

*А.Ю. ВАСИЛЬЄВ, С.В. КУЦЕНКО, М.О. БОНДАРЕНКО, В.В. ШЕМАНСЬКА, Т.О. ВАСИЛЬЄВА,  
Я.М. БАРАНИКОВ*

**СТВОРЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ І СТАНІВ,  
А ТАКОЖ СИНТЕЗУ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ І ПАРАМЕТРІВ БРОНЕКОРПУСІВ  
ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН**

У роботі виконуються розробка методологічних основ проведення комп'ютерних розрахунків при проектуванні систем протимінного захисту. На сьогодні найбільш широко для проведення проектних досліджень використовуються програмні комплекси, що реалізують метод скінченних елементів. Виконуються дослідження напружено-деформованого стану днища корпусу під дією ударно-хвильового навантаження від мінного підриву з варіацією вхідних параметрів, таких як вид днища. Розробляється спеціалізований програмно-моделльний комплекс, за допомогою якого автоматизується моделювання вибуху заряду, що містить вибухівку. Створена програма є автономною, орієнтованою на предметну область і використовує ANSYS і LS-DYNA.

**Ключові слова:** вибух, комп'ютерні розрахунки, протимінний захист, метод скінченних елементів, ударно-хвильове навантаження, спеціалізований програмно-моделльний комплекс, ANSYS, LS-DYNA

*А.Ю. ВАСИЛЬЄВ, С.В. КУЦЕНКО, М.А. БОНДАРЕНКО, В.В. ШЕМАНСКАЯ, Т.А. ВАСИЛЬЄВА,  
Я.Н. БАРАНИКОВ*

**СОЗДАНИЕ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ И СОСТОЯНИЙ,  
А ТАКЖЕ СИНТЕЗА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ И ПАРАМЕТРОВ БРОНЕКОРПУСОВ  
ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН**

В работе выполняется разработка методологических основ проведения компьютерных расчетов при проектировании систем противоминной защиты. На сегодня наиболее широко для проведения проектных исследований используются программные комплексы, реализующие метод конечных элементов. Выполняется исследование напряженно-деформированного состояния днища корпуса под действием ударно-волновой нагрузки от мінного подрыва с вариацией входных параметров, таких как вид днища. Разрабатывается специализированный программно-моделльный комплекс, с помощью которого автоматизируется моделирование взрыва заряда, содержащего взрывчатку. Созданная программа является автономной, ориентированной на предметную область и использует ANSYS и LS-DYNA.

**Ключевые слова:** взрыв, компьютерные расчеты, противоминная защита, метод конечных элементов, ударно-волновые нагрузки, специализированный программно-моделльный комплекс, ANSYS, LS-DYNA.

*A. VASILIEV, S. KUSENKO, M. BONDARENKO, V. SHEMANSKA, T. VASILIEVA,  
YA. BARANIKOV*

**CREATION OF THE TOOL FOR PROBLEMS SOLVING OF PROCESSES AND STATES ANALYSIS  
AND ALSO SYNTHESIS OF DESIGN SOLUTIONS AND PARAMETERS OF ARMORED HULLS  
OF LIGHTLY ARMORED VEHICLES**

The flexible and effective tool for problems solving of processes and states analysis, as well as the synthesis of design solutions and parameters of armored corps of lightly engineered machines is created in this work. The methodological foundations of computer calculations in design of mine protection systems is developing. At present, the most widely used for carrying out project studies are software packages that implement the finite element method. Studies of the stress-strain state of the bottom of the hull under the action of shock-wave load from a mine explosion with a variation of input parameters, such as the type of the bottom, are performed. A specialized software-model complex is being developed, with the help of which the simulation of the explosion of a charge containing explosives is automated. The created program is autonomous, domain-oriented, and uses ANSYS and LS-DYNA.

**Keywords:** explosion, computer calculations, antimine protection, finite element method, shock-wave loads, specialized program-model complex, ANSYS, LS-DYNA

**Вступ.** По всьому світу час від часу виникають збройні конфлікти. Таким чином, населення змушене жити в умовах військових протистоянь. У ці періоди, а також у часи нестабільності після закінчення протистояння вкрай важливо, щоб гуманітарні поставки продовольства, медикаментів, а також перевезення людей були забезпечені необхідним захистом [1–3].

Згідно до статистики з бойових дій, міни різної потужності є одним з найбільш розповсюджених засобів ураження військової техніки під час збройних конфліктів. Під час вибуху пошкоджується не тільки техніка, але й уражається особовий склад, що розміщений у корпусі машин. Великою проблемою є не тільки можливість ураження підвищеним тиском від ударної хвилі, але й те, що навіть при збереженні цілісності бронекорпусу за рахунок великих пластичних деформацій елементів бронекорпусу та великих швидкостей та прискорень самого корпусу особовий склад може постраждати. Цього можна уникнути через створення

системи елементів, що мають підвищені властивості до поглинання енергії вибуху, згладжування піків швидкостей та прискорень, для зменшення можливості ураження особового складу. На розробку нових технологій і конструктивних методів комплексного захисту щорічно виділяються величезні кошти. Підвищена увага приділяється розрахунковому проектуванню із застосуванням програмних продуктів, що дозволяють отримати попередні результати на будь-якій стадії проектування.

Незважаючи на широкий інтерес до даної проблематики, на сьогоднішній момент завдання, які постають перед розробниками техніки такого типу, вирішені далеко не у повній мірі. Це визначає актуальність даної роботи. У цій роботі розглянуті особливості конструкції, загальні тенденції і концепції системи

© А.Ю. Васильєв, С.В. Куценко, М.О. Бондаренко,  
В.В. Шеманська, Т.О. Васильєва, Я.М. Бараніков, 2019

протимінного захисту. Основним науковим завданням представленої роботи є розробка методологічних основ проведення комп'ютерних розрахунків при проектуванні систем протимінного захисту із залученням передових наукових розробок, програмних комплексів. Комп'ютерна реалізація роботи здійснена із застосуванням ліцензійного програмного забезпечення – пакетів SolidWorks, ANSYS та LS-DYNA. Для розв'язання поставленої складної задачі залучені наукові розробки вчених Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

**Аналіз стану питання.** Головною науково-дослідною установою Міністерства оборони України у сфері розвитку озброєння та військової техніки є Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України. Серед інших напрямків досліджень, багато вчених працюють над питаннями нових технологій і конструктивних методів комплексного захисту, у тому числі – забезпечення протимінної стійкості [4–9]. Зокрема, у роботах Чепкова І.Б., Бісика С.П., Васківського М.І., Чернозубенка О.В., Давидовського Л.С. велика увага приділяється оцінці протимінної стійкості та дослідженню підриву мін, у тому числі – дослідженню впливу чинників ураження підриву мінно-вибухових пристроїв на організм людини. Перераховані дослідження виконуються із залученням математичного моделювання. Розрахункове проектування бойових машин, у тому числі питання забезпечення протимінної стійкості, є також напрямком досліджень Ткачука М.А., Васильєва А.Ю., Баранікова Я.М. [10–14]. Зокрема, ці вчені займаються розробкою методологічних основ проведення чисельних досліджень у сучасних програмних комплексах. Бараніковим Я.М. та Ткачуком М.А. розроблено інтегрований модуль для розрахунку процесів вибуху у середовищі ANSYS. Над питаннями розробки саме захисних систем від мінного підриву, а також їх адаптації до транспортних засобів гуманітарного призначення працює Мазур І.В [15]. Якщо для потреб армії і поліцейських підрозділів спеціально спроектовані і застосовуються різного типу броньовані автомобілі і гусенична техніка, то для гуманітарних миротворчих цілей доводиться застосовувати або транспорт цивільного призначення, або армійський, або демілітаризований, або кустарно виготовлені бронеавтомобілі і зарезервовану техніку. Останнім часом у багатьох країнах світу розробляються транспортні засоби, на яких уже встановлений або може бути встановлений додатковий захист від мінного підриву, від ураження стрілецькою зброєю і гранатометами. Як правило, цей транспорт розроблений для армії і виходячи з її вимог. Проте досвід створення захисту армійської техніки можна застосувати і при розробці транспорту для доставки гуманітарних вантажів та безпечного транспортування людей [15]. Як методологічні основи залучені також роботи [16–27].

