", 2015. – С. 8–13.
5. **Ткачук Н.А.** Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / **Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной, Е.А. Орлов, Н.Н. Ткачук** // Механіка та машинобудування – Харків: НТУ "ХПИ". – 2006. – №1. – С. 57-79.
6. **Танченко А.Ю.** Метод прямого конечного возмущения конечно-элементных моделей при численном исследовании

динамических, жестких и прочностных характеристик тонкостенных элементов машин строительных конструкций / **А.Ю.Танченко, А.В. Литвиненко, А.Д. Чепурной, Ю.В. Костенко, Н.А. Ткачук** // Вестник Брянского государственного технического университета. – Брянск: БГТУ, 2014. – № 4(44). – С.114-124.

7. **Ткачук Н.А.** Теоретичні основи та практика проектно-технологічного забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин / **М.А. Ткачук, О.І. Шейко, А.В. Набоков, А.В. Грабовський, О. В. Литвиненко** // Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід (Київ, вересень 2016 р.). – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр", 2016.

Bibliography (transliterated)

1. **Tkachuk M.A.** Naukovyy suprovid proektno-tehnolohichnykh rozrobok zadlya zabezpechennya taktyko-tehnichnykh kharakterystyk boyovykh bron'ovanykh mashyn / **M.A. Tkachuk, O.V. Lytvynenko, A.V. Hrabovskyy** // Perspektivy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya obronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikativnyy zakhid (Kyiv, 22-23 veresnya 2015). – Kyiv: TOV "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015. – P. 61–65.

2. **Chepkov I.B.** Model' obosnovaniya tehnicheskikh reshenij zashhitykh ustrojstv boevykh bronirovannykh mashin / **I.B. Chepkov** // Artiller. i strelkovoje vooruzhenie. – 2011. – No 4. – P. 42-46.

3. Osnovy voenno-tehnicheskikh issledovanij. Teorija i prilozhenija: monografija: [v 4 t.]. T. 4. Metodologija issledovanija slozhnykh sistem voennogo naznachenija / **S.V. Lapickij, A.V. Kuchinskij, A.I. Sbitnev** [i dr.]; red.: **S.V. Lapickij**. – Kiev: 2013. – 477 p.

4. **Chepkov I.B.** Osnovni napryamy rozvytku ozbrojenyja i viys'kovoyi tekhniki. Orhanizatsiyni i ekonomichni mekhanizmy

derzhavnoyi pidtrymky obronnoyi promyslovosti / **I.B. Chepkov** // Perspektivy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya obronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikativnyy zakhid (Kyiv, veresen' 2015). – Kyiv: TOV "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015. – P. 8–13.

5. **Tkachuk N.A.** Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnykh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija / **N.A. Tkachuk, G.D. Gricenko, A.D. Chepurnoj, E.A. Orlov, N.N. Tkachuk** // Mehanika ta mashinobuduvannja – Kharkiv: NTU "KhPI", 2006. – No 1. – P. 57-79.

6. **Tanchenko A.Ju.** Metod prjamoego konechnogo vozmushhenija konechno-jelementnykh modelej pri chislennom issledovanii dinamicheskikh, zhestkostnykh i prochnostnykh kharakteristik tonkostennykh jelementov mashin stroitel'nykh konstrukcij / **A.Ju. Tanchenko, A.V. Litvinenko, A.D. Chepurnoj, Ju.V. Kostenko, N.A. Tkachuk** // Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. – Brjansk: BGTU, 2014. – № 4(44). – P.114-124.

7. **Tkachuk N.A.** Teoretychni osnovy ta praktyka proektno-tehnolohichnoho zabezpechennya taktyko-tehnichnykh kharakterystyk boyovykh bron'ovanykh mashyn / **M.A. Tkachuk, O.I. Sheyko, A.V. Nabokov, A.V. Hrabovskyy, O. V. Lytvynenko** // Perspektivy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya obronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikativnyy zakhid (Kyiv, veresen' 2016 r.). – Kyiv: TOV "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2016.

Поступила (received) 10.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Теоретичні основи та практика проектно-технологічного забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин на основі комп'ютерного моделювання / **М.А. Ткачук, О.І. Шейко, А.В. Набоков, А.В. Грабовський, О.В. Литвиненко** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – № 39 (1211). – С. 102–106.– Бібліогр. 7 назв. – ISSN 2079-0775.

Theoretical grounds and practice of engineering and technological support of tactical and technical characteristics of armored fighting vehicles based on computer modeling / **M.A. Tkachuk, O. Sheyko, A. Nabokov, A. Grabovskiy, O. Litvinenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No 39 (1211). – P. 102–106. –ISSN 2079-0775.

Теоретические основы и практика проектно-технологического обеспечения тактико-технических характеристик боевых бронированных машин на основе компьютерного моделирования / **Н.А. Ткачук, А.И. Шейко, А.В. Набоков, А.В. Грабовский, А.В. Литвиненко** // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2016. – № 39 (1211). – С. 102–103. – Библиогр. 7 назв. – ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, НТУ "ХПІ", завідувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Ткачук Микола – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chief of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Шейко Олександр Іванович – головний інженер. ДП "Завод ім. В.О. Малишева", тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Шейко Олександр – chief engineer at the SE "Zavod im. V. O. Malisheva", tel.: (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Набоков Анатолій Володимирович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Nabokov Anatoliy – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Грабовський Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ "ХПІ", старший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; тел.: (057)7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Grabovskiy Andrey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NTU "KhPI", Senior Researcher of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: (057)7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Литвиненко Олександр Віталійович – доктор технічних наук, директор ООО Научно-инженерный центр УК "Рэйл-ТрансХолдинг", Мариуполь, Украина.

Litvinenko Olexsandr – Doctor of Technical Sciences, Director at the JSC "Science Engineering Center UK" RailTransHolding", Mariupol, Ukraine