

*А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, М. М. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. А. ТКАЧУК, О. Ю. ШУТЬ, Р. Г. НЕЧАЄВ,  
О. І. ЗІНЧЕНКО, В. С. ВЕЙЛЕР, О. С. ЛЬОЗНИЙ*

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ БОЙОВИХ МАШИН НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Забезпечення світового рівня тактико-технічних характеристик об'єктів броньованої техніки є надзвичайно важливою та актуальною проблемою у сфері національної безпеки та оборони. Це зумовлено колосальним потенціалом бронетанкобудування України, який не знайшов дотепер відповідної реалізації при проєктуванні та освоєнні виробництва цих машин внаслідок різних причин. Однією з основних проблем є відсутність методів та моделей для обґрунтування параметрів цих машин та властивостей матеріалів для виготовлення основних компонентів, у першу чергу – бронекорпусів і трансмісій на етапі проєктних досліджень. У цій роботі передбачається розвиток теоретичних основ та здійснення досліджень для визначення реакції елементів об'єктів броньованої техніки на дію різноманітних чинників та визначення вимог до проєктних рішень їх елементів. Вкрай важливим чинником є, наприклад, недопущення критичних деформацій, які виникають у об'єктів броньованої техніки при дії засобів ураження. Існуючі моделі не дають змоги адекватно оцінити ступінь захищеності при дії різних чинників, що призводить до принципово невірних проєктних рішень. Отже, виникає нова, актуальна та важлива науково-технічна проблема – дослідження виникаючих при бойовому застосуванні процесів та станів об'єктів броньованої техніки задля підвищення їх тактико-технічних характеристик. Теоретичні основи таких досліджень описані у цій роботі. Їх значущість особливо зростає в умовах теперішнього часу за наявності бойових дій, які потребують виготовлення та постачання військової техніки із високими тактико-технічними характеристиками. Своєю чергою, досягнення світового рівня цих характеристик неможливе без здійснення у першочерговому порядку низки досліджень, зокрема, на базі описаного в роботі підходу. Дослідження на цій основі якраз спрямовані на наукове обґрунтування прогресивних технічних рішень об'єктів військової техніки.

**Ключові слова:** бойова машина; об'єкт бронетанкової техніки; тактико-технічна характеристика; метод скінченних елементів; бронекорпус; трансмісія

*A. VASYLIEV, M. M. TKACHUK, A. GRABOVSKIY, M. A. TKACHUK, O. SHUT, R. NECHAEV,  
O. ZINCHENKO, V. VEILER, O. LOZNYI*

## THEORETICAL FOUNDATIONS FOR SUBSTANTIATING OF DESIGN SOLUTIONS FOR COMBAT VEHICLE ELEMENTS BASED ON THE ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROCESSES

Ensuring the world-class tactical and technical characteristics of armored vehicles is an extremely important and urgent problem in the field of national security and defense. This is due to the enormous potential of Ukraine's armored vehicle industry, which has not yet been realized in the design and development of the production of these vehicles for various reasons. One of the main problems is the lack of methods and models to substantiate the parameters of these vehicles and the properties of materials for the manufacture of the main components, primarily armor hulls and transmissions, at the stage of design research. This work involves developing the theoretical foundations and conducting research to determine the response of armored vehicle components to various factors and to determine the requirements for design solutions for their components. An extremely important factor is, for example, the prevention of critical deformations that occur in armored vehicles when exposed to munitions. Existing models do not allow for an adequate assessment of the degree of protection under the influence of various factors, which leads to fundamentally incorrect design decisions. Consequently, a new, relevant, and important scientific and technical problem arises - the study of processes and states of armored vehicles in combat use to improve their tactical and technical characteristics. The theoretical foundations of such research are described in this paper. Their significance is especially growing in the current situation in the presence of hostilities that require the manufacture and supply of military equipment with high tactical and technical characteristics. In turn, achieving the world level of these characteristics is impossible without a number of studies, in particular, based on the approach described in this paper, as a matter of priority. Research on this basis is aimed at scientific substantiation of advanced technical solutions for military equipment.

**Keywords:** combat vehicle; armoured vehicle object; tactical and technical characteristics; finite element method; armoured hull; transmission

**Вступ.** Зважаючи на те, що масштабні виклики у науковій та технічній сферах виникають, значною мірою завдяки соціально-економічним та політико-безпековим обставинам, які складаються у той чи інший історичний період, натеper суттєво зростає потреба у науковому супроводі розробок нової військової техніки та озброєння [1]. Відповідно, породжується низка системних проблем, які при цьому об'єктивно створюються. Зокрема, серед них формується ціла серія потреб у новітніх розробках та дослідженнях, без яких неможливо здійснити проривні проєкти у галузі озброєння та військової техніки. Серед них варто виокремити найбільш нагальні. Так, особливу увагу привертає одна із наявних тематик. Суть нової, актуальної та важливої науково-технічної проблеми у сфері національної безпеки та оборони України, запропонованої до вирішення – дослідження фізико-механічних процесів та станів елементів об'єктів броньованої техніки (ОБТ) у процесі їх бойового застосування з метою обґрунтування параметрів та забезпечення заданих тактико-технічних характеристик (ТТХ) захищеності, вогневої потужності та рухливості. Це потребує узагальнення, розвитку та адаптації математичних, фізичних та чисельних моделей процесів