**Постановка задачі.** У даній роботі пропонується розглянути різні види і способи протимінного захисту і виробити загальні вимоги та підходи до побудови протимінного захисту, інтегрованого в загальну систему

комплексного захисту бойових машин. Кінцевою метою є розробка принципової схеми комплексного захисту бойових машин. На даний момент серед військових немає єдиної думки про доцільність застосування певного типу днища. У випадку V-подібного днища оптимальний кут нахилу броньових листів підбирається таким, що дає можливість підвищити захист людей, які сидять у бойовій машині, від бічного обстрілу із стрілецької зброї [28]. Натомість плоске днище мінімізує деформації у результаті вибуху міни, збільшуючи жорсткість корпусу машини. Саме така конструкція плоского днища розглянута у цій роботі.

Для наочності і спрощення розрахункової моделі приймемо кілька припущень:

- для розрахунків візьмемо тільки 1/4 частину корпусу, вирізану симетрично щодо двох вертикальних площин;
- корпус знаходиться паралельно площині відображення.

Розрахункову модель схематично представлено на рис. 1. Вона складається з таких шарів: ґрунт, вибухівка, повітря, днище корпусу.

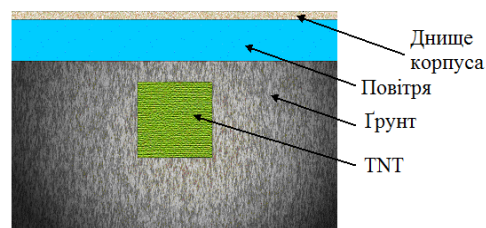


Рисунок 1 – Розрахункова модель

У ході досліджень пропонується розглянути такі варіанти виконання конструкції днища:

- 1) основна броня без додаткових елементів (рис. 2, а);
- 2) основна броня з фальшдном та ребрами жорсткості (рис. 2, б);
- 3) основна броня з фальшдном та ребрами жорсткості. Фальшдно виконано з отворами (рис. 2, в).

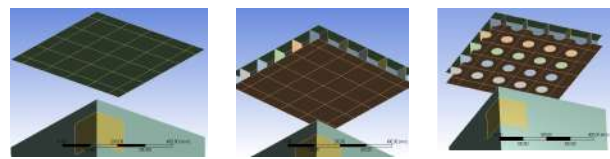


Рисунок 2 – Конструктивні рішення для днища корпусу

Передбачається, що ребра жорсткості та фальшдно при деформуванні повинні гасити енергію удару, причому третій варіант є проміжним між двома першими.

**Математична модель пружно-пластичного деформування і руйнування бронекорпусів при мінному підриві.** Одним з актуальних науково-практичних завдань при проектуванні і виробництві бойових легкоброньованих машин (ЛБМ) є обґрунтування таких конструктивних і технологічних рішень, які б найбільшою мірою забезпечували захищеність їх бронекорпусів від впливу уражаючих факторів [4, 6].

Серед цієї множини факторів виділяється, зокрема, мінний підрив. Він здійснює розподілений по певній поверхні вплив на днище бронекорпусу. Для опису реакції корпусів на такий вплив потрібне істотне вдосконалення математичних моделей даного процесу, для чого були залучені моделі поширення газодинамічного потоку від ударної хвилі вибуху міни та пружно-пластичного деформування елементів корпусу.

При аналізі швидкоплинних процесів поведінки конструкційних матеріалів стає залежною від швидкості деформування. Для адекватного опису процесів деформування бронекорпусів у зоні великих і зростаючих пластичних деформацій необхідне застосування теорії інкрементального типу [29], що зв'язує швидкості (збільшення) деформацій і напружень при активному навантаженні співвідношеннями

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1-2\nu}{E} d\sigma_{ij} + \frac{ds_{ij}}{2G} + \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial\Phi}{\partial\dot{\epsilon}_{ij}} d\dot{\epsilon}_{ij}; i, j = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Тут  $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$  – сферова (гідростатична) частина тензора напружень;  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$  – девіаторна його частина відповідно;  $E, G, \nu$  – модулі пружності I та II роду і коефіцієнт Пуассона відповідно;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера, а  $\Phi(\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}) = 0$  – поверхня текучості.

Враховуючи наявність у конструкції великих деформацій, справедливий нелінійний зв'язок компонентів тензора деформацій і вектора переміщень [29] –

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}). \quad (2)$$

Умови рівноваги у диференціальному вигляді

$$\sigma_{ij,j} + f_i(r, t) = \rho\ddot{u}_i, \quad (3)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу.

Співвідношення (2), (3), переписані у природних або швидкостях, утворюють початково-крайову задачу. Ця система замикається співвідношеннями (1), а також відповідними початковими і крайовими умовами:

$$\mathbf{u}(r, 0) = \mathbf{u}_0(r); \dot{\mathbf{u}}(r, 0) = \dot{\mathbf{u}}_0(r); \quad (4)$$

$$\mathbf{u}(r|_{S_u}, t) = 0; \sigma(r|_{S_\sigma}, t) = \mathbf{p}(r, t). \quad (5)$$

Тут  $\mathbf{r}$  – радіус-вектор точок бронекорпуса, а  $t$  – час.

У даному випадку у (5) присутнє рухоме навантаження  $\mathbf{p}(r, t)$ , що описує дію ударної хвилі, яка рухається зі швидкістю  $\mathbf{V}$  в обраній системі координат. При обтіканні бронекорпусів машин виникає нестационарний нерівномірний розподіл надлишкового тиску, визначення і опис якого докладно описано у роботах [31–333]. Таким чином, до ускладненої моделі поведінки матеріалу додається також і рухоме нестационарне навантаження. У результаті отримана система диференціальних рівнянь, початково-крайових умов і навантажень, і на цьому можна вважати завершеним етап формування математичної моделі у загальному вигляді.

При цьому модель газодинамічного обтікання являє собою систему рівнянь Нав'є-Стокса у нестационарній постановці. Вони відображають закони збереження маси, імпульсу та енергії [354–3838]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k. \quad (8)$$

Тут  $t$  – час,  $u$  – швидкість текучого середовища,  $\rho$  – її щільність,  $p$  – тиск у ній, сгенерованій вибуховою речовиною, яка міститься в міні,  $S_i$  – зовнішні масові сили,  $E$  – повна енергія одиничної маси середовища,  $\tau_{ik}$  – тензор в'язких зсувних напружень, а  $q_i$  – дифузний тепловий потік.

Представлена система рівнянь описує процес газодинамічного обтікання перешкоди (у даному випадку – днища бронекорпуса) для загального випадку. З огляду на певні особливості можна для кожного завдання визначити додаткові умови обтікання.

Розв'язання представленої системи рівнянь дає вихідні дані для обчислення розподілу надлишкового тиску на днище бронекорпуса. Таким чином, отримуємо набір таких узагальнених і традиційних параметрів як форма бронекорпуса, його габарити і розміри бронепанелі, властивості і маса вибухової речовини, глибина закладки міни і властивості ґрунту.

Отримане рухливе ударно-хвильове навантаження прикладається до бронекорпусу, викликаючи в ньому пружно-пластичні деформації і руйнування. Для аналізу процесів руйнування використовується велика кількість різних методів і підходів. При цьому записується повна система рівнянь [39–41]: рівняння стану; модель для опису залежності межі текучості від досягнутого рівня пластичних деформацій, швидкості пластичних деформацій, щільності матеріалу і температури; модель формування руйнувань в структурі матеріалу; модель, що враховує вплив руйнувань на межу текучості і модуль зсуву. Ця система рівнянь в принципі аналогічна системі рівнянь для пружно-пластичного деформування, однак, оскільки швидкість процесів у цьому випадку набагато вище, а основним фізичним процесом є порушення суцільності матеріалу, сама структура співвідношень набагато складніше, причому додається новий вид нелінійності – структура на [31–333].

**Підготовка та проведення чисельних досліджень.** Геометрична модель для проведення розрахунків була побудована у програмному комплексі SolidWorks [42, 43] і складається із твердих (ґрунт, вибухівка) та поверхневих тіл (днище корпусу).

Безпосередньо чисельні дослідження проводилися у пакеті скінченно-елементного аналізу ANSYS [44], у модулі для моделювання швидкоплинних процесів Explicit Dynamics. Для елементів розрахункової моделі із бібліотеки ANSYS задані характеристики матеріалу: сталь марки 4340 – для днища корпусу, пісок – для

моделювання ґрунту, тринітротолуол – як вибухова речовина. На рис. 3 наведено задані параметри товщин для трьох конструктивних рішень виконання днища корпусу, які досліджуються. Товщини панелей підбиралися таким чином, щоб у результаті маса конструкції була однаковою для усіх розглянутих варіантів. Задані крайові умови:

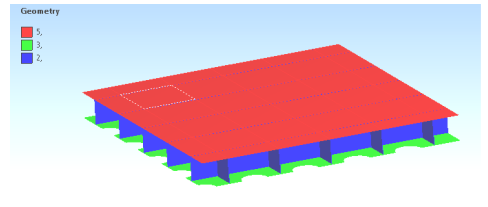
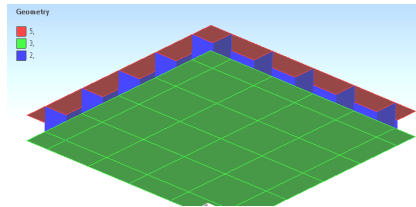
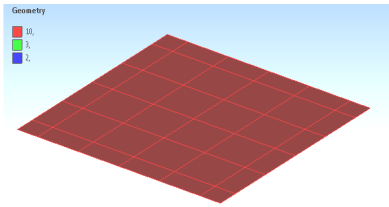


Рисунок 3 – Розподіли товщин для розглянутих конструктивних рішень днища корпусу

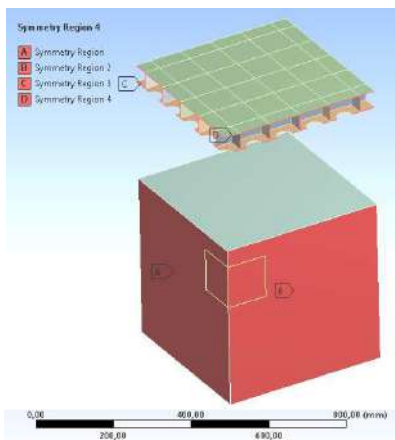


Рисунок 4 – Задані умови симетрії

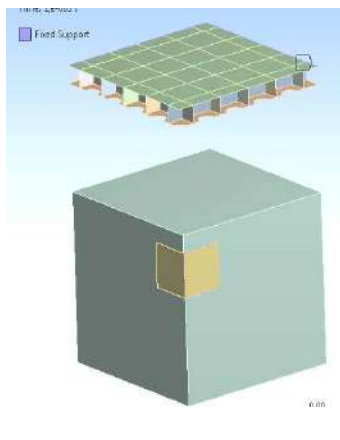


Рисунок 5 – Закріплення моделі

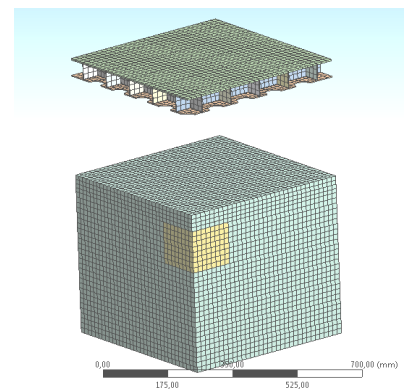


Рисунок 6 – Скінченно-елементна сітка

Для ударної хвилі та бронелістів задано тип контакту – Лагранжеве зв'язування, що працює між вузлами сіток. Навантаження моделюється шляхом налаштування елемента для імітації підриву, доступного у модулі Explicit Dynamics.

**Аналіз результатів.** Для оцінки протимінної стійкості аналізувалися напруження, переміщення та прискорення в елементах днища для трьох варіантів конструкції (рис. 7–16). Порівнюючи тиск ударної хвилі, що діє на бронеліст при різних конструкціях днища, бачимо, що він є найвищим для варіанту №1 (див. рис. 7).

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень для підвищення протимінної стійкості. Деяка інша тенденція спостерігається відносно напружень, переміщень та прискорень, рис. 8, 9. У даному випадку найнижчі показники спостерігаються у 1-шому варіанті виконання днища корпусу – основна броня без додаткових елементів. Також можна відмітити більш хвилястий характер залежностей оцінюваних характеристик від часу для варіанту днища № 3. На рис. 10–15 наведені розподіли напружень та переміщень у 3-х варіантах конструкції.

Таким чином, можна заключити, що запропоновані варіанти конструкції днища дійсно підвищують протимінну стійкість, гасячи енергію удару, але треба приділити більшу увагу підбору раціональних параметрів додаткових елементів. У даному випадку

1) властивість симетрії, адже, як зазначалося, розраховується  $\frac{1}{4}$  конструкції, рис. 4.

2) фіксований край пластини основного бронювання, рис. 5.

Для досліджуваного об'єкта була побудована упорядкована сітка, що включає 40,8 тис. вузлів, 37,7 тис. елементів, рис. 6.

помилковим було зменшувати товщину основного бронеліста аж удвічі. Тому видається доцільним створення спеціалізованого програмно-модельного комплексу для проведення багатоваріантних досліджень, який дає змогу варіювати як конструктивні параметри днища, так і вихідні умови.

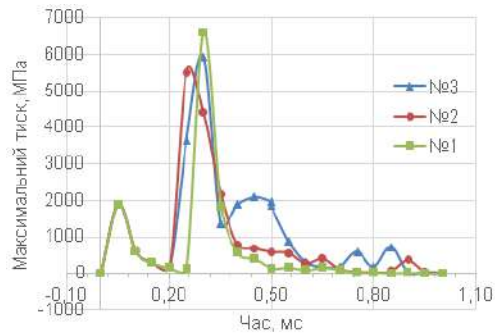
**Створення програмно-модельного комплексу.** У розвиток запропонованої математичної моделі створено спеціалізований програмно-модельний комплекс, за допомогою якого моделюється вибух заряду, що містить вибухівку. Створена програма є автономною, орієнтована на предметну область, і використовує ANSYS і LS-DYNA як «чорна» скринька. У його складі – модуль, який запускається автономно. У ньому необхідно лише ввести вихідні дані про проєктований захист і вибрати тип вибухівки. Все інше модуль виконує самостійно, без втручання інженера, тобто формує моделі, проводить розрахунок і створює файл звіту (рис. 17–24). Програмний комплекс створений і протестований на основі відкритих даних Internet-бібліотеки <http://stinet.dtic.mil/>.

Параметри, доступні для варіювання у створеному програмному модулі (рис. 17): 1) розміри досліджуваного зразка; 2) висота від ґрунту до основної броні; 3) величина заглиблення вибухівки у ґрунт; 4) маса вибухівки у тротиловому еквіваленті; 5) варіант конс-

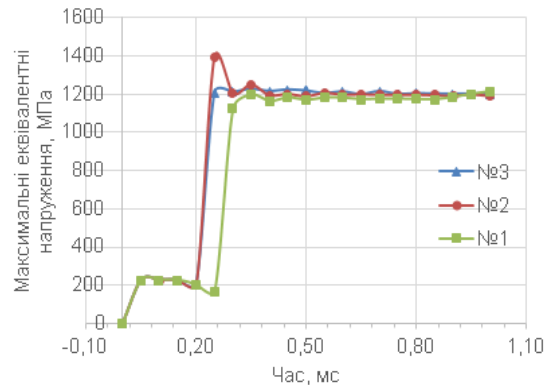
структивного рішення та параметри товщин.