і станів у бронекорпусах, трансмісіях та озброєнні ОБТ на основі єдиного узагальненого параметричного опису при дії навантаження в умовах бойового використання. При цьому розв'язується задача різкого підвищення точності, адекватності та оперативності моделювання досліджуваних процесів із метою розробки рекомендацій щодо забезпечення підвищених ТТХ об'єктів броньованої техніки. Відповідно, для цього розвиваються методи математичного та чисельного моделювання як єдиної системи із метою створення спеціалізованого математичного і програмно-модельного комплексу для вирішення сформульованої проблеми. Цей напрямок сформував тематику досліджень, описаних у цій роботі.

**Аналіз існуючих методів та засобів досліджень процесів у елементах об'єктів броньованої техніки.** Останніми роками істотно зросла кількість робіт, присвячених питанням проєктування і модернізації об'єктів бронетанкової техніки [1–7]. Це відбувається

© А.Ю. Васильєв, М.М. Ткачук, А.В. Грабовський,  
М. А. Ткачук, О.Ю. Шуть, Р. Г. Нечаєв, О.І. Зінченко,  
В.С. Вейлер, О.С. Льозний, 2024

унаслідок збільшення їх ролі у військових доктринах багатьох країн і, як результат, – істотної зміни вимог, що висуваються до їх ТТХ. Для того, щоб задовольнити сучасним тенденціям, необхідно істотно підвищити рівень їх рухомості, вогневої потужності і захищеності.

Таким чином, для визначення міри відповідності ОБТ сучасним вимогам, зокрема, до захищеності, вогневої міці та рухомості машин, вони мають розраховуватися на весь комплекс динамічних чинників.

При цьому недостатній розвиток мають методи забезпечення, наприклад, захищеності бронекорпусів від ударних хвиль. Цим питанням приділена увага в роботах багатьох дослідників [2–5], однак вони мають низку загальних недоліків. Наприклад, у традиційних методиках не повністю вирішені такі завдання як урахування рухомого характеру ударно-хвильового навантаження та урахування нерівномірного характеру газодинамічного обтікання корпусу ОБТ. Таким чином, виникає протиріччя між потребами у забезпеченні захищеності бронекорпусів від дії ударно-хвильового навантаження на етапі проектування, з одного боку, і використовуваними розрахунковими моделями, – з іншого. Це зумовило актуальність і важливість завдання, поставленого і вирішеного в роботі на основі залучення моделей фізико-механічних процесів при обтіканні корпусів ОБТ ударною хвилею. Особливої актуальності ця задача набуває при проектуванні нової військової техніки і модернізації вже існуючої [1–7]. Зокрема, затребуваним є розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) найбільш навантажених і відповідальних елементів об'єктів броньованої техніки для вибору необхідних параметрів бронекорпусів із урахуванням сумісного аналізу гідрогазодинамічних процесів, пружності та пластичності. Без вирішення цих проблем неможливе забезпечення високих ТТХ легкоброньованих машин, що визначає актуальність теми роботи у цій частині.

З точки зору забезпечення рухомості найважливішою проблемою є синтез планетарних трансмісій. У проектуванні моторно-трансмісійних установок (МТУ) основних танків третього і четвертого покоління склалося два основних підходи:

1) центральні трансмісії з комплексною гідропередачею, механічною планетарною коробкою передач із гідрокеруванням і двопоточним гідрооб'ємним механізмом повороту, що працюють разом із чотиритактним дизельним двигуном, установленим поздовжньою осі машини;

2) бортові механічні планетарні коробки передач із гідрокеруванням, що працюють разом із двотактним дизельним двигуном, установленим поперек осі машини.

Перший підхід полегшує автоматизацію трансмісії і керованість машиною, дає можливість дуже плавно нарощувати силу тяги на рушії, легко перейти від традиційних важелів керування до штурвала і реалізувати всі радіуси повороту як фіксовані. Однак він збільшує об'єм заброньованого простору і силует машини, різко збільшує масу машини. Цей підхід характерний для всіх виробників танків, крім України і Росії. Другий підхід дає можливість зробити машину з найбільш компактною МТУ і з мінімально можливою масою і габаритами. Одночасно цей підхід утруднює керованість машиною. Частково ця проблема була

вирішена на українській БМ «Оплот» шляхом установки автоматичної системи керування поворотом. Пішовши за схемою бортових трансмісій, Україна створила один з найкращих танків минулого століття. Тому дослідження НДС елементів бортових планетарних трансмісій ОБТ із урахуванням контактної взаємодії та пошкоджуваності [8–10] дає можливість тим самим підтримувати на сучасному рівні необхідні підвищені ТТХ української військової броньованої техніки, що й визначає актуальність теми роботи у цій частині.

Серед передових теоретичних розробок, які набули значного розвитку останнім часом, слід відзначити апарат теорії варіаційних нерівностей [11–16]. Він дає можливість ефективно розв'язувати задачі контактної взаємодії тіл складної форми.

Свою чергою, серед чисельних методів аналізу процесів і станів у елементах конструкцій слід відзначити метод скінченних елементів [17–20].