У процесі розрахунку модуль виконує наступні дії: викликає ANSYS для підготовки моделі; формує непередбачувані в ANSYS моделі вибухівки та методи розв'язання, а також файл вихідних даних у форматі, що сприймається LS-DYNA; передає модель на розрахунок в LS-DYNA; викликає ANSYS для обробки

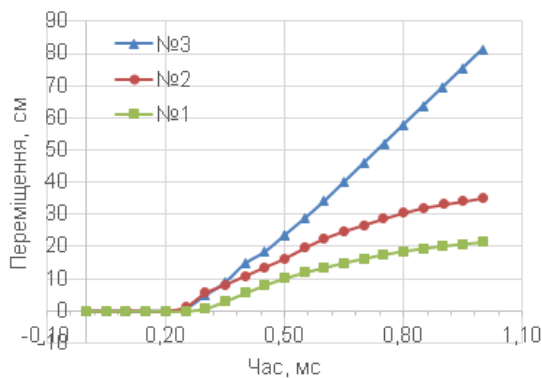
результатів; формує і виводить на екран звіт з ілюстраціями напружень, деформацій і швидкостей, реакціями на захист, а також зберігає в окремий каталог звіт і анімовані картини реакції системи на вибуховий вплив. Робота модуля повністю автоматизована і не вимагає втручання в процесі розрахунку.



Рисунки 7 – Тиск від ударної хвилі, що діє на бронеліст

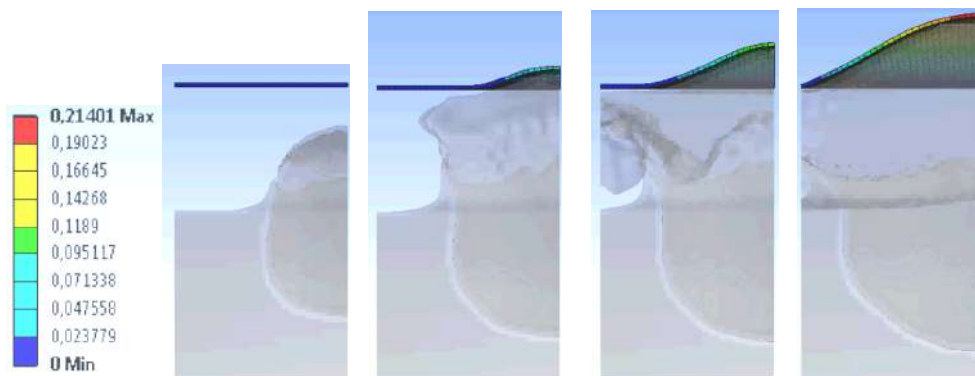


Рисунки 8 – Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом

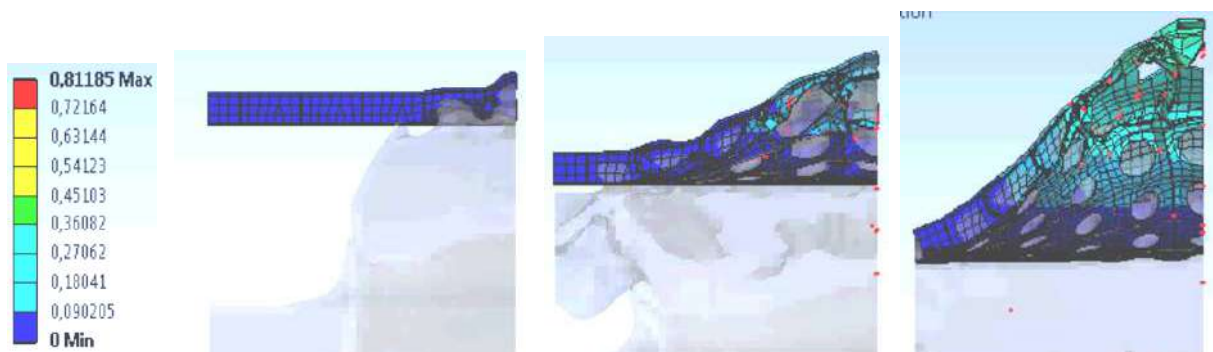


Рисунки 9 – Максимальні переміщення у бронелісті

Рисунки 10 – Максимальні прискорення у бронелісті



Рисунки 11 – Розподіл переміщень у конструкції днища №1 з плином часу, м



Рисунки 12 – Розподіл переміщень у конструкції днища №3 з плином часу, м

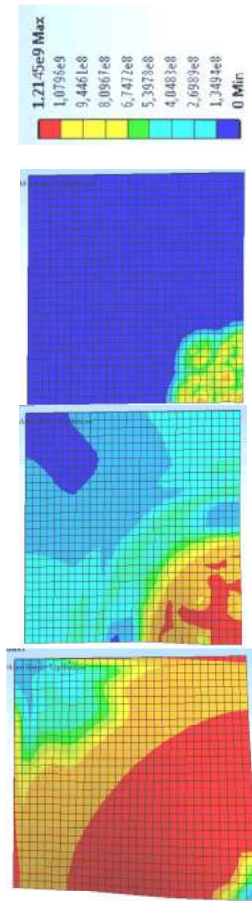


Рисунок 13 – Розподіл напружень у конструкції днища № 1 з плином часу, Па

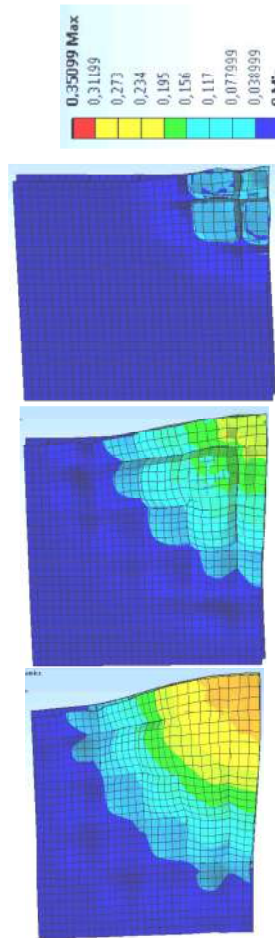


Рисунок 14 – Розподіл переміщень у конструкції днища № 2 з плином часу, м

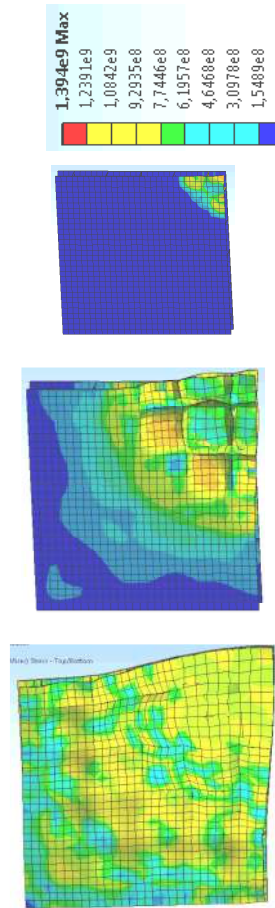


Рисунок 15 – Розподіл напружень у конструкції днища № 2 з плином часу, Па

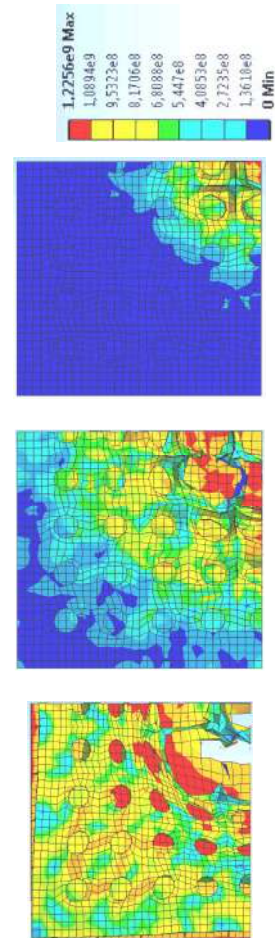


Рисунок 16 – Розподіл напружень у конструкції днища №3 з плином часу, Па

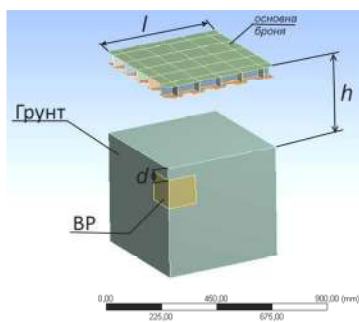


Рисунок 17 – Варійовані параметри

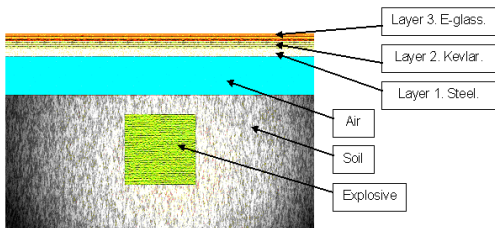
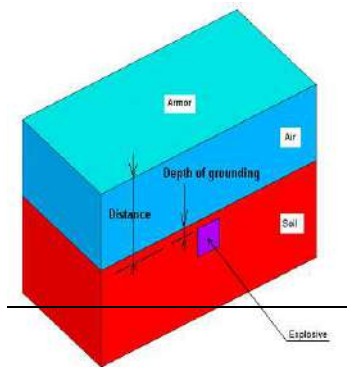