Відзначені методи у цілому орієнтовані переважно на аналіз процесів і станів у елементах конструкцій. Разом із тим важливим є розв'язання задач синтезу проектних рішень ОБТ із високими ТТХ. А це потребує, з одного боку, варіативності об'єктів, а, з іншого, – інтегрування параметричного моделювання у моделі процесів і станів у цих об'єктах досліджень.

Із цього напрямку у роботах [21–25] здійснено низку розробок і досліджень та розроблено на основі отриманих результатів конкретні рекомендації стосовно нових, модернізованих та перспективних зразків ОБТ. Зокрема, це стосується розробки наукових засад теорії узагальненого параметричного моделювання, яка дає можливість об'єднання у єдиній множині проектні рішення, технологічні та виробничі засоби, режими експлуатації та бойового застосування вітчизняних ОБТ, а також їх ТТХ та характеристики чинників ураження (ХЧУ). Ці розробки є дуже важливими, оскільки сучасні реалії характеризуються швидкоплинністю процесів розроблення ОБТ, нечіткими та змінюваними вимогами до їхніх ТТХ, з одного боку, та стрімко прогресуючими ХЧУ, – з іншого. Крім того, супутні економічні та організаційні чинники привносять свій внесок у структуру збурень процесу створення об'єктів броньованої техніки. Відповідно, для досягнення у цих умовах світового рівня ТТХ вітчизняних ОБТ теоретичні розробки, здійснені із цього напрямку [21–25], створили потужне підґрунтя. У свою чергу, за проблемою обґрунтування проектних рішень елементів ОБТ у [21–25] створені математичні та чисельні моделі процесів дії потоків від ударної хвилі на бронекорпуси об'єктів броньованої техніки. Відповідно, за об'єктом досліджень досліджені фізико-механічні процеси, що при цьому відбуваються. За предметом досліджень розроблені відповідні методи і моделі. Вони дали можливість обґрунтувати рекомендації стосовно проектно-технологічних рішень бронекорпусів БТР-70 та БТР-80 при їх модернізації, БТР-3Е – у ході проектування і технологічної підготовки виробництва. На теперішній час необхідне удосконалення розроблених моделей та методів, оскільки суттєвим є зв'язаність та взаємовплив процесів, що протікають, наприклад, при дії ударної хвилі на бронекорпуси ОБТ. Крім того, на порядок денний висуваються проблеми модернізації та модифікації серії бронемашин БТР-4 і розроблення

принципово нової вітчизняної бронемашини. Відповідно, теоретичні і чисельні дослідження будуть переведені у площину прикладних проблем. Аналогічна картина спостерігається і у напрямку аналізу контактної взаємодії елементів об'єктів броньованої техніки. Зокрема, проблемними є елементи трансмісії сучасних вітчизняних танків. Із цього напрямку розроблені принципово нові варіаційні формулювання задач контактної взаємодії. З одного боку, розширено множини значимих чинників, що привносяться у створювану модель, а, з іншого, розвинені нові варіанти чисельних методів скінченних та граничних елементів для здійснення досліджень, що об'єднанні єдиним параметричним моделюванням. Отже, і в аспекті фундаментальних досліджень, і перспектив подальшого прикладного застосування напрацювання [21–25] потребують продовження, доповнення, удосконалення та адаптації під нові ОБТ.

*Мета роботи* полягає у розробці теоретичних основ досліджень фізико-механічних процесів при бойовому застосуванні об'єктів броньованої техніки та забезпечення підвищених до світового рівня ТТХ захищеності та рухомості проєктованих бойових машин шляхом розв'язання задач аналізу процесів та синтезу їх параметрів на основі удосконалених теорій, моделей та методів.

**Базові підходи до вирішення задач аналізу та синтезу технічних рішень елементів об'єктів броньованої техніки.** Як свідчить аналіз стану досліджень проблематики за заявленим напрямом, натеper існує багато розробок і досліджень різних станів у складних механічних системах. Разом із тим вони володіють низкою недоліків, що не дає можливості вирішення актуальних і важливих проблем стосовно забезпечення світового рівня вітчизняних об'єктів броньованої техніки. По-перше, це стосується методологічного аспекту: існуючі моделі та методи повною мірою не враховують сумісного та взаємного впливу різних процесів і станів. По-друге, у цьому ж аспекті відсутній достатньо універсальний інструмент переходу від проблем фундаментальних досліджень до проблем предметної області озброєння та військової техніки. І, по-третє, відсутні підходи, методи і моделі, які поєднують у єдиній множині варійовані проєктні рішення елементів ОБТ, з одного боку, процеси і стани у них при бойовому застосуванні, – з іншого, і, врешті решт, – ТТХ, які обґрунтовано можуть бути досягнуті шляхом цілеспрямованого поліпшення поточних проєктних рішень. Якщо аналізувати особливості сучасного стану із урахуванням бойових дій на Сході України, то актуальність досліджень із точки зору забезпечення підвищених ТТХ об'єктів броньованої техніки є незаперечною. Якщо врахувати при цьому напрацювання [21–25], то видається за доцільне їх розвиток, оскільки це призведе не тільки до просування з точки зору здійснення фундаментальних досліджень на світовому рівні, але й створить фундамент для досягнення світового рівня ТТХ вітчизняних об'єктів броньованої техніки.