Рисунок 19 – Схема розташування вибухівки по відношенню до захисту (перетин)



Scheme

Distance between 2,3 layers 0.01 m  
 Layers 2,3 not glued  
 Layers 2,3 not glued  
 Layer 3 is E\_GLASS has a thickness 0.024 m  
 Layer 3 has 6 sublayers  
 Distance between 2,3 layers 0.01 m  
 Layers 2,3 glued  
 Layers 2,3 not glued  
 Layer 3 is E\_GLASS has a thickness 0.024 m  
 Layer 3 has 6 sublayers

Armor layers	Material	Thickness	Count of sublayers	Distance between layers
Layer 1	STEEL	0.02	0	
Layer 2	S_GLASS	0.022	6	0.01 Free
Layer 3	E_GLASS	0.024	6	0.01 Free

Explosive

Mass of explosive..... 10      Distance from explosive to 1st list 0.5

Depth of grounding..... 0      Depth of grounding 0.050

Sort of explosive JTT

- BTF
- Comp A-3
- Comp B, Grade A
- Comp C-4
- Cyclotol 77/23
- DIPAM
- EL-506A
- EL-506C

Properties of steel

Elastic moduli 2.01E+11

Yield stress 0.27E+09

Ultimate stress 0.46E+09

Longitudinal plastic limit 15 %

Cross-section plastic limit 30 %

Close SOLVE NOW Do't store results for future ANSYS postprocessing

Рисунок 18 – Інтерфейс визначення вихідних даних програми

При роботі вирішувача LS-DYNA на екрані монітора (рис. 19-24) демонструється поточний час процесу, розвиток ходу рішення, крок за часом і реакції на

захист. Програма працює автономно, але може бути легко вбудована в меню ANSYS. Вона має такі можливості комплексного моделювання: розрахувати удар від

різних типів вибухівки; варіювати кількість шарів захисту, матеріал кожного шару; кількість шарів в перехресно армованому композиті, величину заглиблення вибухівки в землю, відстань від першого аркуша захисту до вибухівки, масу вибухівки та властивості стали (тобто можна імітувати будь-який ізотропний матеріал з нелінійними властивостями); допускає можливість склейки шарів захисту. На рис. 20–23 наведені приклади розрахунку підриву міни вагою 10 кг 3-4 під композитної бронею, що складається з пеноалюмінія, облицьованого скловолокном типу S-glass. Створений розрахунковий модуль дає можливість проводити при необхідності модифікацію. Можливі шляхи його подальшого розвитку: урахування дії осколків на бронезахист, завдання довільного закону дії тиску від вибухівки (власні властивості матеріалу); розширення кількості шарів захисту; урахування довільної геометрії листів захисту і стандартних елементів армування (кутки, швелери, ребра).

Таким чином, можна зробити висновок, що у спеціалізованому програмно-моделному комплексі, який постійно вдосконалюється, для аналізу реакції бронекорпусів на дію ударної хвилі введені додаткові, порівняно з відомими, модулі та враховані додаткові чинники.

Із застосуванням запропонованих в роботі вдосконалених моделей та спеціалізованого програмно-моделного комплексу може бути проведено поглиблений аналіз реакції бронекорпусів на дію ударної хвилі від мінного підриву та розроблені на цій базі обґрунтовані проектні рекомендації для підвищення захищеності ЛБМ.

**Висновки.** У роботі запропонована загальна структура математичної моделі, а також варіант реалізації спеціалізованого програмно-моделного комплексу для оцінки та забезпечення захищеності, міцності і жорсткості бронекорпусів легкоброньованих машин при дії мінного підриву. При цьому реалізований підхід до розв'язання задач синтезу проектних рішень і параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин і дослідження фізико-механічних процесів і станів при їх бойовому використанні на основі результатів комп'ютерного моделювання.

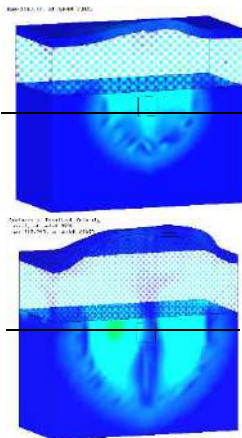


Рисунок 20 – Розподіл швидкості продуктів детонації, ґрунту і деформація композитної і пенометалічної броні

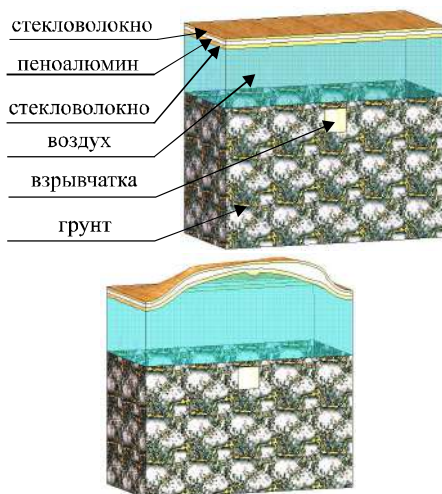


Рисунок 22 – Схема розташування вибухівки по відношенню до захисту і деформація броні під час вибуху (перетин)

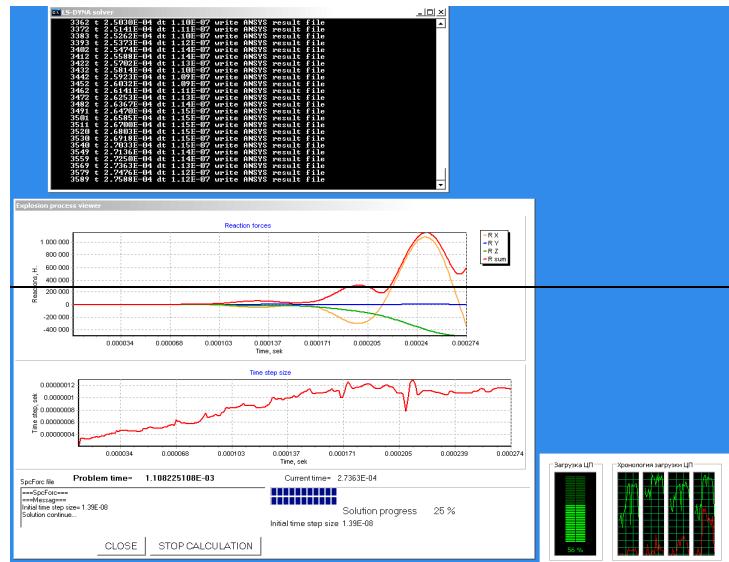


Рисунок 21 – Процес моніторингу розв'язання задачі

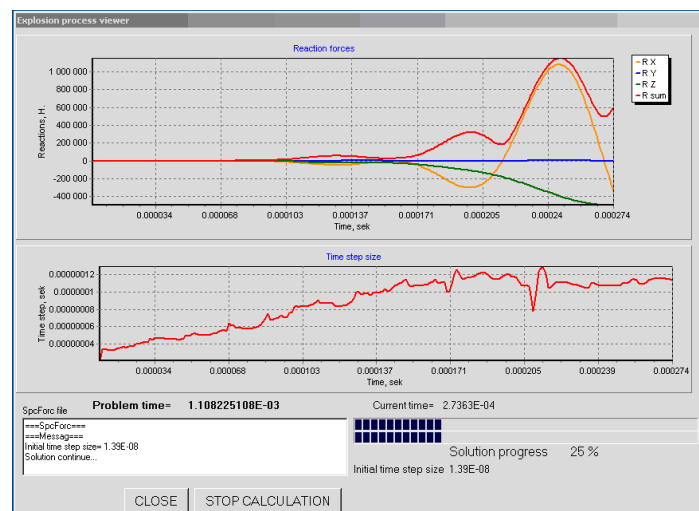


Рисунок 23 – Реакції, напруження і деформації на листах бронезахисту під час вибуху