Для вирішення проблеми захищеності пропонується низка нових продуктивних ідей.

*1. Ідея параметричного моделювання процесів і станів складних механічних систем.* Складність визначення рухомого навантаження та необхідність

проведення серій багатоваріантних розрахунків із варіюванням конструктивних параметрів та характеристик ударних хвиль надзвичайно ускладнює задачу, оскільки потрібно перебудовувати моделі та здійснювати розрахунки та аналіз результатів у автоматизованому режимі. Саме це забезпечує запропонований підхід.

*2. Ідея поєднання можливостей методів скінченних та граничних елементів, методів скінченних об'ємів та узагальненого параметричного моделювання складних механічних систем.* Пропонується розширити параметричний простір, додавши до нього, крім традиційних, ще й параметри чисельних моделей. Тобто, варійованими визначаються параметри моделей та методів.

*3. Ідея вдосконалення спеціалізованого програмно-модельного комплексу для аналізу і синтезу броньованих корпусів і трансмісії об'єктів броньованої техніки.* Природним розвитком процесу досліджень є застосування спеціалізованих інтегрованих систем автоматизованого проєктування, параметричних моделей і створення спеціалізованих баз даних і знань у цій області.

Основна гіпотеза розробок у цій частині – про суттєво нерівномірний розподіл сил у ударній хвилі у процесі обтікання броньованих корпусів та при контактній взаємодії елементів трансмісії ОБТ, а також необхідності застосування для їх визначення чисельних методів моделювання. Методи досліджень, використані для досягнення поставленої мети:

- дослідження НДС броньованих корпусів ОБТ здійснюється на основі методів просторової задачі теорії пружності у поєднанні із запропонованою авторами технологією дослідження конструкції як єдиної складної механічної системи;

- чисельні методи: скінченних елементів, граничних елементів, скінченних об'ємів та скінченних різниць – основа створюваного спеціалізованого програмно-модельного комплексу; теорія, методи, алгоритми і комп'ютерні системи використовуються для побудови параметризованих просторових моделей броньованих корпусів.

Усі ці методи базуються на залученні та розвитку нового методу узагальненого параметричного моделювання складних систем, що запропонований раніше [21–25]. Основою верифікації розроблених теоретичних моделей буде порівняння з великим обсягом експериментальних даних, отриманих раніше. Для вирішення проблеми рухомості пропонується ідея комплексного урахування впливу різних чинників на контактну взаємодію елементів трансмісії об'єктів броньованої техніки. Це дає можливість більш адекватно відтворювати НДС контактуючих елементів ОБТ, а, відтак, – достовірно обґрунтувати їх прогресивні рішення на світовому рівні.

Базовим підходом при здійсненні досліджень є поєднання у множині досліджуваних чинників, по-перше, моделей зв'язаних та взаємовпливаючих процесів і станів у елементах ОБТ, по-друге, – проєктно-технологічних рішень цих об'єктів, які закладаються на етапі їх створення, а по-третє, діючих засобів ураження та заданих ТТХ досліджуваних об'єктів броньованої техніки. Тим самим на основі теорії узагальненого

параметричного моделювання об'єднуються, з одного боку, усі етапи життєвого циклу ОБТ, а, з іншого, – сукупність ТТХ та ХЧУ. Якраз така обставина створює можливість на основі здійснення комплексу досліджень обґрунтувати прогресивні технічні рішення ОБТ із ТТХ на світовому рівні.

Підхід, що заявлений, має порівняно із відомими відмічені елементи новизни: повноту охопту об'єкту дослідження, взаємовпливу його процесів і станів та критеріальних властивостей – заданих рівнів ТТХ.

При цьому оновлено підходи до побудови математичних та чисельних моделей елементів ОБТ: вони складаються із загальної частини, яка описує досліджувані процеси і стани у всій їх глибині (нестационарні, нелінійні, залежні від історії навантаження тощо), та спеціалізованої, яка спрямована на детальне моделювання конкретного об'єкта (бронекорпус, трансмісія тощо).

Із метою здійснення досліджень на високому методологічному рівні удосконалені методи чисельного моделювання: розвинені та адаптовані варіанти методів скінченних та граничних елементів, методів скінченних об'ємів та різниць, що доповнені узагальненим параметричним описом об'єктів досліджень. Відповідно, для реалізації усього комплексу досліджень розроблено засоби із достатніми можливостями: програмно-модельний комплекс, який об'єднує, з одного боку, універсальні програмні засоби чисельного моделювання, а, з іншого, – спеціалізовані модулі та параметризовані моделі; програмно-апаратний комплекс, у якому програмно-модельне забезпечення доповнюється апаратними засобами, зокрема, комп'ютерним кластером.

Таким чином, усі підходи, моделі та методи, що розроблені, удосконалені та створені, у кінцевому результаті забезпечуються відповідними створюваними засобами. Крім того, залучені засоби із метою визначення фізико-механічних властивостей матеріалів елементів ОБТ, які мають неоднорідну композиційну структуру, жаростійкі, високоміцні, із нанесеними покриттями або зміцнені.

У цілому заявлено та реалізовано принцип відповідності теоретичного рівня рівню складної проблеми, а засобів досліджень – їх обсягу, що створює базу для вирішення актуальної та важливої проблеми, яка сформована.

У ході досліджень задіяні такі напрямки та складові.

1. Теоретичні розробки із удосконалення підходів до побудови математичних та чисельних моделей досліджуваних елементів об'єктів броньованої техніки.

2. Дослідження процесів при газодинамічному обтіканні та пружно-пластичному деформуванні бронекорпусів сучасних та перспективних об'єктів броньованої техніки.

3. Аналіз пружно-пластичного деформування елементів перспективних танкових трансмісій із урахуванням їх контактної взаємодії, наявності та властивостей матеріалів приповерхневих або проміжних шарів матеріалів.

4. Розроблення рекомендацій стосовно проектних рішень елементів об'єктів броньованої техніки за критеріями міцності, захищеності та рухливості.

У ході подальших досліджень буде задіяно та перевірено одну із базових гіпотез – про можливість, доцільність та ефективність формування та оперування із єдиною узагальненою множиною чинників, які описують певний клас об'єктів досліджень на прикладі елементів ОБТ. Відповідно, при цьому буде розвинена та удосконалена теорія узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних механічних системах та реалізовано зв'язки окремих підмножин різномірних компонент, які раніше не бралися до уваги. Зокрема, це процеси і стани досліджуваних елементів, їх властивості і характеристики у взаємодії та у залежності від впливу зовнішніх факторів задля задоволення певних заданих вимог, причому два останні є варійованими, нечіткими та змінюваними, що принципово відрізняється від традиційних постановок.

Оскільки створювані моделі досліджуваних об'єктів є надзвичайно складними, то просте прогнозування реакції об'єкта на зміну внутрішньої структури чи параметрів, зовнішніх впливів чи умов неможливе. Відповідно, розроблені нові методи пізнання їх поведінки на основі розвитку теорії збурень: система із деякого номінального стану буде збурюватися, причому не за нескінченно малих, як традиційно, а за скінченних збурень. При цьому сценарії таких збурень не передбачають повернення у номінальний стан після зняття збурень.

Базуючись на розумінні досліджуваних процесів і станів як суттєво нелінійних, очікується виявлення явищ різкої зміни властивостей об'єкта за плавного варіювання певних параметрів.

У комплексі очікувані результати досліджень розкривають нові закономірності процесів і станів складних нелінійних систем.

**Аналіз здійснених розробок.** Об'єкти бронетанкової техніки у цій роботі розглядаються, на відміну від частинно системного підходу [1–7], у більш складному аспекті: система розглядається не тільки у взаємозв'язку окремих компонент, але і у їх взаємовпливі; крім того, система, що будується, має властивості поповнювання за рахунок значущих чинників, що, на відміну від існуючих підходів, робить об'єкт не тільки параметрично, але й за складом структурно варійованим. Це дуже важливо із огляду і на загальну проблематику, і на окремі аспекти, що розглядаються. Так, у роботах [2–5] побудовані складні моделі та застосовані сучасні методи моделювання процесів дії вибухової хвилі на бронеконструкції. Проте об'єкт досліджень є або заданим, або варійованим за певною заданою програмою. Разом із тим не надано можливостей здійснення обернених процедур – цілеспрямованого пошуку таких рішень, які призводять до заданого результату. На відміну від цього, підходи, що пропонуються у цій роботі, якраз такими новими можливостями володіють. Якщо звернутися до задач про НДС та контактну взаємодію деформівних тіл [8–10], то вони зазвичай оперують із об'єктами фіксованих структур та параметрів. Разом із тим набагато більший інтерес становлять саме об'єкти, форма, структура та параметри котрих є не просто варійованими, а шуканими та цілеспрямовано уточнюваними. Якраз таку новизну мають підходи,

що описані у роботі на розвиток [21–25].

Окрім методологічних переваг, результати досліджень на основі запропонованих розробок мають ще й новизну в установлюваних закономірностях поведінки складних нелінійних систем за варіювання внутрішніх та зовнішніх чинників. Більш того, таке варіювання, детерміноване чи стохастичне збурення якраз і заявлене як методологія досліджень складних нелінійних систем, для яких традиційні методи недостаткові. Варто зазначити, що, на відміну від відомих, у роботі описані побудовані, розвинені або адаптовані до досліджень процесів і станів у складних системах узагальнені варіаційні постановки [21–25]. Крім того, пропонується новий принцип побудови варіаційної постановки та функціоналу, що мінімізується.

Результати досліджень із застосуванням розроблених теоретичних основ мають значення для світової та вітчизняної науки як суттєвий крок у встановленні закономірностей процесів і явищ у складних об'єктах за збурення їх структури, параметрів та зовнішніх впливів. Більш того, враховуючи відповідальність досліджуваних елементів ОБТ, ці прогнозовані закономірності, ефекти та явища будуть у короткі терміни перевірені експериментально у ході проєктних розробок нових зразків озброєнь і військової техніки, а також використані для практичних потреб. При цьому розділяються загальносистемні аспекти, що властиві усім подібним системам, та інформація з обмеженим доступом – для вітчизняних розробників техніки.