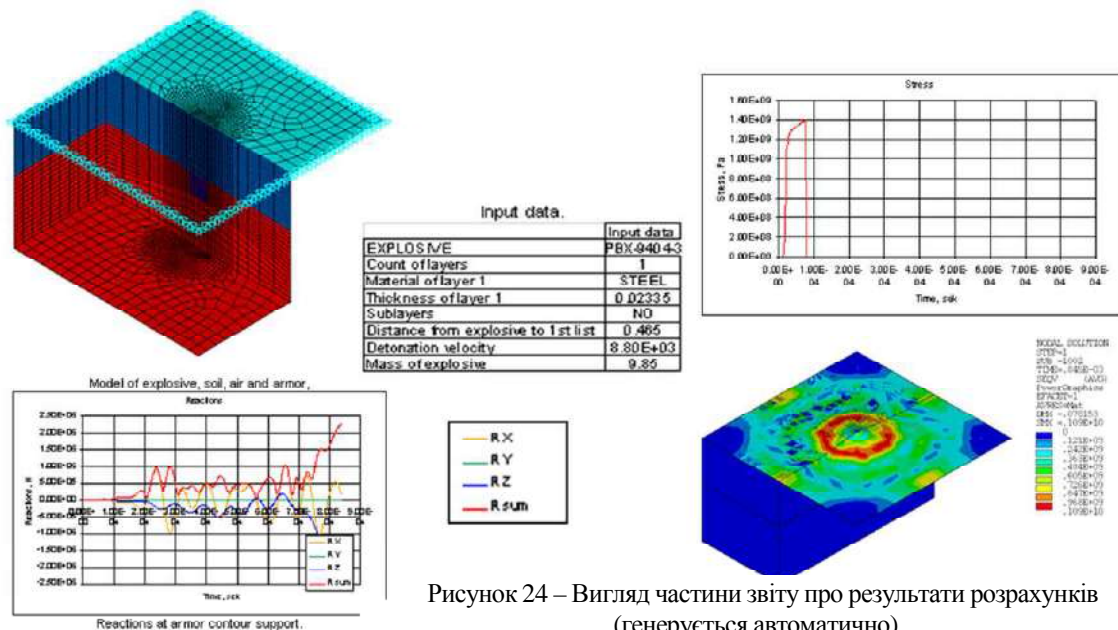


Рисунок 24 – Видяг частини звіту про результати розрахунків (генерується автоматично)

Отримані результати дають підставу для наступних висновків.

1. Комп'ютерна реалізація здійснена не шляхом звуження або спрощення вихідних фізичних і математичних моделей, процесів і станів, а навпаки, шляхом повнофункціонального їх втілення у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу.

2. Створювані спеціалізовані програмно-модельні комплекси мають властивості варіювання основних параметрів бронекорпусів, а також характеристик чинників ураження.

3. Принциповими перевагами запропонованого у роботі спеціалізованого програмно-модельного комплексу для дослідження процесів і станів бронекорпусів є поєднання потужних можливостей універсальних програмних комплексів і врахування специфіки того чи іншого класу досліджуваних об'єктів за допомогою спеціалізованих модулів.

Таким чином, створено гнучкий і ефективний інструмент розв'язання задач аналізу процесів і станів, а також синтезу проектних рішень і параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин.

#### Список літератури

1. Внаслідок підриву військового автомобіля на міні загинули 7 українських військових [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mil.gov.ua>.
2. Військові ЗС України та Національної гвардії на трасі неподалік Ізюма виявили та знешкодили закладений терористами саморобний вибуховий пристрій загальною потужністю 6-7 кг у тротиловому еквіваленті [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mil.gov.ua/>.
3. Summary of global armoured vehicle market report 2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.defenceiq.com/armoured-vehicles/articles/summaryof-global-armoured-vehicle-market-report-2>.
4. Чепков І. Б., М. І. Васильківський, С. П. Бісик, С. І. Шереметов, В. Г. Корбач Дослідження підриву мін у каналі ствола 120-мм міномета. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 2. С. 23–28.
5. Бісик С. П. Підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів бойових броньованих машин з урахуванням зварних з'єднань. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2017. № 3. С. 121–127.
6. Бісик С. П., І. Б. Чепков, М. І. Васильківський, Л. С. Давидовський, В. Г. Корбач, О. М. Висоцький, Д. М. Захаревич Теоретична оцінка

7. Бісик С. П., О. М. Купріненко, В. Г. Корбач Оцінка протимінної стійкості легкої бойової колісної машини. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ». 2015. № 31. С. 11–20.
8. Давидовський Л. С., С. П. Бісик Аналіз механогенезу травмування екіпажу бойових броньованих машин при підриві на мінно-вибухових пристроях. *Військово-технічний збірник*. 2015. № 13. С. 34–40.
9. Чернозубенко О. В., О. М. Купріненко, С. П. Бісик Дослідження впливу уражаючих факторів підриву мінно-вибухових пристроїв на організм людини. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. № 2. С. 39–44.
10. Бараников Я.Н., Н.А. Ткачук, А.В. Литвиненко Интегрированный модуль для расчета процессов взрыва при помощи препостпроцессора ANSYS и решателя LS-DYNA. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2006. №3. С. 3–9.
11. Ткачук Н.А., Г.Д. Грищенко, Я.Н. Бараников, А.В. Литвиненко К вопросу создания интегрированных специализированных систем для моделирования процессов пробивания преград. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2006. №3. С.165–173.
12. Бусяк Ю.М., А.В. Ткачук, Н.А. Деміна, Н.Б. Скрипченко, І.В. Мазур Проблема обеспечения защищенности корпусов легкобронированных машин: постановки и подходы к решению. *Проблемы машиностроения*. 2015. Том 18. № 1. С. 40–45.
13. Васильев А. Ю., А. Ю. Танченко, М. М. Ткачук, Н. Б. Скрипченко, Я. М. Лісовол Обрунтування структури та параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин за критеріями захищеності. *Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу. Інформаційно-комунікативний захід*. – Київ: ТОВ «Міжнародний виставковий центр», 2016. С. 32–36.
14. Мазур І. В., А. В. Грабовський, Н. А. Ткачук, Я. М. Морміло Оптимізація расчета конструктивных параметров элементов рещетчатых противоккумулятивных экранов. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. №39 (1211). С. 86–92.
15. Мазур І.В., Н.А. Ткачук, А.В. Набоков Разработка противоминной защиты, исходя из специфики требований к транспорту специального назначения для миротворческих гуманитарных миссий. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2017. № 12 (1234). С. 65–75.
16. Бісик С.П. Аналіз пріоритетних напрямів вдосконалення протимінного захисту бойових броньованих машин. *ЦНДІ ОВТ ЗСУ. Зб. наук. праць*. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2011. Вип. 19(41). С. 77–81.
17. Радковець Ю. І. [та ін.] Основні типи мін, їх тактико-технічні характеристики та застосування в збройних (локальних) конфлік-