З огляду на зазначені обставини, за результатами прогнаних досліджень його практичну цінність складають інтегровані програмно-модельні комплекси на основі останніх досягнень комп'ютерних систем автоматизованого проєктування і досліджень та розробок із заявлених напрямків. Суттєве практичне значення очікуваних результатів полягає у розробці ефективного інструменту розв'язання задач забезпечення, зокрема, захищеності бойових машин при дії ударної хвилі та рухливості на етапі проєктування шляхом науково обгрунтованого вибору параметрів силових елементів бронекорпусів і трансмісій. Зокрема, планується знизити рівень напружень у бронекорпусах та підвищити довговічність елементів трансмісій при зростанні потужності двигуна. Розроблені методи, алгоритми та моделі можуть використовуватися на підприємствах, які займаються проєктуванням, технологічною підготовкою виробництва та виготовленням об'єктів бойової техніки нового покоління.

**Висновки.** У роботі описані теоретичні основи аналізу процесів і станів у елементах об'єктів бронетанкової техніки та синтезу їх технічних рішень задля досягнення їх високих тактико-технічних характеристик.

Їх значущість особливо зростає в умовах теперішнього часу за наявності бойових дій, які потребують виготовлення та постачання військової техніки із високими тактико-технічними характеристиками. Своєю чергою, досягнення світового рівня цих характеристик неможливе без здійснення у першочерговому порядку низки досліджень, зокрема, на

базі описаного в роботі підходу. Дослідження на цій основі якраз спрямовані на наукове обгрунтування прогресивних технічних рішень об'єктів військової техніки.

У цілому із загальносистемних міркувань важливо відірватися від традиційної парадигми дослідження складних систем за принципом «чорної скриньки», який передбачає аналіз реакції за принципом «вхід-вихід» на основі лінеаризації відгуку на комплекс впливів. Насправді такі системи демонструють відмінні від цих риси:

- 1) незастосовність принципу суперпозиції;
- 2) взаємовплив різних чинників;
- 3) можливий перехід кількісних змін у якісні;
- 4) незворотність процесів тощо.

Особливо слід вивчити такі системи не тільки у разі їх складності, але й відповідальності, як у випадку елементів озброєння та військової техніки. Якраз такі важливі дослідження стають можливими із застосування розробленого підходу.

#### Список літератури

1. Чепков І. Б. Використання передових наукових знань, технологічних розробок та інновацій для зміцнення обороноздатності держави та досягнення військової переваги у технологічній сфері. *Вісник Національної академії наук України*. 2021. № 6. С. 59–62
2. Bisyk S. P., Chepkov I. B., Vaskivskyy M. I., Davydovskiy L. S. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 1. С. 22–31
3. Kharchenko V., Katok O., Sereda A., Rudnitskiy M., Kravchuk R., Bisyk S. (2022). Determination of strength characteristics of high-strength sheet steels by hardness and instrumented indentation. *Procedia Structural Integrity*, vol. 36, pp. 277–28. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.035
4. Katok O. A., Kravchuk R. V., Kharchenko V. V., Rudnitskiy M. P., Bisyk S. P., Davydovskiy L. S., Slyvinskiy O. A. Strength Assessment of Welded Joints of High-Strength Alloy Steels by Indentation Method. *Strength of Materials*, 2020/9, vol. 52, iss. 5, pp. 715–721
5. Davydovskiy L., Bisyk S., Hutov I., Lilov I., Kuprinenko A., Yalynitskiy O. (2020). Optimization of the parameters of the energy absorbing element of the armored combat vehicle's seat in the conditions of explosive loading. *Trans Motauto World*, vol. 5, iss. 2, pp. 45–47.
6. Гусяков О. М., Довгополий А. С., Чепков І. Б. Критичні технології для створення наземних робототехнічних комплексів важкого та середнього класів. *Озброєння та військова техніка*, 2020. С. 24–34
7. Andrew Feickert The Army's Optionally Manned Fighting Vehicle (OMFV) Program: Background and Issues for Congress, *Congressional Research Service Report for Members and Committees of Congress*, updated July 13, 2020, <https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45519.pdf>
8. Matei A., Sitzmann S., Willner K., Wohlmuth B. I. (2018) A mixed variational formulation for a class of contact problems in viscoelasticity. *Applicable Analysis*. 97:8, pp. 1340–1356.
9. Barber J.R. *Contact Mechanics*. Springer International Publishing. 2018. 585 p.
10. Bobyr', N. I.; Koval', V. V. Damage Contribution to the Assessment of the Stress-Strain State of Structure Elements. *Strength of Materials May 2017*, vol. 49, iss. 3, pp. 361–368
11. Trémolières R., Lions J.-L., Glowinski R. *Numerical Analysis of Variational Inequalities*. Amsterdam: Elsevier, 2011. 775 p.
12. Martynyak R. M., Prokopyshyn I. A., Prokopyshyn I. I. (2015). Contact of elastic bodies with nonlinear Winkler surface layers. *Journal of Mathematical Sciences*, 3, vol. 205, iss. 4, pp. 535–539.
13. Zhao J., E. Vollebregt, C. (2016). Oosterlee Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach. *Mathematical Modelling and Analysis*, vol. 21 (1), pp. 119–141.

14. Kinderlehrer D., Stampacchia G. (2000). An Introduction to Variational Inequalities and Their Applications. *Classics in Applied Mathematics* (Том 31). SIAM, 333 p.
15. Prokopyshyn I. I. (2022). Thermomechanical Contact of Elastic Bodies with Nonlinear Winkler Surface Layers. *Journal of Mathematical Sciences*. 265(21-26). DOI:10.1007/s10958-022-06068-4
16. Zhao J., E. Vollebregt, C. (2016). Oosterlee Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach. *Mathematical Modelling and Analysis*, vol. 21 (1), pp. 119–141.
17. Stephan, E.P., Tran, T. (2021). FEM–BEM Coupling. In: Schwarz Methods and Multilevel Preconditioners for Boundary Element Methods. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79283-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79283-1_14)
18. Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor, J. Z. Zhu. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals] 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
19. Li, Q., Pohrt, R., Lyashenko, I. A., Popov, V. L. (2018). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 1350650119854250.
20. Murat Yaylacı, Erdal Öner, Gökhan Adıyaman, Şevval Öztürk, Ecren Uzun Yaylacı & Ahmet Birinci (2023). Analyzing of continuous and discontinuous contact problems of a functionally graded layer: theory of elasticity and finite element method. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, DOI: 10.1080/15397734.2023.2262562
21. Tkachuk M. M., Skripchenko N., Tkachuk M. A., Grabovskiy A. (2018). Numerical Methods for Contact Analysis of Complex-Shaped Bodies with Account for Non-Linear Interface Layers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/7 (95), pp. 22–31. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/143193>
22. Atroschenko O., Tkachuk M., Martynenko O., Tkachuk M., Saverska M., Hrechka I. (2019). Khovansky S. The Study of Multicomponent Loading Effect on Thin-Walled Structures With Bolted Connections. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (97), pp. 15–25. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/154378>
23. Ткачук Н. А., Кравченко С. А., Пылев В. А., Парсаданов И. В., Грабовский А. В., Веретельник О. В. Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкций: концепция, математическое и численное моделирование. *Наука и техника (Беларусь)*. 2019. Т. 18, № 3. С. 240–247.
24. Ткачук М. А., Хлань О.В., Грабовський А.В., Заворотній А. В. [та ін.] Математичні моделі напружено-деформованого стану елементів бойових машин та технологічних систем для їх виготовлення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2018. № 7 (1283). С.121–131. [http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018\\_7.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_7.pdf)
25. Ткачук М. А., Набоков А. В., Грабовський А. В., Рікунов О. М., Ткачук М. М., Марусенко С. І., Храмова І. Я., Кохановська О. В., Прокопенко М. В., Льозний О. С., Чала Ю. С. Аналіз реакції тестових просторових конструкцій корпусів легкоброньованих машин на дію серії імпульсів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2020. № 2. С. 117–139. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/217419>
5. Davydovskiy L., Bisyk S., Hutov I., Lilov I., Kuprinenko A., Yalnytyskiy O. (2020). Optimization of the parameters of the energy absorbing element of the armored combat vehicle's seat in the conditions of explosive loading. *Trans Motauto World*, vol. 5, iss. 2, pp. 45–47.
6. Гусялков О. М., Довгополий А. С., Чепков І. Б. Критичні технології для створення наземних робототехнічних комплексів важкого та середнього класів. *Озброєння та військова техніка*, 2020. С. 24–34
7. Andrew Feickert The Army's Optionally Manned Fighting Vehicle (OMFV) Program: Background and Issues for Congress, *Congressional Research Service Report for Members and Committees of Congress*, updated July 13, 2020, <https://fas.org/sgp/crs/weapons/R45519.pdf>
8. Matei A., Sitzmann S., Willner K., Wohlmuth B. I. (2018) A mixed variational formulation for a class of contact problems in viscoelasticity. *Applicable Analysis*. 97:8, pp. 1340–1356.
9. Barber J.R. Contact Mechanics. Springer International Publishing. 2018. 585 p.
10. Bobyř, N. I.; Koval', V. V. Damage Contribution to the Assessment of the Stress-Strain State of Structure Elements. *Strength of Materials* May 2017, vol. 49, iss. 3, pp. 361–368
11. Trémolières R., Lions J.-L., Glowinski R. *Numerical Analysis of Variational Inequalities*. Amsterdam: Elsevier, 2011. 775 p.
12. Martynyak R. M., Prokopyshyn I. A., Prokopyshyn I. I. (2015). Contact of elastic bodies with nonlinear Winkler surface layers. *Journal of Mathematical Sciences*, 3, vol. 205, iss. 4, pp. 535–539.
13. Zhao J., E. Vollebregt, C. (2016). Oosterlee Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach. *Mathematical Modelling and Analysis*, vol. 21 (1), pp. 119–141.
14. Kinderlehrer D., Stampacchia G. (2000). An Introduction to Variational Inequalities and Their Applications. *Classics in Applied Mathematics* (Том 31). SIAM, 333 p.
15. Prokopyshyn I. I. (2022). Thermomechanical Contact of Elastic Bodies with Nonlinear Winkler Surface Layers. *Journal of Mathematical Sciences*. 265(21-26). DOI:10.1007/s10958-022-06068-4
16. Zhao J., E. Vollebregt, C. (2016). Oosterlee Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach. *Mathematical Modelling and Analysis*, vol. 21 (1), pp. 119–141.
17. Stephan, E.P., Tran, T. (2021). FEM–BEM Coupling. In: Schwarz Methods and Multilevel Preconditioners for Boundary Element Methods. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79283-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79283-1_14)
18. Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor, J. Z. Zhu. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals] 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
19. Li, Q., Pohrt, R., Lyashenko, I. A., Popov, V. L. (2018). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 1350650119854250.
20. Murat Yaylacı, Erdal Öner, Gökhan Adıyaman, Şevval Öztürk, Ecren Uzun Yaylacı & Ahmet Birinci (2023). Analyzing of continuous and discontinuous contact problems of a functionally graded layer: theory of elasticity and finite element method. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, DOI: 10.1080/15397734.2023.2262562
21. Tkachuk M. M., Skripchenko N., Tkachuk M. A., Grabovskiy A. (2018). Numerical Methods for Contact Analysis of Complex-Shaped Bodies with Account for Non-Linear Interface Layers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/7 (95), pp. 22–31. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/143193>
22. Atroschenko O., Tkachuk M., Martynenko O., Tkachuk M., Saverska M., Hrechka I. (2019). Khovansky S. The Study of Multicomponent Loading Effect on Thin-Walled Structures With Bolted Connections. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (97), pp. 15–25. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/154378>
23. Tkachuk N. A., Kravchenko S. A., Pylev V. A., Parsadanov Y. V., Hrabovskiy A. V., Veretelnik O. V. (2019). Dыskretno-kontыnuальное упрочнение контактирующыkh элементoв конструkтыи: kontseptсыя, матeматычeское y чыслeнное modelыrovanye. *Наука y tekhnыka (Belarus)*, T. 18, no. 3, pp. 240–247.
24. Tkachuk M. A., Khlan O.V., Hrabovskiy A.V., Zavorotnii A. V. [та ін.] (2018). Математычны модели напружено-деформованого

#### References (transliterated)

1. Chepkov I. B. (2021). Vykorystannia peredovykh naukovykh znan, tekhnolohichnykh rozrobok ta innovatsii dlia zmitsnennia oboronozdatnosti derzhavy ta dosiahnennia viiskovoi perevahy u tekhnolohichnii sferi. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 6, pp. 59–62
2. Bisyk S. P., Chepkov I. B., Vaskivskyy M. I., Davydovskiy L. S. (2019). Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, no 1, pp. 22–31
3. Kharchenko V., Katok O., Sereda A., Rudnitskiy M., Kravchuk R., Bisyk S. (2022). Determination of strength characteristics of high-strength sheet steels by hardness and instrumented indentation. *Procedia Structural Integrity*, vol. 36, pp. 277–28. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.035
4. Katok O. A., Kravchuk R. V., Kharchenko V. V., Rudnits'kyi M. P., Bisyk S. P., Davydov's'kyi L. S., Slyvins'kyi O. A. Strength Assessment of Welded Joints of High-

stanu elementiv boiovykh mashyn ta tekhnolohichnykh system dlia yikh vyhotovlennia. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 7 (1283), pp. 121–131. [http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018\\_7.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_7.pdf)

25. Tkachuk M. A., Nabokov A. V., Hrabovskyi A. V., Rikunov O. M., Tkachuk M. M., Marusenko S. I., Khramtsova I. Ya., Kokhanovska O. V., Prokopenko M. V., Loznyi O. S., Chala Yu.

S. (2020). Analiz reaktsii testovykh prostorovykh konstruksii korpusiv lehkobronovanykh mashyn na diu serii impulsiv. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 2, pp. 117–139. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/217419>

*Надійшла (received).12.04.2024*

#### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Васильєв Антон Юрійович / Vasyliiev Anton** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-0950>, e-mail: [Obra.in.urchin@gmail.com](mailto:Obra.in.urchin@gmail.com)

**Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola** – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>, тел.: (057)7076902, e-mail: [m.tkachuk@tmm-sapr.org](mailto:m.tkachuk@tmm-sapr.org).

**Грабовський Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; тел.: (057)7076166, e-mail: [andrej8383@gmail.com](mailto:andrej8383@gmail.com)

**Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A.** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org)

**Шуть Олександр Юрійович / Shut Oleksandr** – аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org)

**Нечаєв Роман Геннадійович / Nechaiev Roman** – головний інженер ДП «Завод ім. В.О. Малишева», м. Харків, Україна, e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org)

**Зінченко Олена Іванівна / Zinchenko Olena** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), докторант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2961-5861>; e-mail: [ez99953@gmail.com](mailto:ez99953@gmail.com)

**Вейлер Володимир Сергійович / Veiler Volodymyr** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна, e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org)

**Льозний Олег Сергійович / Loznyi Oleg** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; e-mail: [s1708@tmm-sapr.org](mailto:s1708@tmm-sapr.org)