- тах. Інформаційно-тематичне зведення. Головне управління розвідки. – 2001. №2(8). 106 с.
18. Guardia M. *US Army and Marine Corps MRAPs. Mine Resistant Ambush Protected Vehicles* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.ospreypublishing.com](http://www.ospreypublishing.com)].
  19. STANAG 4569 edition 1. *Protection levels for occupants of logistic and light armored vehicles*, NSA/0533-LAND/4569.
  20. Adisak Showichen, A. Hameed *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*. Cranfield University. 2008. – pp. 135–141.
  21. Adisak Showichen, A. Hameed *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*. Cranfield University. 2008, pp. 151–155.
  22. Adisak Showichen, A. Hameed *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*. Cranfield University. 2008. pp. 182–192.
  23. Бісик С.П., І.Б. Чепков, В.А. Голуб, О.Ю. Ларін Дослідження вибухового навантаження Vподібної моделі днища бойової машини. ЦНДІ ОБТ ЗСУ. *Збірник наук. праць*. К.: ЦНДІ ОБТ, 2012. № 1 (22). С. 232–240.
  24. Бісик С.П., К.Б. Круковський-Сіневич, І.Б. Чепков [та ін.] Дослідження навантаження вибухом макетів днищ бойових машин. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ "ХПІ", 2012. № 2. С. 110–118.
  25. Чепков І.Б. Модель обоснования технических решений защитных устройств боевых бронированных машин. *Артиллер. и стрелковое вооружение*. 2011. № 4. С. 42–46.
  26. 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. Лапич.
  27. Бісик С.П., В.А. Голуб, В.П. Корбач Числове вирішення задачі ударно-хвильового навантаження пластини. *Військово-технічний збірник. Академія Сухопутних військ*. Львів: АСВ, 2011. Вип. 2(5). С. 3–6.
  28. Tkachuk M., M. Bondarenko, A. Grabovskiy [и др.] Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/7 (91). P. 18–29.
  29. Васидзу К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*. М.: Мир, 1987. – 542 с.
  30. Карапейчик И.Н., С.Т. Бруль, В.М. Мазин [и др.] Численное моделирование реакции тонкостенной конструкции на действие ударно-волновой нагрузки. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: НТУ "ХПІ". 2011. № 51. С. 59–65.
  31. Ткачук Н.А., Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной [и др.] Конечные элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2006. № 1. С. 57–79.
  32. Ткачук Н.А., С.Т. Бруль, А.Н. Малакей [и др.] Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2005. № 1. С. 184–194.
  33. Бруль С.Т., Н.А. Ткачук, А.Ю. Васильев [и др.] Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты. *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2011. № 1. С. 66–73.
  34. Бойко Г. О., С. В. Лапицкий Деякі дані сучасного стану й тенденцій розвитку безпілотних літальних апаратів. *Озброєння та військова техніка*. 2015. № 1. С. 21–25.
  35. Дейч М.Е. *Техническая газодинамика*. Изд. 2-е, переработ. М.-Л. Госэнергоиздат, 1961. 667 с.
  36. Ландау Л.Д., Е.М. Лифшиц *Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика*. М.: Наука, 1986. 736 с.
  37. Грін О.Г. *Газова динаміка*. Одеса: Астропринт, 2007. 208 с.
  38. Грін О.Г. *Чисельні методи у газовій динаміці*. Одеса: Астропринт, 2006. 168 с.
  39. Чепков І.Б., С.А. Лавриков Модель процесса проникания составного удлиненного поражающего элемента в экранированную преграду. *Пробл. прочности*. 2003. № 2. С. 102–111.
  40. Морозов Е.М., А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. *ANSYS в руках инженера: механика разрушения: монография*. Москва : ЛЕНАНД, 2010. 453 с.
  41. Муйземнек А.Ю., А.А. Богач *Математическое моделирование процесса удара и взрыва в программе LS-DYNA*. Пенза: Инф.-изд. центр ПГУ, 2005. 106 с.
  42. Программный комплекс SolidWorks // <http://www.solidworks.ru>, 17.03.2018.
  43. Дударева Н.Ю., С.А. Загайко. *Solidworks на примерах*. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 496 с.
  44. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. *ANSYS в руках инженера: Практическое руководство*. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

## References (transliterated)

1. *Vnaslidok pidryvu viys'kovoho avtomobilya na mini zahynuly 7 ukrayins'kykh viys'kovykh* [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.mil.gov.ua>.
2. *Viys'kovi ZS Ukrayiny ta Natsional'noi hvardiyi na trasi nepodalik Izyuma vyuvyly ta zneshkodyly zakladenyi terorstamy samorobnyy vybukhovyy prystriy zahal'noy potuzhnosti 6-7 k-h u trolytovomu ekvivalenti* [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.mil.gov.ua/>.
3. *Summary of global armoured vehicle market report 2013* [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.defenceiq.com/armoured-vehicles/articles/summary-of-global-armoured-vehicle-market-report-2>.
4. Chepkov I. B., M. I. Vas'kivs'kyy, S. P. Bisyk, S. I. Sheremetov, V. H. Korbach *Doslidzhennya pidryvu min u kanali stvola 120-mm minometa. Ozbroyennya ta viys'kova tekhnika*. 2017, no 2, pp. 23–28.
5. Bisyk S. P. *Pidkhid do otsinky protyminnoyi stiykosti korpusiv boyovykh bron'ovanykh mashyny z urakhuvanniam zvamykh z'yednan'*. *Nauka i tekhnika Povitryanykh Syl Zbroynykh Syl Ukrayiny*. 2017, no 3, pp. 121–127.
6. Bisyk S. P., I. B. Chepkov, M. I. Vas'kivs'kyy, L. S. Davydovs'kyy, V. H. Korbach, O. M. Vysots'kyy, D. M. Zakharevych *Teoretychna otsinka protyminnoyi stiykosti bahatotsil'ovoho taktynohoho avtomobilya «Kozak-2»*. *Ozbroyennya ta viys'kova tekhnika*. 2016, no 1, pp. 26–31.
7. Bisyk S. P., O. M. Kuprinenko, V. H. Korbach *Otsinka protyminnoyi stiykosti lehkoyi boyovoyi kolisnoyi mashyny. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2015, no 31, pp. 11–20.
8. Davydovs'kyy L. S., S. P. Bisyk *Analiz mekhanohenezu travmuvannya ekipazhu boyovykh bron'ovanykh mashyn pry pidryvi na minno-vybukhovyykh prystroyakh. Viys'kovo-tekhnichnyy zbirnyk*. 2015, no 13, pp. 34–40.
9. Chernozubenko O. V., O.M. Kuprinenko, S.P. Bisyk *Doslidzhennya vplyvu urazhayuchykh faktoriv pidryvu minno-vybukhovyykh prystroyiv na orhanizm lyudyny. Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika*. 2014, no 2, pp. 39–44.
10. Baranyk YA.M., N.A. Tkachuk, A.V. Lytvynenko *Intehrovanyy modul' dlya rozrakhunku protsesiv vybukhu za dopomohoy pre-postprotsesora ANSYS i reshatelya LS-DYNA. Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2006, no 3, pp. 3–9.
11. Tkachuk N.A., H.D. Hrytsenko, YA.M. Baranyk, A.V. Lytvynenko *Do pytannya stvorennya intehrovanykh spetsializovanykh system dlya modelyuvannya protsesiv probyvannya pereshkod. Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2006, no 3, pp. 165–173.
12. Busyak YU.M., A.V. Tkachuk, N.A. Domina, N.B. Skripchenko, I.V. Mazur *Problema obespecheniya zashchishchennosti korpusov legkobrironirovanykh mashin: postanovki i podkhody k resheniyu. Problemy mashinostroyeniya*. 2015. Vol. 18, no 1, pp. 40–45.
13. Vasylyev A. YU., A. YU. Tanchenko, M. M. Tkachuk, N. B. Skripchenko, YA. M. Lisovol *Obruntuvannya Struktury ta parametriv bronekorpusiv lehkobron'ovanykh mashyn za kriteriyami zakhishchennosti. Nauka: bezpeka kraiyiny ta rozvytok viys'kovopromysloвого kompleksu. Informatsiyno-komunikativnyy Zakhid*. Kyiv: TOV «Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr». 2016, pp. 32–36.
14. Mazur I. V., A. V. Hrabovs'kyy, N. A. Tkachuk, YA. M. Mormilo *Optymizatsiya rozrakhunku konstruktivnykh parametriv elementiv gratchastykh protyvokumulyativnyy ekraniv. Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2016, no 39(1211), pp. 86–92.
15. Mazur Y.V., N.A. Tkachuk, A.V. Nabokov *Razrabotka protyvomynnoy zashchyty, yskhodya yz spetsyfyky trebovanyy k transportu spetsyal'noho naznachenyya dlya myrotvorcheskykh humanytamykh myssyy. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut»*. Kharkiv: NTU «KHPI». 2017, no 12 (1234), pp.65–75.

16. Bisyk S.P. Analiz priorytetnykh napryamiv vdoskonalennya protyminnogo zakhystu boyovykh bron'ovanykh mashyn. TSNDI OVT ZSU. Zb. nauk. prats'. Kiev, TSNDI OVT ZSU, 2011, no 19(41), pp. 77–81.
17. Radkovets' YU. I. [ta in.] Osnovni typy min, yikh taktyko-tekhnichni kharakterystyky ta zastosuvannya v zbroynykh (lokal'nykh) konfliktakh. *Informatsiyno-tematychno zvedennya. Holovne upravlinnya rozvidky*. 2001, no 2(8), 106 p.
18. Guardia M. *US Army and Marine Corps MRAPs. Mine Resistant Ambush Protected Vehicles* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.ospreypublishing.com](http://www.ospreypublishing.com).
19. STANAG 4569 edition 1. *Protection levels for occupants of logistic and light armored vehicles*. NSA/0533-LAND/4569.
20. Adisak Showichen, A. Hameed *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*. Cranfield University. 2008. pp. 135–141.
21. Adisak Showichen, A. Hameed *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*. Cranfield University. 2008, pp. 151–155.
22. Adisak Showichen, A. Hameed *Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions*. Cranfield University. 2008. pp. 182–192.
23. Bisyk S.P., I.B. Chepkov, V.A. Holub, O.YU. Larin Doslidzhennya vybukhovoho navantazhennya Vpodibnoyi modeli dnyshcha boyovoyi mashyny. *TSNDI OVT ZSU. Zbirnyk nauk. prats'*. Kiev, TSNDI OVT, 2012, no 1 (22), pp. 232–240.
24. Bisyk S.P., K.B. Krukov's'kyu-Sinevych, I.B. Chepkov [ta in.] Doslidzhennya navantazhennya vybukhom maketiv dnyshch boyovykh mashyn. *Mekhanika ta mashynobuduvannya*. Kharkiv: NTU «KHPi», 2012, no 2, pp. 110–118.
25. Chepkov Y.B. Model' obosnovannya tekhnicheskyykh reshenyy zashchytykh ustroystv boevykh bronirovanykh mashyn. *Artyller. y strelkovoє vooruzhenye*. 2011, no 4, pp. 42–46.
26. Osnovy voenno-tekhnicheskyykh yssledovanyu. Teoryya y prylozhenyya: monohrafyya: [v 4 t.]. T. 4. Metodolohyya yssledovannya slozhnykh system voennoho naznachennya / S.V. Lapytskyu, A.V. Kuchynskyy, A.Y. Sbytnyev [y dr.]; red.: S.V. Lapyts. 2012, no 1, pp. 110–118.
27. Bisyk S.P., V.A. Holub, V.P. Korbach Chyslove vyryshennya zadachi udamo-khvylovoho navantazhennya plastyny. *Viys'kovo-tekhnichnyy zbirnyk. Akademiya Sukhoputnykh viys'k. L'viv: ASV*, 2011, no 2(5), pp. 3–6.
28. Tkachuk M., M. Bondarenko, A. Grabovskiy [и др.] Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no 1/7 (91), pp. 18–29.
29. Vasidzu K. *Variatsionnyy metody v teorii uprugosti i plastichnosti*. Moscow: Mir, 1987. - 542 p.
30. Karapeychyk Y.N., S.T. Brul', V.M. Mazyn [y dr.] Chyslennoe modelirovaniye reaksyy tonkostennoy konstruksyy na deystviye udamo-volnovnoy nahruzky. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkiv's'kyi politekhnichnyy instytut»*. Kharkiv: NTU «KHPi», 2011, no 51, pp. 59–65.
31. Tkachuk N.A., H.D. Hrytsenko, A.D. Chepurnoy [y dr.] Konechno-élementnye modeli élementov slozhnykh mekhanicheskyykh system: tekhnolohyya avtomatyzirovannoy heneratsyy y parametryzovannoho opysanyya. *Mekhanika ta mashynobuduvannya*. Kharkiv: NTU «KHPi». 2006, no 1, pp. 57–79.
32. Tkachuk N.A., S.T. Brul', A.N. Malakey [i dr.] Struktura spetsializirovanykh integrirovanykh sistem avtomatizirovannoho analiza i sinteza élementov transportnykh sredstv spetsial'nogo naznachennya. *Mekhanika i mashinostroyeniye*. Kharkov: NTU «KHPi». 2005, no 1 pp.184-194.
33. Brul' S.T., N.A. Tkachuk, A.YU. Vasil'yev [i dr.] Modelirovaniye fiziko-mekhanicheskikh protsessov v korpusakh legkobronirovanykh mashin: podkhody, modeli, efekty. *Mekhanika i mashinostroyeniye*. Kharkov: NTU «KHPi». 2011, no 1, pp. 66-73
34. Girin A.G. *Chislennyye metody v gazovoy dinamike*. Odessa: Astroprint, 2006. 168 p.
35. Boyko H. O., S. V. Lapyts'kyu Deyaki dani suchasnoho stanu y tendentsiy rozvytku bezpilotnykh lital'nykh aparatyv. *Ozbroyennya ta viys'kova tekhnika*. 2015, no 1, pp. 21–25.
36. Deych M.E. *Tekhnicheskaya hazodynamiya*. Yzd. 2-e, pererabot. M.-L. Hosénerhoizdat, 1961. 667 p.
37. Landau L.D., E.M. Lyfshyts *Teoreticheskaya fizyka*. T. VI. *Hydrodynamika*. Moscow, Nauka, 1986. 736 p.
38. Hirin O.H. *Hazova dynamika*. Odesa: Astroprint, 2007. 208 p.
39. Chepkov I.B., S.A. Lavrikov Model protsessa pronikaniya sostavnogo udlinenno porazhayushchego élementa v ekranirovannuyu pregradu. *Probl. prochnosti*. 2003, no 2, pp. 102-111
40. Morozov Ye.M., A.YU. Muzyemnek, A.S. Shadskiy. *ANSYS v rukakh inzhenera: mekhanika razrusheniya: monografiya*. Moscow, LENAND, 2010. 453 p.
41. Muzyemnek A.YU., A.A. Bogach *Matematicheskoye modelirovaniye protsessa udara i vzryva v programme LS-DYNA*. Penza: inf.-izd. tsentr PGU, 2005. 106 p.
42. *Programmnyy kompleks SolidWorks* // <http://www.solidworks.ru>, 17.03.2018.
43. Dudareva N.YU., S.A. Zagayko. *Solidworks na primerakh*. SPb.: BKHV-Peterburg, 2011. 496 p.
44. Kaplun A. B., Morozov Ye. M., Olfer'yeva M. A. *ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoye rukovodstvo*. Moscow, Yeditorial URSS, 2003. 272 p.

Надійшло (received) 12.10.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Васильєв Антон Юрійович (Васильев Антон Юрьевич, Vasiliev 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: AVasiliev@tmm-sapr.org.

**Куценко Сергій Володимирович (Куценко Сергей Владимирович, Kutsenko Serhii)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна, викладач-стажист кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; Харків, e-mail: skutsenko@tmm-sapr.org.

**Бондаренко Марина Олександрівна (Бондаренко Марина Александровна, Bondarenko Maryna)** – кандидат технічних наук (PhD.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1856-3648>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: [marina.bondarenko@tmm-sapr.org](mailto:marina.bondarenko@tmm-sapr.org).

**Шеманська Вікторія Вікторівна (Шеманская Виктория Викторовна, Shemanska Viktoriya)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка гр. ТМ-86б; м. Харків, Україна

**Васильєва Тетяна Олександрівна (Васильева Татьяна Александровна, Vasilieva Tatjana)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м Харків, Україна

**Бараніков Ярослав Миколайович (Бараников Ярослав Николаевич, Baranikov Yaroslav)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», здобувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна