

О. Є. ШАТАЛОВ, Є. Є. ДУДАР, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ

КОМПЛЕКСНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ЗАХИЩЕНОСТІ БОЙОВИХ МАШИН ЛЕГКОЇ КАТЕГОРІЇ ЗА МАСОЮ ВІД СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ З УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРІЇ МАШИНИ, РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ Й ДОДАТКОВОГО БРОНЮВАННЯ

У роботі викладена розроблена комплексна математична модель для побудови тривимірних тактичних діаграм на місцевості і оцінки рівня броньованої захищеності бойових машин легкої категорії за масою (БМ ЛКМ) від стрілецької зброї, яка дозволяє розраховувати параметри польоту кулі залежно від дальності, кути зустрічі кулі з елементом бронекорпусу з положення стрільця і положенням елемента бронекорпусу, а також швидкості пробиття бронееlementів корпусу з урахуванням додаткового бронювання. Створена математична модель дозволяє вирішувати завдання оцінки безпечної зони для БМ ЛКМ з урахуванням реальної геометрії корпусу, рельєфу місцевості та бронезахищеності існуючих і проєктованих БМ ЛКМ для обґрунтованого вибору методів захисту від сучасної стрілецької зброї, зокрема з урахуванням додаткового бронювання.

Ключові слова: бойова машина; бойова машина легкої категорії за масою; броньована захищеність; швидкість пробиття; тактична діаграма

О. Е. ШАТАЛОВ, Е. Е. ДУДАР, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ

КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ЗАЩИЩЕННОСТИ БОЕВЫХ МАШИН ЛЕГКОЙ КАТЕГОРИИ ПО МАССЕ ОТ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИИ МАШИНЫ, РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО БРОНИРОВАНИЯ

В работе изложена комплексная математическая модель для построения трехмерных тактических диаграмм на местности и оценки уровня бронированной защищенности боевых машин легкой категории по массе (БМ ЛКМ) от стрелкового оружия, которая позволяет рассчитывать параметры полета пули в зависимости от дальности, углы встречи пули с элементом бронекорпуса с положения стрелка и положением элемента бронекорпуса, а также скорости пробития бронееlementов корпуса с учетом дополнительного бронирования. Создана математическая модель позволяет решать задачи оценки безопасной зоны для БМ ЛКМ с учетом реальной геометрии корпуса, рельефа местности и бронезащищенности существующих и проектируемых БМ ЛКМ для обоснованного выбора методов защиты от современного стрелкового оружия, в частности с учетом дополнительного бронирования.

Ключевые слова: боевая машина; боевая машина легкой категории по массе; бронированная защищенность; скорость пробития; тактическая диаграмма

O. SHATALOV, YE. DUDAR, A. VASILIEV

COMPLEX MATHEMATICAL MODEL FOR PROTECTION ANALYSIS OF LIGHT MASS CATEGORY COMBAT VEHICLES FROM SMALL ARMS TAKING INTO ACCOUNT VEHICLE GEOMETRY, LOCATION RELIEF AND ADDITIONAL ARMOURING

A developed complex mathematical model is presented for 3D tactical diagrams constructing on the locality and the armored protection level estimation from small arms for light mass category combat vehicles. This model allows to calculate the bullet flight parameters depending on the range, on the bullet meeting angles with armored housing element, on the arrow position and the armored hull element position, as well as the breakthrough speed of hull armored elements, taking into account the additional armouring. The created mathematical model allows to solve the tasks of the safe zone estimation for light mass category combat vehicles, taking into account the actual hull geometry, location relief and armor-proofing of existing and projected light mass category combat vehicles, for a reasoned choice of protection methods from modern small arms, in particular with allowance for additional armoring.

Keywords: combat vehicle; light mass category combat vehicle; armored protection; breakthrough speed; tactical diagram

Вступ. Захищеність бойових машин (БМ) легкої категорії за масою (ЛКМ) від стрілецької зброї є актуальною проблемою, що потребує свого вирішення. У свою чергу, це вимагає розроблення відповідного математичного апарату.

Слід зазначити, що існуючий на сьогоднішній день математичний апарат дозволяє промодельовувати більшість процесів, які відбуваються в ході бойових дій за участю БМ ЛКМ і стрілецької зброї. У той же час необхідно врахувати: по-перше, математичні моделі багатьох процесів дуже складні та їх моделювання потребує значних ресурсів (кошти, апаратне забезпечення, програмне забезпечення, час); по-друге, на сьогодні єдиної комплексної математичної моделі, що дозволяє здійснити/розв'язати задачу оцінки рівня захищеності БМ ЛКМ від стрілецької зброї з урахуванням всіх необхідних факторів, немає. Таким чином, необхідно об'єднати існуючі моделі для розв'язання задач, що сформульовані як мета поточної роботи.

Аналіз вимог до комплексної математичної моделі, що дозволить коректно оцінювати захищеність з урахуванням сучасних реалій

ведення бойових дій. За основу математичної моделі береться модель, запропонована у роботах Шаталова О.Є., Литвиненка О.В. [1–4]. Як уже зазначалося раніше, у цій математичній моделі відсутні можливості врахувати вплив на рівень захищеності: елементів додаткового бронювання, реальної геометрії БМ ЛКМ та рельєфу місцевості. Крім того у роботах Шаталова О.Є. параметри бронезахищеності обчислюються для окремого зразка БМ ЛКМ, який знаходиться у певній орієнтації у глобальному просторі. Для цього за алгоритмами, наведеними у цих роботах, необхідно виконати певну кількість розрахунків, яка приблизно дорівнює

$$N_{Ц} = N_{Бп} \cdot \frac{180}{\Delta} \cdot \frac{90}{\phi}, \quad (1)$$

де $N_{Ц}$ – кількість циклів;

$N_{Бп}$ – кількість бронеплит;

Δ , ϕ – крок по дельта та фі (кутові координати у сферичній системі координат) відповідно.

Для наявних БМ ЛКМ (БМП, БТР, МТ-ЛБ),

навіть при максимальній точності розрахунків кількість циклів обчислення не перевищує 1000. У зв'язку з цим використання математичної моделі польоту кулі, що спирається на чисельне розв'язання диференціальних рівнянь, не призводить до істотних витрат часу. На сучасному персональному комп'ютері із швидкістю обчислення 50 GFLOPS витрати часу на розрахунок складають приблизно 10–30 хвилин на одну машину.

У той же час, необхідність урахування геометрії машини і рельєфу місцевості, які в загальному випадку є досить складними, з довільною кількістю дрібних геометричних підоб'єктів, призвела до опису рельєфу місцевості як набору невеликих геометричних примітивів (елементів). Загальна точність розв'язку залежить зокрема і від рівня дискретизації, тобто розміру елементів. Якщо врахувати максимальну дальність польоту кулі калібром 14.5 мм (3–5 км) і максимальну роздільну здатність супутникових знімків в плані 18×18 м, виходить 10–60 тис. елементів на опис місцевості навколо машини. Таким чином, потрібна кількість розрахунків вже перевищує за кількістю циклів методу Шаталова О.Є. як мінімум на один порядок.

Враховуючи ще елементи машини,

$$N_{Ц} = N_v \cdot N_r, \quad 2)$$

де $N_{Ц}$ – кількість циклів;

N_v – кількість елементів машини;

N_r – кількість елементів карти.

Загальна кількість варіюється від 0,1 до 1 млн. циклів обчислення. Якщо при цьому врахувати необхідність проведення додаткових типів обчислень, відсутніх у методиці Шаталова О.Є., для нових критеріїв захищеності, що розроблені у цій роботі, то стає зрозуміло, що час розрахунку одного випадку для всієї машини з використанням алгоритмів та математичних моделей, які викладені в попередніх роботах, може займати щонайменше 16 годин, а в цілому – більше 100–200 годин, що є неприйнятним і вимагає спрощення найбільш ресурсомістких математичних моделей та алгоритмів, відмова від використання неактуальних моделей та алгоритмів та модифікація інших. Найбільш ресурсомісткими в роботах Шаталова О.Є. та Литвиненка О.В. є математичні моделі та алгоритми обчислення параметрів польоту кулі та обчислення параметрів бронезахищеності.

У зв'язку з цим, відповідно до чинних вимог, математична модель побудови 3D ТД потребує модифікації та удосконалення. Так, наприклад, у зв'язку з модифікацією мети та завдання в рамках цієї роботи втратили актуальність і *не будуть* використовуватися методики і моделі: побудови окремих пелюсток, що позначають небезпечну зону для конкретної бронеплити корпусу; об'єднання пелюсток від окремих бронеплит в

єдину діаграму захищеності БМ ЛКМ; математична модель чисельного процесу бронепробиття, що заснована на модифікації методу скінченних елементів, спрямованої на моделювання процесів, що проходять з великим рівнем швидкостей і нелінійності деформацій взаємодіючих тіл.

При цьому інші елементи комплексної математичної моделі потребують вдосконалення: список узагальнених параметрів; математична модель розрахунку параметрів польоту кулі; математична модель опису місцевості; математична модель опису геометрії корпусу БМ ЛКМ; математична модель визначення умов зустрічі та пробиття кулі з елементами бронювання.

Також варто зазначити, що необхідно повністю переглянути процес обчислення комплексних параметрів бронезахищеності, у зв'язку з принциповою зміною критеріїв захищеності. І, як наслідок, алгоритм обчислення компонент захищеності також потребує суттєвої модифікації.

Зважаючи на те, що в рамках здійснюваного дослідження необхідно розрахувати не *гіпотетичну поверхню рівня бронезахищеності*, що не залежить ні від геометрії бронеплити, ні від рельєфу місцевості, а провести *комплексну оцінку БМ ЛКМ* з урахуванням геометрії її корпусу, наближеної до реальної, замість циклів за напрямком прильоту кулі для кожної пелюстки розрахунки відбуваються в ході циклів перебору елементів, що описують геометрію корпусу БМ ЛКМ і елементів, які описують місцевість. При цьому, на відміну від робіт Шаталова О.Є. та Литвиненка О.В., враховується реальний стан і орієнтація БМ ЛКМ на місцевості. Самі ж результати надаються не у вигляді геометрії поверхні бронезахищеності, а у вигляді чисельного розподілу значень контрольних розрахункових параметрів за елементами місцевості, який в окремому випадку може бути представлений у вигляді пласкої діаграми, що за своїм виглядом наближена до класичної тактичної діаграми.

Таким чином комплексна математична модель, що дасть можливість коректно оцінювати захищеність із урахуванням сучасних реалій ведення бойових дій, має складатися з наступних підмоделей: модель опису геометрії БМ ЛКМ; модель опису рельєфу місцевості; моделі обробки даних; модель обчислення параметрів зовнішньої балістики (модель кулі); модель обчислення параметрів бронепробиття (модель бронювання); модель побудови 3D ТД; модель обчислення параметрів захищеності (модель ураження).

Підмодель обробки даних повинна мати наступні складові:

- моделі роботи з векторами: обчислення векторів; перенос векторів; поворот векторів; поворот векторів до нової локальної системи координат (ЛСК); обчислення кутів між

векторами;

- моделі роботи з системами координат: поворот ЛСК;

- моделі роботи з елементами: обчислення центру елемента; обчислення нормалі до елемента;

- обчислення проміжних параметрів: інтерполяційні функції (лінійна; поліноміальна); обчислення коефіцієнтів інтерполяційного поліному методом найменших квадратів; методи усереднення (середнє арифметичне та середнє геометричне);

- конвертація географічних координат: кути – десяткові кути; дистанція – кут; координати – елемент.

Якщо обчислення параметрів польоту кулі та бронепробиття здійснювати на основі інтерполяційних поліномів, це дасть змогу не тільки суттєво прискорити розрахунки порівняно з попередніми методиками без суттєвої втрати точності, але й спростити математичну модель і структуру бази даних.

На основі перелічених критеріїв будується структурно-логічна схема розрахунку параметрів захищеності, алгоритм розрахунку параметрів захищеності та структура бази даних спеціалізованого програмно-модельного комплексу.

Опис моделі. Як раніше зазначалося в роботах [1–3, 5], всі існуючі варіанти методик оцінки захищеності не враховують місцевість взагалі, а БМ ЛКМ розглядають як матеріальну точку з набором характеристик, що відповідають за опис бронеплит корпусу. Як характеристики бронеплит виступають: матеріал бронеплити, товщина, орієнтація в просторі щодо системи координат машини. У зв'язку з тим, що побудова рельєфу місцевості і геометрії бронелістів БМ ЛКМ є в загальному випадку досить складною (приклад такої геометрії показаний на рис. 1, 2), виникає питання щодо принципу її опису.



a



б

Рисунок 1 – Геометрія місцевості:
а – карта висот України; б – яр

Незважаючи на те, що властивості бронекорпусу можна вважати стабільними і незмінними, а рельєф місцевості майже незмінним (порівняно з дистанцією польоту кулі), характеристики пробиття є варіюваними по площі, у зв'язку з тим, що при стрільбі існує ймовірність здійснення пострілу:

- з однієї точки простору по різних точкам БМ ЛКМ;

- з різних точок простору в одну й ту ж точку БМ ЛКМ.



Рисунок 2 – Загальний вигляд геометрії БМ ЛКМ БТР–80

У кожному з таких випадків будуть відрізнятися значення кута зустрічі і швидкості прильоту кулі. Особливо при врахуванні орієнтації корпусу БМ ЛКМ у просторі, відмінної від горизонтальної, та різниці висот між положенням точки простору і точок БМ ЛКМ.

У зв'язку із складною геометрією бронеліста і рельєфу місцевості й великої кількості контрольних величин – задача виведення аналітичної системи рівнянь для кожного бронеелемента недоцільне. Більш раціональним постає питання дискретного опису геометрії за допомогою елементарних об'єктів. Подібні підходи, крім іншого, володіють двома істотними перевагами. Перша – такий підхід використовується при розв'язанні задач обчислювальної механіки та газогідродинаміки, і дає можливість вивчити вкрай складні фізичні процеси, що відбуваються в дуже складних з геометричної точки зору об'єктах [6–13]. Другою перевагою можна назвати наявність відпрацьованих методик та існуючих програмних реалізацій, які можуть істотно спростити процес розв'язання завдання за рахунок наявності інструментів створення геометрії, розробки дискретних моделей і візуалізації отриманих результатів [14–19]. Однак при цьому слід зазначити, що все інше – математичну модель, її програмну реалізацію необхідно розробляти самостійно і стикувати з існуючим програмним забезпеченням через наявні в них прикладні програмні інтерфейси (з англ. Application Programming Interface, скорочено API).

Математичне моделювання геометрії корпусу БМ ЛКМ. Для задачі опису геометрії

бронелистів з перерахованих раніше типів найбільш підходять «пластинчасто-оболонкові» елементи. За формою вони бувають три- або чотирикутні (за термінологією МСЕ – три-, чотирикутні). Додатково такі елементи містять інформацію про матеріал та товщину елемента. Це створює можливість повністю описати геометрію корпусу будь-якої БМ ЛКМ з досить високою точністю. Єдиною проблемою (з точки зору точності) можуть бути об'єкти криволінійної форми (наприклад, гарматні башти, рис. 3).



Рисунок 3 – Геометрія башт:
а – БТР-80; б – БМП-2

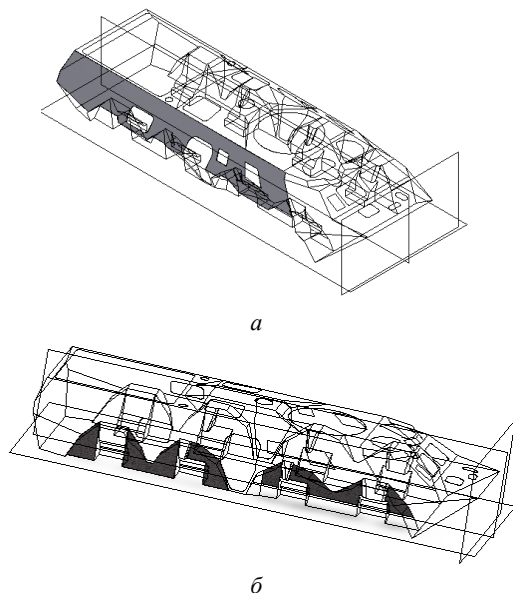


Рис. 4 – Геометрія бортів БТР-80:
а – борт верхньої півсфери; б – колісні арки

Проте, такі об'єкти теж можуть бути описані як набір елементів трикутної чи чотирикутної форми. В цілому, геометрія будь-якої БМ ЛКМ є дуже складною. Як приклад на рис. 4 представлена геометрія бортів БТР-80, що є наближеною до

реальної. У всіх існуючих методиках подібна геометрія ігнорується, а бронелісти описуються як плоскі пластини з такими ж кутами нахилу, але розміщені у центрі СК.

Через те, що відстані, з яких можливе ураження БМ ЛКМ, які стоять на озброєнні ЗС України, вимірюються у сотнях метрів та кілометрах, не є доцільним будувати геометрію корпусу з такими дрібними деталями [13, 16, 18–26]. Крім того, кількість елементів машини лінійно впливає на кількість циклів обчислення та час розрахунку, тож замість максимально точного опису геометрії корпусу більш доцільним є спрощення геометрії корпусу та моделювання його як набору осереднених елементів, що описують основні характерні межі машини, які не мають дрібних елементів. На рис. 5 зображено приклад розрахункової моделі, побудованої для БТР-80 та вже розбитої на 120 елементів.

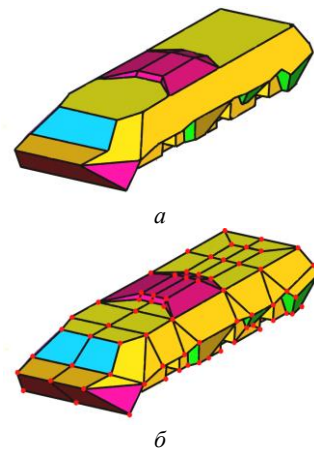


Рис. 5 – Геометрія корпусу БТР-80:
а – спрощена геометрія; б – розбита на елементи

Математична модель БМ ЛКМ складається з двох підмоделей – геометричної та дискретної (сіткової, ґратчастої). Геометрична модель корпусу складається з набору тривимірних плоских поверхонь, обмежених набором прямолінійних і криволінійних кромки, у роботах Купріненко О. М., а також [16, 19, 20]. У загальному випадку кромки можуть бути або вільними – в цьому випадку вони описують геометрію отворів у бронепластинах, або належати кільком поверхням одночасно (зазвичай двом), в цьому випадку кромка найчастіше є зварним швом між різними «проекціями» (бронепластинами). Місця з'єднань повинні проходити через набір вершин.

У кінцевому результаті дискретна модель корпусу БМ ЛКМ виглядає як набір вузлів і елементів (кожен елемент складається з 3-х або 4-х вузлів) [2, 8–12]. Нумерація вузлів записується таким чином, щоб нормаль елемента співпадала з нормаллю поверхні бронеплити і була спрямована назовні машини:

$$N_{v_i}(x_i, y_i, z_i), i = 1..n, \quad (3)$$

де N_{v_i} – координати i -го вузла у локальній системі координат машини;

$$E_{v_j}(N_{1_j}, N_{2_j}, N_{3_j}, N_{4_j}), j = 1..m, \quad (4)$$

де E_{v_i} – вузли j -го елемента, що йому належать у локальній системі координат машини (індекс v в позначенні вузлів і елементів позначає – vehicle (машина) і служить для того, щоб їх можна було відрізнити від вузлів та елементів карти місцевості).

Вузли лежать на кромках і поверхні геометричних елементів машини. Елементи, крім інформації про належні їм вузли, містять також ряд допоміжної інформації. Усі дані, що пов'язані з елементами – позначені індексами j . Усі дані, що пов'язані з конструктивними властивостями – позначені індексом k , проте кожен з них може варіюватися в окремих межах. Для поточної роботи методики потрібна наступна додаткова інформація, яка позначається як KP (конструктивний параметр):

- KP_{1j} – номер бронеплити (проекції) – NAp_k (Number of Armor Panel), $k=1..K$ (кількість бронепанелей);

- KP_{2j} – матеріали бронепластин чи додаткового бронювання – MA_k – Material Armor, $k=1..G$ (кількість бронематеріалів відповідно до загальної бази матеріалів).

Зазвичай для корпусу використовується один матеріал для всіх проекцій, проте в деяких випадках це може бути декілька матеріалів. Наприклад в БМП-1 та БМП-2 використовується бронеалюміній та бронесталь, у БМП-3 – бронеалюміній АБТ-101, а у сучасних машинах – бронесталь та конструкційна сталь. Матеріалами додаткового бронювання можуть бути: сталевий лист, броньова плита, сталева решітка, ящик з піском, ящик з гравієм та інші:

Tb_{kj} – початкова (вихідна) товщина кожного з матеріалів бронепластин чи додаткового бронювання - (base Thickness);

T_{kj} – поточна товщина бронепластили кожного з матеріалів бронювання чи додаткового бронювання (Thickness).

Таким чином, інформація для опису машини буде виглядати наступним чином:

$$N_{v_i}(x_i, y_i, z_i), i = 1..n;$$

$$\{N_j\} = \{N_{1_j}, N_{2_j}, N_{3_j}, N_{4_j}\} j = 1..m;$$

$$NAp_k, k = 1..K; MAp_k, k = 1..G; KP_{1j} = NAp_{kj};$$

$$\{KP_{2j}\} = \{MA_{1j}, MA_{2j}, \dots, MA_{kj}\}, \quad (5)$$

$$\{Tb_{kj}\} = \{Tb_{1j}, Tb_{2j}, \dots, Tb_{kj}\};$$

$$\{T_{kj}\} = \{T_{1j}, T_{2j}, \dots, T_{kj}\};$$

$$E_{v_j}(\{N_j\}, KP_{1j}, \{KP_{2j}\}, \{Tb_{kj}\}, \{T_{kj}\}), j = 1..m.$$

Це дозволить описати конструкцію та геометрію бронекорпусу із заданою точністю. Для того, щоб автоматизувати обчислення тактичних діаграм, потрібно створити базу даних по машинах, яка буде зберігати всю потрібну інформацію. Через те, що в рамках поточного дослідження може виникнути потреба аналізувати вплив проектних чи експлуатаційних модифікацій, для кожної машини та її модифікації потрібно буде створювати окремий запис у базі даних. Для спрощення задачі аналізу, крім інформації щодо параметрів бронекорпусу, необхідно включити додатково:

- шифр машини та її модифікації;
- метадані: назва та тип машини; ТТХ машини; шифр оригіналу (шифр, яким закодована оригінальна конструкція машини без модифікацій); належність бронеплит до відповідних проекцій та «півсфер» (верхня/нижня, передня/бокова/задня).

Структура збереження інформації щодо БМ ЛКМ зображена на рис. 6.

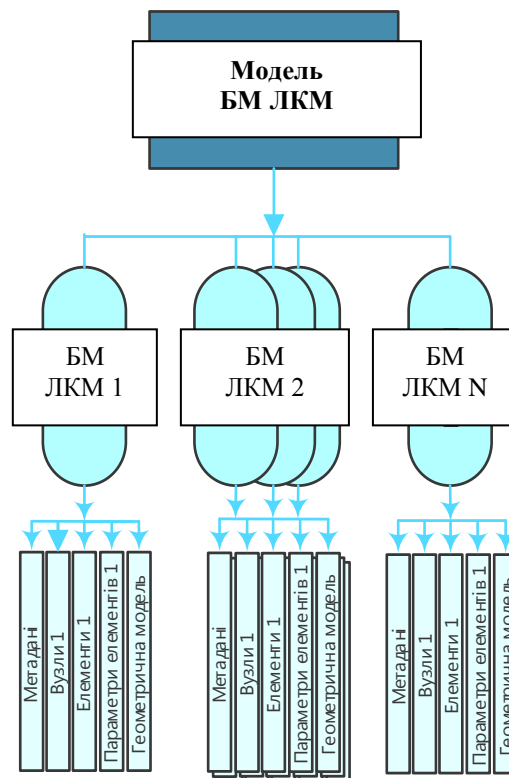


Рисунок 6 – Структура даних БМ ЛКВ

Математичне моделювання рельєфу місцевості. Аналогічно з математичними моделями БМ ЛКМ, для опису рельєфу земної поверхні (рис. 7), на основі якої буде здійснюватись розрахунок можливості ураження БМ ЛКМ, має сенс використовувати трикутні або чотирикутні елементи

$$N_i(x_i, y_i, z_i), i = 1..n; \quad (6)$$

$$E_{t_j}(N_{1_j}, N_{2_j}, N_{3_j}, N_{4_j}), j = 1..m. \quad (7)$$

Проте, також слід врахувати, що для опису місцевості зазвичай використовують звичайні прямокутні карти, які є розгорткою земної поверхні на площину. Вся інша інформація, включаючи висоти, наноситься на прямокутну в плані сітку координат. Таким чином, для побудови рельєфу земної поверхні доцільно використовувати рівномірну і структуровану в плані (XOY) сітку. При цьому за рахунок координати Z буде отриманий рельєф, який наближений до земної поверхні. З огляду на те, що максимальна дальність польоту куль не перевищує 5 км, в першому наближенні викривленням поверхні землі для кращої відповідності її вихідній формі геоїда обертання можна знехтувати. Підсумкова карта в загальному випадку буде мати вигляд, близький до зображення на рис. 8 (вигляд з поверхні карти).

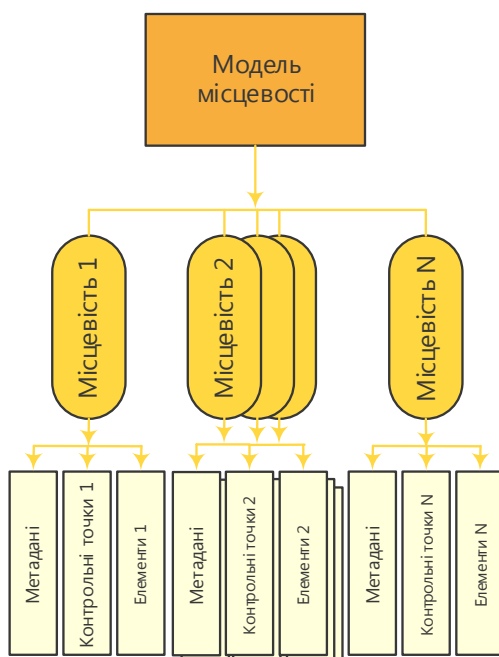


Рисунок 7 – Структура даних рельєфу місцевості

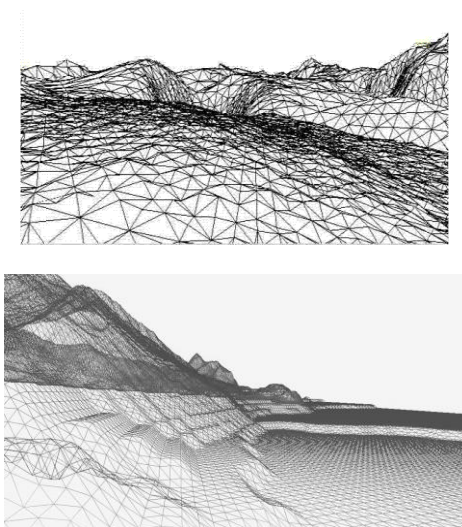


Рисунок 8 – Сіткове подання місцевості, вигляд із поверхні

Вузли й елементи місцевості містять в назві індекс t (*terrain* – місцевість). Аналогічно з елементами, що описують геометрію БМ ЛКВ, кожен окремий елемент може містити додаткову інформацію. В рамках поточного дисертаційного дослідження така інформація ще не береться до уваги. На основі координат вузлів в ході роботи розраховуються наступні дані: центр елемента, нормаль (завжди звернена в повітря), середня висота по елементу. У той же час слід зазначити, що на відміну від вузлів БМ ЛКМ, які лежать точно на її поверхнях, вузли місцевості лише приблизно збігаються з реальною геометрією земної поверхні, і в залежності від рівня дискретизації, джерела інформації для опису земної поверхні і способу відновлення похибка висоти в конкретних вузлах може варіюватися, а рельєф – відрізнятися від реального [27–30]. Відповідно, напрямок нормалі також може варіюватися в певних межах, проте на поточний момент урахування такого фактору дуже ускладнить алгоритм розрахунку. Через те, що за оцінками [27–30] різниця в більшості випадків є незначною (див. далі), нехтування таким фактором не вносить значної похибки.

Як уже зазначалося раніше, інформація про земну поверхню може бути отримана з різних джерел, наприклад, з реальної ГІС [27–30], що використовується в ході планування військових дій. Також геометрія поверхні може бути створена в генераторі ландшафтів безпосередньо під завдання аналізу рівня захищеності на місцевості конкретного типу. Але в якості найбільш загального способу рекомендується використовувати дані супутникового картографування [30].

При використанні супутникових даних береться до уваги наступна інформація:

- растрове зображення розподілу висот на місцевості (довільної здатності) розміром N_p на M_p ;
- габаритні розміри ділянки місцевості, в метрах N_m на M_m ;
- географічні координати двох протилежних по діагоналі кутів місцевості;
- мінімальна і максимальна висота на ділянці H_{\min} , H_{\max} .

Перш ніж перейти безпосередньо до обчислень, необхідно надати деякі пояснення. По-перше, растрове зображення, збережене при супутниковому картографуванні, містить інформацію у вигляді світлової інтенсивності в градаціях сірого (рис. 9), де абсолютно чорним позначені висоти, що збігаються з мінімальною висотою, а абсолютно білим – з максимальною висотою на ділянці. Всього використовується 256 градацій сірого (0 – абсолютно чорний – найнижча точка, 255 – абсолютно білий – найвища точка). При цьому висоти всіх точок, що потрапляють в площу одного пікселя супутникового знімка, осереднюються і записується тільки середнє значення. Розміри

пікселів можна вважати постійними за габаритами в межах всього знімка, якщо він не перевищує за розміром 25 км за стороною.



Рисунок 9 – Приклад карти висот

Таким чином, з урахуванням розмірів растрового зображення і габаритів місцевості розраховується:

- загальна кількість елементів: $N_p \cdot N_m$;
- повна кількість вузлів місцевості: $(N_p + 1) \cdot (N_m + 1)$;
- розмір елемента в плані X0Y: $(N_m / N_p)(M_m / M_p)$;
- крок по висоті: $H_s = (H_{max} - H_{min}) / 256$;
- середня висота на площі пікселя: $H_i = H_{min} + N_i h_i - H_s$ ($N_i h_i$ – інтенсивність сірого кольору в даному пікселі).

Звісно, такий підхід має обмеження і похибки. Однак похибка обчислення висоти становить менше 0.4%, причому не від максимальної висоти, а від діапазону висот. Тобто можна вважати запропонований підхід досить точним.

Далі, на основі інформації про середню площу можна побудувати досить докладну карту місцевості, проте для поточної методики такий результат ще не є прийнятним через постійну висоту в межах всього елемента і стрибками на стику елементів (рис. 10) [31, 32].

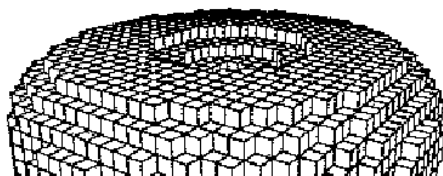


Рисунок 10 – Ступінчаста форма опису геометрії

Крім цього, це ускладнює обчислення нормалі елемента землі, що є досить необхідним для низки подальших розрахунків. Таким чином, крім середньої висоти, необхідно отримати значення висот у кожному із вузлів карти.

Найпростішим варіантом є обчислення висоти у вузлі як середнього значення на основі даних про середні висоти в елементах, що містять цей вузол. Отримана таким чином поверхня буде дещо відрізнятися від реальної і буде трохи нижче неї, проте вона буде повторювати характер поведінки, близький до реальної земної поверхні. На рис. 11 зображено оригінальну функцію $\sin(x)$, «stepped» – варіант функції, що була осереднена на

проміжках, «linear» – відновлене значення функції. Видно, що за значенням вона має відмінності, проте за характером поведінки – ні [32].

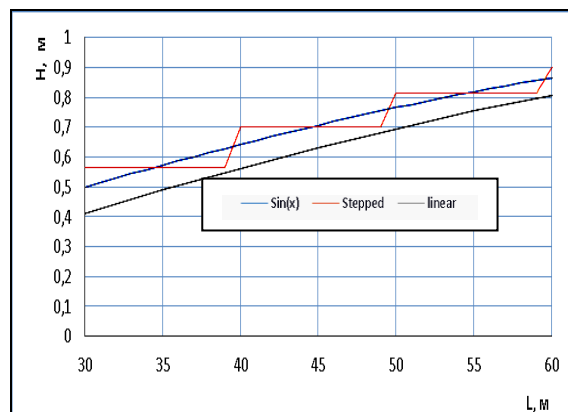


Рисунок 11 – Варіанти інтерполяцій

У різних випадках доцільно використовувати різні методики. Також, за необхідності, для оцінки захищеності можна використовувати одночасно геометрії місцевості, одержані декількома способами і проводячи порівняння отриманих результатів.

При необхідності отримання поверхні, максимально наближеної до реальності, можна скористатися методами екстраполяції та обчислення значень висот у вузлах, використовуючи метод найменших квадратів, порівнюючи вихідне середнє значення висоти (отримане на основі супутникових даних) і середніх значень висот за елементами, отриманих у ході екстраполяції.

Однак з урахуванням того, що вихідна земна поверхня є випадковою величиною, яка змінюється з ходом часу в залежності від безлічі факторів, і це особливо помітно в місцях ведення бойових дій, то навіть якщо вийде відновити поверхню максимально близьку до того, що було при супутниковому картографуванні, така поверхня може відрізнятися від тієї, що зараз є в реальному часі. Таким чином, більш раціонально не уточнювати методики апроксимації земної поверхні, а додати можливість розрахунку з урахуванням імовірнісних характеристик, які описують можливі коливання вихідних величин.

Моделі обробки даних. Як було зазначено вище, підмодель обробки даних повинна мати низку складових. Розглянемо кожну з них.

Моделі роботи з векторами. Для роботи алгоритму методики дуже часто потрібно проводити операції з векторами [9, 31, 33]. Однією з найпоширеніших операцій є обчислення параметрів питомого вектору (\vec{r}) на основі вхідних координат двох точок, що відповідають початку (т. А) та кінцю (т. В) вектора \vec{r} . Вхідні дані точок: $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$ відповідно. Тоді

$$\vec{r}(r_x, r_y, r_z) = (x_A - x_B, y_A - y_B, z_A - z_B). \quad (8)$$

Не менш важливими є операції трансформації – переносу та повороту векторів [31, 33]. При переносі вхідними даними є вектор $\vec{a}(x_a, y_a, z_a)$ та вектор $\vec{b}(x_b, y_b, z_b)$, питома функція – вектор \vec{r} :

$$\vec{r}(x_r, y_r, z_r) = (x_a + x_b, y_a + y_b, z_a + z_b). \quad (9)$$

Під час повороту навколо однієї з осей для кожної з них сформульовані окремі матриці поворотів M_x, M_y, M_z :

$$M_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}; M_y(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix};$$

$$M_z(\vartheta) = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & 0 \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

де $\varphi, \gamma, \vartheta$ – кути повороту навколо осей системи координат OX, OY, OZ відповідно [31].

Матриця повороту навколо довільної осі, заданої вектором v , на кут θ виглядає наступним чином [31]:

$$M(\vec{v}, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)x^2 & (1 - \cos \theta)xy - (\sin \theta)z & (1 - \cos \theta)xz + (\sin \theta)y \\ (1 - \cos \theta)yx + (\sin \theta)z & \cos \theta + (1 - \cos \theta)y^2 & (1 - \cos \theta)yz - (\sin \theta)x \\ (1 - \cos \theta)zx - (\sin \theta)y & (1 - \cos \theta)zy + (\sin \theta)x & \cos \theta + (1 - \cos \theta)z^2 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Питомий вектор отримується у результаті перемноження відповідної матриці M на початковий вектор \vec{a} :

$$\vec{r} = [M] \cdot \vec{a}. \quad (12)$$

Для обчислення матриці трансформації вектору з однієї системи координат до нової ЛСК можна виконати поетапне перетворення за рахунок відповідних переносів та поворотів.

Для розв'язання задач оцінки швидкості бронепробиття необхідно знати значення кута зустрічі між кулею та нормаллю бронеплити. Для цього необхідно провести скалярне множення цих векторів. Вхідними є дані про обидва вектори:

$$a(x_a, y_a, z_a), b(x_b, y_b, z_b),$$

$$\cos \alpha = A = \frac{x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} \times \sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2}}, \quad (13)$$

$$\alpha = \arccos(A).$$

Таким чином, залишається лише питання

щодо обчислення координат точок та векторів нормалі, які будуть подані на вхід до вищеописаних рівнянь та процедур. Через це необхідно записати рівняння обчислення координат центру. Визначим центр як O_j , який повинен відповідати елементу E_j . Таким чином, для елемента E_j (див. формули (4) або (7)):

$$E_j(N_{1j}, N_{2j}, N_{3j}, N_{4j}), j = 1..m, \quad (14)$$

радіус вектор \vec{O}_j з точки 0 (початок СК) до точки O_j обчислюється наступним чином:

$$\vec{O}_j = \frac{(\vec{N}_{1j} + \vec{N}_{2j} + \vec{N}_{3j} + \vec{N}_{4j})}{4}$$

або

$$\vec{O}_j = \frac{(\vec{N}_{1j} + \vec{N}_{2j} + \vec{N}_{3j})}{3}. \quad (15)$$

Для варіанту, коли у елемента кількість вузлів дорівнює 4 та 3 відповідно до робіт Шаталова О.Є. [31, 33], для обчислення вектору нормалі $t(k, l, m)$ до площини, заданої трьома точками А, В і С з координатами $A(x_a, y_a, z_a)$, $B(x_b, y_b, z_b)$, $C(x_c, y_c, z_c)$, використаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} kx_a + ly_a + mz_a + 1 = 0; \\ kx_b + ly_b + mz_b + 1 = 0; \\ kx_c + ly_c + mz_c + 1 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Беручи до уваги, що, крім елементів з трьома вузлами, для опису геометрії машини та рельєфу місцевості використовуються чотиривузлові елементи, які можуть бути за формою дещо відмінними від площини, процедура обчислення вектору нормалі буде виглядати наступним чином:

• для тривузлового елемента E_j :

$$A_j = N_{1j}, B_j = N_{2j}, C_j = N_{2j},$$

1) питома вектор $t_j(k_j, l_j, m_j)$;

2) система рівнянь:

$$\begin{cases} k_j x_a + l_j y_a + m_j z_a + 1 = 0 \\ k_j x_b + l_j y_b + m_j z_b + 1 = 0. \\ k_j x_c + l_j y_c + m_j z_c + 1 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

• для чотиривузлового елемента E_j :

1. Знаходимо координати центру елемента O_j .

2. Знаходимо послідовно нормаль для 4-х площ, що створені на наборах точок: (O_j, N_{1j}, N_{2j}) , (O_j, N_{2j}, N_{3j}) , (O_j, N_{3j}, N_{4j}) ,

(O_j, N_{4j}, N_{1j}) .

3. Приймаємо т. $A_{ji} = O_j$, $B_{ji} = N_{ij}$, $C_{ji} = N(i+1)$, $j, i = 1..4$ для $i = 4 \cdot i + 1$ приймаємо за одиницю.

4. Для набору точок A_{ji}, B_{ji}, C_{ji} приймаємо координати $A_{ji}(x_a, y_a, z_a)$, $B_{ji}(x_b, y_b, z_b)$, $C_{ji}(x_c, y_c, z_c)$ згідно п.3.

5. Координати нормалі обчислюємо за системою рівнянь:

$$t_{ji}(k_{ji}, l_{ji}, m_{ji}) = \begin{cases} k_{ji}x_a + l_{ji}y_a + m_{ji}z_a + 1 = 0; \\ k_{ji}x_b + l_{ji}y_b + m_{ji}z_b + 1 = 0; \\ k_{ji}x_c + l_{ji}y_c + m_{ji}z_c + 1 = 0; \end{cases} \quad (18)$$

$$t_j = \frac{1}{4} \sum_1^4 t_{ji}.$$

Як було зазначено раніше, при роботі алгоритму для обчислення параметрів швидкості польоту кулі та параметрів бронепробиття виникає проблема, яка полягає в тому, що обчислення таких параметрів стандартними методиками (наприклад, такими, що наведені у роботі Шаталова О.Є.: пряме інтегрування для польоту кулі чи використання методу скінченних елементів для бронепробиття) є надто коштовним у плані необхідного часу та ресурсів. Використання методик, що основані на статистичних даних, отриманих експериментальним шляхом (в обох випадках – і для натурних, і для розрахункових експериментів) має проблему, пов'язану з тим, що таким чином можна отримати лише окремі «точки», проте є наявна необхідність у використанні безперервних функцій, заданих аналітичним чином, за допомогою рівнянь, що не потребують значних ресурсів для обчислення. У рамках цієї методики пропонується створювати інтерполяційні та екстраполяційні функції на основі наявних точок. Серед інтерполяційних функцій, що мають найбільшу універсальність та найменші потреби в ресурсах, слід визначити лінійну та поліноміальну інтерполяцію. З урахуванням якості поведінки процесів, які потрібно описати за допомогою інтерполяції, а саме: гладкість та монотонність процесу, з мінімальною різницею у кривизні, найбільш доцільним є використання поліномів 2–4 порядку. Через те, що кількість точок, на основі яких потрібно здійснити інтерполяцію, варіюється від 2 до 20, для найбільшої точності слід проводити обчислення коефіцієнтів інтерполяційного поліному за допомогою методу найменших квадратів [9, 31]:

• питома функція виду $f(x) = \sum_{i=0}^N a_i x^i$ N -ступінь питомого поліному (як було вказано раніше, $N \leq 4$);

- питомими є коефіцієнти $a_0, a_1, a_i, \dots, a_N$;
- вихідний набір точок: $x_1, y_1; \dots, x_i, y_i; \dots, x_N, y_N$, де n – кількість точок в наборі;
- критерій якості:

$$S = \sum_i^n (f(x_i) - y_i)^2 \rightarrow \min.$$

Під час первинної побудови карти на основі даних супутникових знімків висот, як уже зазначалось, можна використовувати методи осереднення: середньоарифметичне, метод квадратів (середньоквадратичне), за максимумом, за мінімумом, середньо-гармонічне, середньо-геометричне. Серед них, як показало попереднє дослідження [34], найбільш доцільно використовувати:

- середнє арифметичне:

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n z_i = \frac{1}{n} (z_1 + \dots + z_n);$$

- середньоквадратичне:

$$z = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2}{n}}.$$

У нашому випадку $n = 4$ для більшості вузлів та 2 – для вузлів, які належать межі області.

Розробка моделі польоту кулі. Аналіз таблиць стрільб і траєкторій польоту, промодельованих для різних випадків [4], показує, що для більшості дистанцій стрільби аж до 2 км відхилення кулі від вектора, що з'єднує точку пострілу і ціль (кут падіння кулі) відрізняється не більше 4 градусів.

Слід зазначити, що всі параметри польоту вже давно зібрані в настанови зі стрільби, з усіма контрольними значеннями і поправками віднормовані відносно дистанції до цілі. При цьому всі необхідні контрольні величини (швидкість кулі, енергія кулі, кут падіння тощо) є досить плавними залежностями, що можуть бути добре описані за допомогою ступеневих поліномів.

Таким чином, як математичну модель польоту кулі і обчислення необхідних контрольних параметрів, як зазначалось вище, можна використовувати поліноми загального вигляду:

$$F(l) = \sum_{n=0}^N p_n l^n, \quad (19)$$

де $F(l)$ – функція зміни контрольної величини від дистанції до цілі;

l – дистанція до цілі;

n – поточне значення ступеневого полінома;

N – максимальне значення ступеню полінома (зазвичай $N = 2..4$);

p_n – коефіцієнт при відповідному за номером доданку полінома.

Коефіцієнти полінома обчислюються на основі даних з таблиць стрільб з використанням методу найменших квадратів.

Приклади основних функцій розподілу: швидкість кулі V_k (м/с), енергія кулі E_k (Дж), кут зустрічі θ_c (хв.) наведені нижче:

$$V_k(x) = 2e^{-7} \cdot x^3 + 0,0004 \cdot x^2 - 0,995 \cdot x + 716,77; \quad (20)$$

$$E_k(x) = -2e^{-7} \cdot x^3 + 0,0006 \cdot x^2 - 0,5568 \cdot x + 206,96; \quad (21)$$

$$\theta_c(x) = 7e^{-8} \cdot x^3 - e^{-5} \cdot x^2 + 0,0497 \cdot x + 0,7677. \quad (22)$$

Порівняння графіків, що були отримані на основі точок, наявних у настанові та інтерполяції, наведені на рис. 12–14.

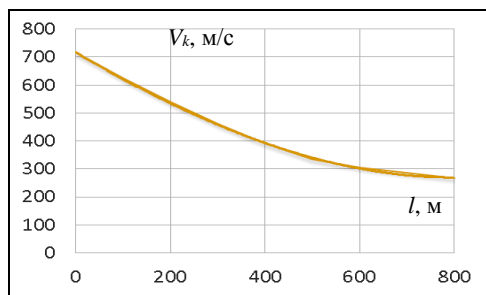


Рисунок 12 – Залежність падіння швидкості кулі від дальності

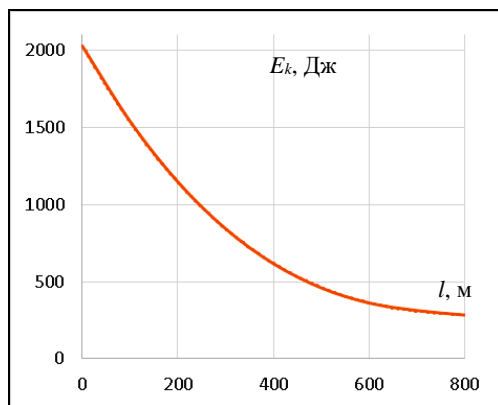


Рисунок 13 – Залежність падіння енергії кулі від дальності

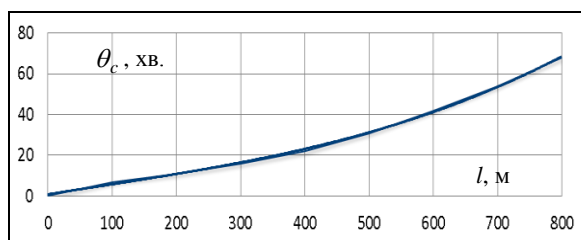


Рисунок 14 – Залежність збільшення кута падіння кулі від дальності

Таким чином, запропонована математична модель спирається на дані, отримані з практичного досвіду, і при цьому дозволяє істотно прискорити процес обчислення.

Методики визначення кута зустрічі з елементами броні і параметрів захищеності з урахуванням додаткового бронювання. За аналогією з методикою, викладеною у роботах Шаталова О.Є., у поточній методиці буде використовуватися кілька різних систем координат. Як глобальна система координат виступає система координат, що поєднана з тією, у якій описаний рельєф місцевості (рис. 15).

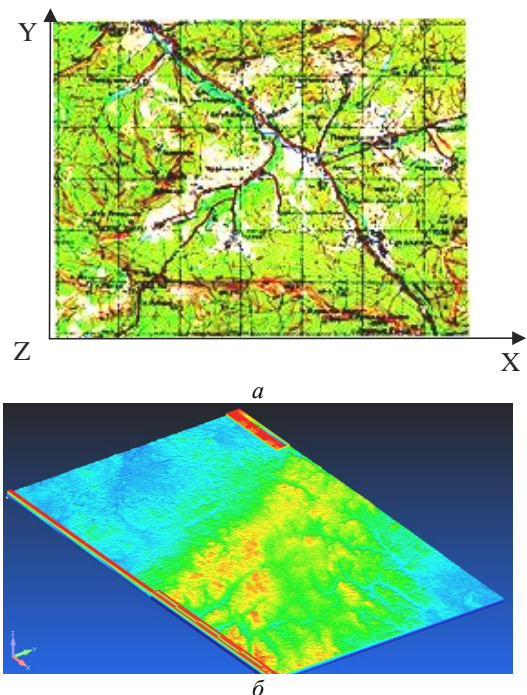


Рисунок 15 – Декартова (глобальна) система координат

Вісь OX колінеарна з лінією паралелі, вісь OY – з меридіанами. З огляду розглянутих масштабів місцевості криволінійність земної поверхні нехтуємо. Площина XOY співпадає з нульовою висотою на картах, глобусах тощо. Вісь OZ перпендикулярна площині XOY і спрямована в «повітря». Залежно від розв'язуваних завдань центр глобальної системи координат може лежати в одному з габаритних кутів місцевості або в її центрі. За замовчуванням початок системи координат розташуємо в лівому нижньому куті, вісь OX направимо із заходу на схід, OY – з півдня на північ. Крім глобальної системи координат (ГСК) є кілька локальних:

- локальна система координат БМ ЛКМ (в якій описана її дискретна геометрія), рис. 16;
- ЛСК1 – локальна система координат в точці місцевості, в якій буде встановлена машина. Центр СК співпадає з точкою на місцевості, орієнтація ЛСК – з ГСК, рис. 17, а;
- ЛСК2 – аналогічна по положенню з ЛСК1, вісь OZ співпадає з глобальною, вісь OX – с

необхідним напрямом осі OX машини, рис. 17, б;

- ЛСК3 – положення ЦСК співпадає з ЛСК2 і ЛСК1, вісь OZ співпадає з вектором нормалі в даній точці місцевості, XOY – компланарна поточному елементу, вісь OX – в проекції на XOY ГСК співпадає з віссю OX ЛСК2, рис. 17, в.

Відповідно, у створеному математичному апараті послідовність обчислення координат точок БМ ЛКМ і нормалей до елементів в ГСК буде враховувати не тільки поворот систем, але і трансляцію, як зазначено вище у формулах (8)–(11).

Процедура розрахунку компонент бронепробиття:

- обчислення координат і нормалей бронеелемента,
- обчислення позиції стрільця (координата + висота позиції стрільця),

- обчислення дальності та параметрів польоту кулі (швидкості прильоту та енергії),

- обчислення кута зустрічі з бронеелементом,

- обчислення параметрів бронепробиття основного бронювання з урахуванням кута зустрічі та товщини (швидкість, необхідна для пробиття),

- обчислення параметрів бронепробиття додаткового бронювання з урахуванням кута зустрічі та товщини (швидкість, що необхідна для пробиття),

- обчислення інтегральних параметрів бронепробиття (сума швидкостей),

- порівняння швидкості прильоту та сумарної швидкості необхідної для пробиття.

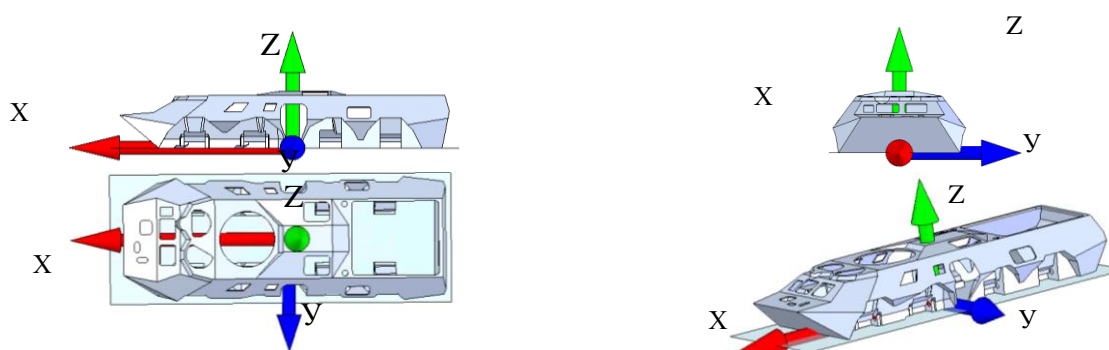


Рисунок 16 – Орієнтація локальної системи координат машини

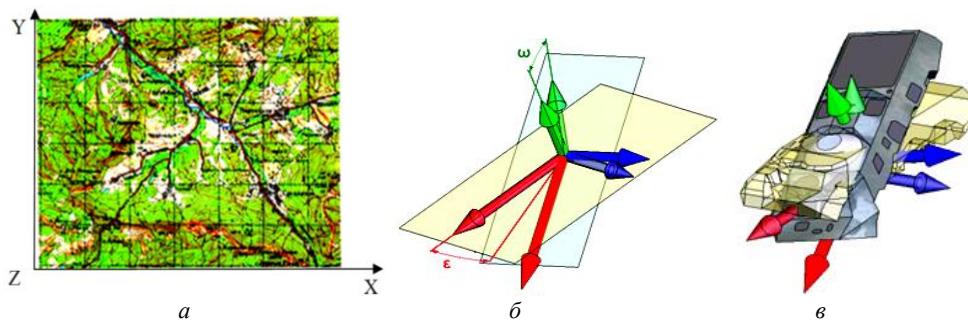


Рисунок 17 – Системи координат: а – ЛСК1; б – ЛСК2; в – ЛСК3

Побудова тривимірних тактичних діаграм на місцевості та розрахунок параметрів захищеності. В методиці, що була викладена в роботах Шаталова О.Є. щодо тривимірних тактичних діаграм, інформація про захищеність представляється у вигляді поверхні, що розділяє простір навколо машини на дві зони – внутрішню, в якій можливе пробиття бронелістів БМ ЛКМ при конкретному значенні товщини і куті нахилу бронеліста (з урахуванням орієнтації в просторі), і зовнішню – з якої пробиття неможливе. Як уже зазначалося, такий підхід має деякі недоліки. В першу чергу те, що відсутність можливості врахування геометрії бронепанелі в методиці Шаталова О.Є. призводить до того, що беруться до уваги лише великі бронепанелі. З цієї ж причини в методиці Шаталова О.Є. абсолютно неможливо врахувати, в яку саме частину корпусу чи

бронепанелі був здійснений постріл і чи присутнє в цій частині корпусу щось, що вимагає захисту (особовий склад, двигун, бензобак).

Таким чином, при розв'язанні задачі проектування корпусу БМ ЛКМ для забезпечення необхідного рівня захищеності проектувальник може тільки збільшувати товщину всієї бронепластили в цілому, у тому числі тих пластин і тих частин пластин, для яких у реальності в цьому не буде потреби. Як уже зазначалося, це призводить до неможливості розробити раціональні варіанти конструкції, і це призведе або до істотно більшої маси, або істотно меншої захищеності, або до обох варіантів одразу. Аналогічним чином і рівно з тих же причин оцінка місцевості за критерієм захищеності/небезпеки, отримана з використанням методики Шаталова О.Є. і за критеріями, запропонованим в цій методиці, є не

зовсім коректною.

Слід ще раз відзначити, що порівняно з класичними методиками методика, запропонована Шаталовим О. Є., є суттєвим кроком уперед у напрямку точності оцінки рівня захищеності від стрілецької зброї і у зв'язку з малою кількістю вихідних параметрів та простотою їх зміни, а також із урахуванням високої швидкодії та можливості використання даних у звичному проектувальнику CAD-середовищі (як PTC Creo (Pro/ENGINEER), SolidWorks, Autodesk Inventor, Siemens NX тощо), ця методика добре підходить на першому етапі вибору базових кутів нахилу і товщини бронепанелі нового корпусу БМ ЛКМ, що розробляється. Також ця методика може досить ефективно використовуватися на етапі первинної оцінки ефективності певних рішень при розробці варіантів глибокої модернізації, як-то зміна матеріалу і товщини бронекорпуса при збереженні загальних геометричних закономірностей корпусу.

У рамках цієї роботи більш раціонально використовувати інформацію про розрахункові параметри не у вигляді поверхневих об'єктів [3], а у вигляді набору векторів – одновимірних масивів даних, де кожному елементу місцевості, згідно із

його номером, присвоюється значення розрахункових параметрів, або матриць – двовимірних масивів, на основі яких можна зробити растрове зображення [34]. Так, d_{yi} – ураження з i елементу місцевості для елемента з номером y у розраховується за формулою:

$$d_{yi} = \begin{cases} 0 - \text{відсутність пробиття;} \\ 1 - \text{наявність пробиття.} \end{cases} \quad (23)$$

Враховуючи (24), значення функції ураження (defeat) – D_i визначається:

$$D_i = \begin{cases} 0, \text{ якщо усі } d_{yi} = 0; \\ 1, \text{ якщо є } d_{yi} = 1. \end{cases} \quad (24)$$

Таким чином, детальний алгоритм обчислень представлений на рис. 18. В ході виконання циклу розрахунку по машині з положенням стрільця в центрі елемента місцевості відбувається обчислення можливості ураження БМ ЛКМ.

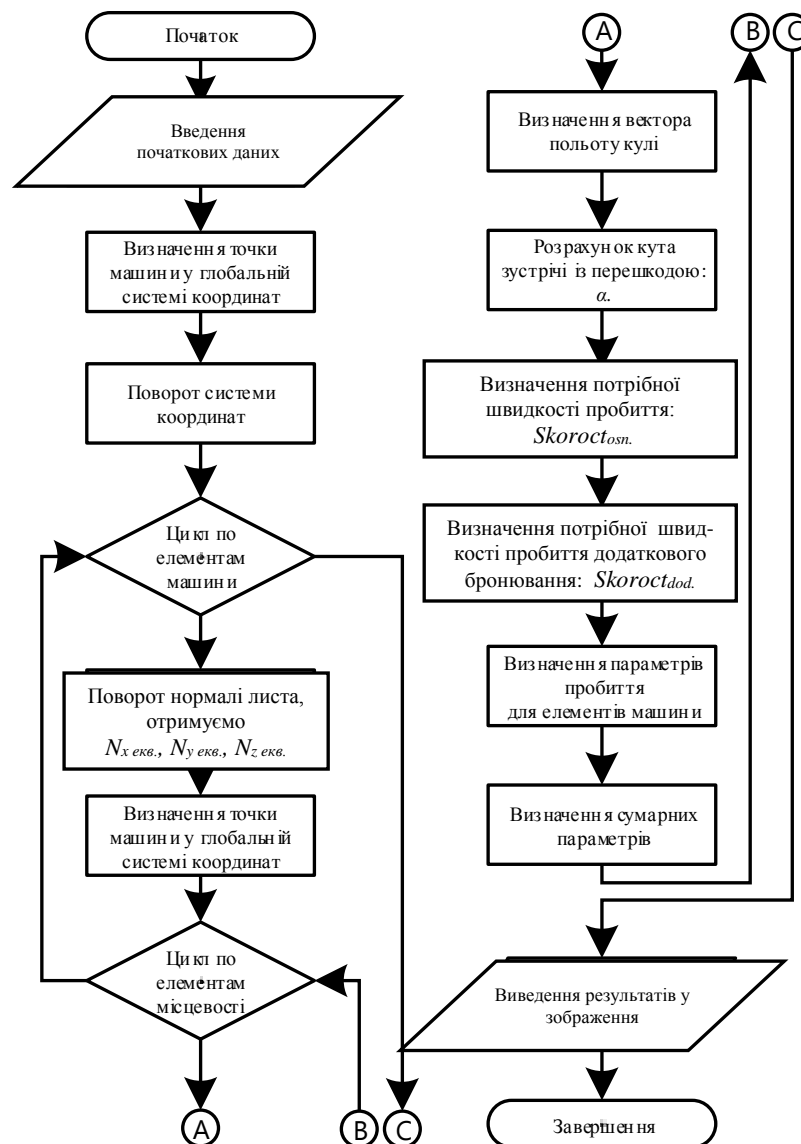


Рисунок 18 – Запропонований алгоритм

На поточний час інформація щодо ураження зберігається за допомогою логічної змінної. Проте можливість моделювання не тільки корпусу в цілому, але й його окремих частин (наприклад частина бронекорпусу у області механіка-водія), може дати набагато більше інформації, ніж методика, розроблена Шаталовим О.Є., і тим більше – класична методика.

За результатами розрахунку всієї території обчислюються інтегральні характеристики, що стосуються конкретного конструктивного рішення для конкретного положення машини на конкретній місцевості, наприклад, загальна площа, з якої можливе ураження машини (A_d – Defeat zone Area), рис. 19. Також у рамках поточної роботи, крім базового параметру, що контролює пробиття/непробиття, пропонується ввести ряд похідних контрольованих параметрів, що відсутні в роботах попередніх авторів. Одним із таких параметрів є мінімальна гарантована та максимально можлива відстань, з якої можливе ураження елементів бронекорпусу (в подальшому мінімальна та максимальна відстань – R_{min} , R_{max}), рис. 20. Крім того, вперше вводяться параметри: загальна оцінка небезпеки ($H(r)$ – hazard) та щільність зони ураження ($D(r)$ – density). Обидва параметри є інтегральними. Перший – це сума площ усіх елементів, з яких можливе ураження на дальності, більшій за питому (рис. 21), а другий – це відношення площі ураження на дистанції з радіусом, меншим r , до площі кола з радіусом r (рис. 22):

$$R_{min} \leq r \leq R_{max}, \quad (26)$$

$$A_d = (\sum_{i=1}^N D_i) \times A_S, \quad (27)$$

де N – кількість елементів;

A_S – площа елемента;

$$R_{min} = \min L_i, \text{ для усіх } D_i = 0, \quad (28)$$

$$R_{max} = L_i, \text{ для усіх } D_i = 1, \quad (29)$$

$$H_r = (\sum_{i=1}^N D_i) \times A_S \text{ для усіх } L_i \geq r, \quad (30)$$

$$D_r = \frac{(\sum_{i=1}^N D_i) \times A_S}{2\pi r}, \text{ } L_i \leq r, \quad (31)$$

$$D(r) = \frac{A_d - H(r)}{\pi r^2}. \quad (32)$$

Крім того, вводяться два інтегральних параметри – ймовірність ураження на конкретній відстані $P_d(r)$ (defeat probability)

$$P_d(r) = \frac{H(r) - H(r-1)}{2\pi r_1}, \text{ для } r \geq 1, \quad (33)$$

та похідні від цього параметру – максимальна ймовірність на відстані, більшої за питому $P_m(r)$ (max defeat probability),

$$P_m(r) = \max[P_d(r_1)], \quad (34)$$

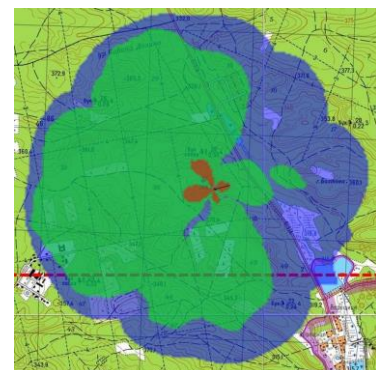
де $r_1 > 1$,

та середньостатистичні ймовірності ураження для відстані, більшої за питому $P_s(r)$ (defeat probability statistic),

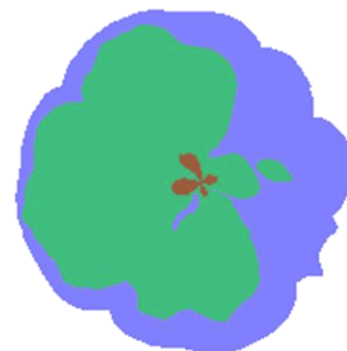
$$P_s(r) = [\bar{P}_d(r_1)], \text{ де } r_1 > 1. \quad (35)$$

Надалі на рис. 19–24 показані графічні пояснення до описаних вище інтегральних параметрів. Усі рисунки зроблені на основі одного розрахунку. Як машина виступає класичний БТР-80 з певними умовними картами розподілу товщин у різних проекціях, місцевість – Yavoriv5; діаграми пробиття на основі формули Жакоб де Марра; БМ ЛКМ розміщена у деякій точці полігона. На рис. 19 показні загальні зони уражень для усіх калібрів.

На рис. 20 зображені усі три зони окремо. Такі зони є графічним варіантом інтегрального параметру A_d . Усі зони показані в різних масштабах. Інтегральні параметри A_d досягають різних значень відповідно для калібрів 7.62 мм, 12.7 мм і 14.5 мм (для обраного розрахункового випадку). Видно, що зі зростанням калібру значно зростає площа ураження. Площа ураження калібром 7.62 мм та більшими калібрами відрізняється на порядки, проте між 12.7 мм та 14.5 мм різниця досягає разів, але не порядків.



а



б

Рисунок 19 – Розрахунок загальної зони, з якої можливе ураження БТР-80, на карті Yavoriv5:

а – відображення розрахованих площин на карті;

б – без карти



Рисунок 20 – Діаграми ураження БТР-80 для окремих калібрів:
 а – калібр 7.62 мм; б – калібр 12.7 мм; в – калібр 14.5 мм

На рис. 21 представлені інтегральні характеристики R_{\min} (максимальна гарантована відстань ураження, мінімальна безпечна відстань) та R_{\max} – максимальна відстань можливого ураження. Видно, що для калібру 7.62 мм R_{\min} – може досягати майже нуля. Це означає, що навіть при стрільбі практично в притул є точки навколо машини, з яких можна її не пробити. Для калібрів 12.7 мм та 14.5 мм таке можливе тільки у випадках дуже пересічної місцевості. Це справедливо лише для даного розрахункового випадку, проте порядок значень залежить у більшості від рівня захищеності машини та типу місцевості.

На рис. 22 показаний вигляд діаграми, що відображає ймовірність ураження БМ ЛКМ на відстані

r (для кожного калібру відстань вибрана різною з точки зору наочності діаграми). Жовтим показані зони, які попадають в зону ураження, чорним – які попали в безпечну зону. Відношення сумарних довжин дуг, що попали до зон ураження по відношенню до довжини кола за радіусом r , складає ймовірність ураження на цій відстані. Така ймовірність дуже сильно залежить від усіх параметрів – геометрія корпусу, карта бронювання, положення та орієнтація БМ ЛКМ, ландшафт навколо машини. На рис. 23 показаний графічний варіант інтегрального показника $H(r)$ (він показаний для тієї ж відстані r , що і на рис. 22), а на рис. 24 – графічний вигляд інтегрального параметру $D(r)$.

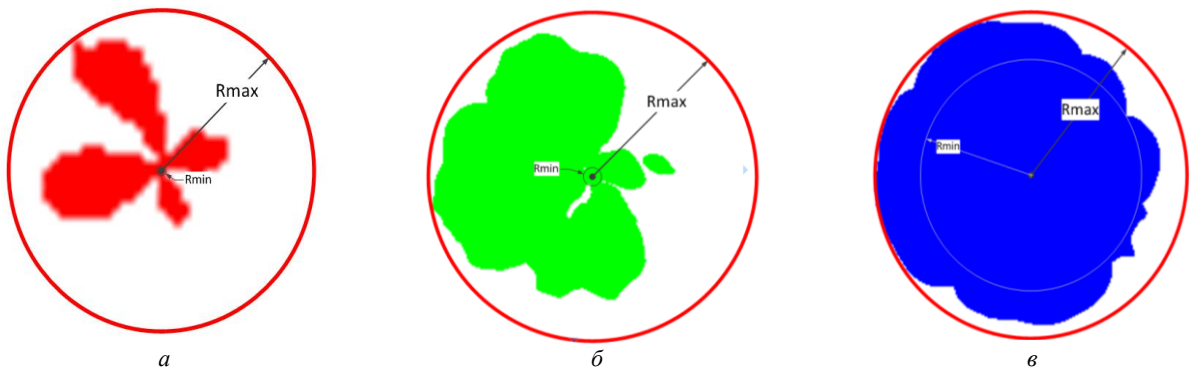


Рисунок 21 – R_{\min} та R_{\max} БТР-80 для калібрів:
 а – калібр 7.62 мм; б – калібр 12.7 мм; в – калібр 14.5 мм

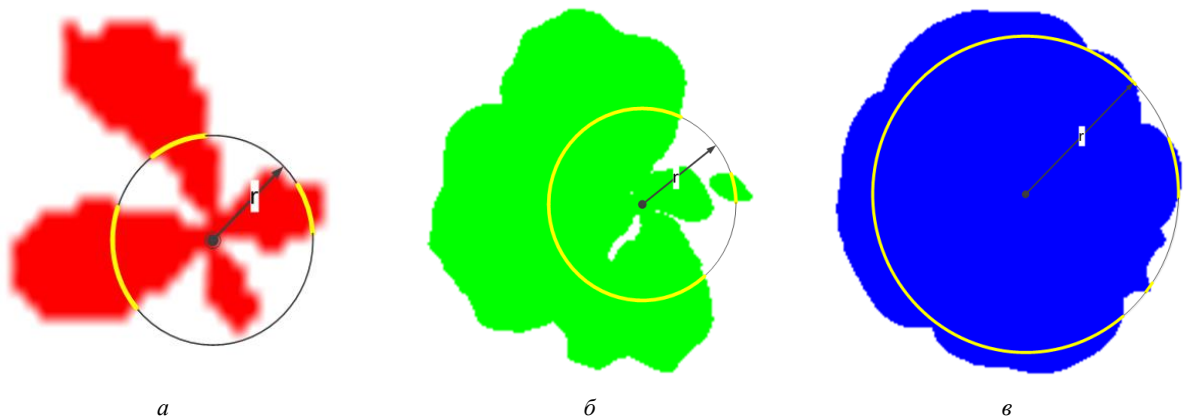


Рисунок 22 – Ймовірність ураження БТР-80 на відстані, рівній радіусу r :
 а – калібр 7.62 мм; б – калібр 12.7 мм; в – калібр 14.5 мм

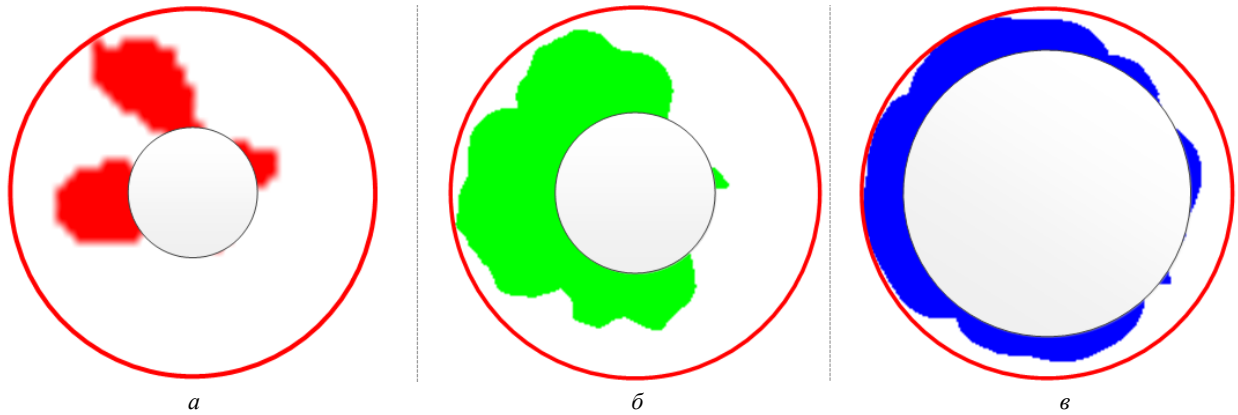


Рисунок 23 – Розрахункова сума площ ймовірності ураження БТР-80 за межами радіусу r :
 a – калібр 7.62 мм; b – калібр 12.7 мм; c – калібр 14.5 мм

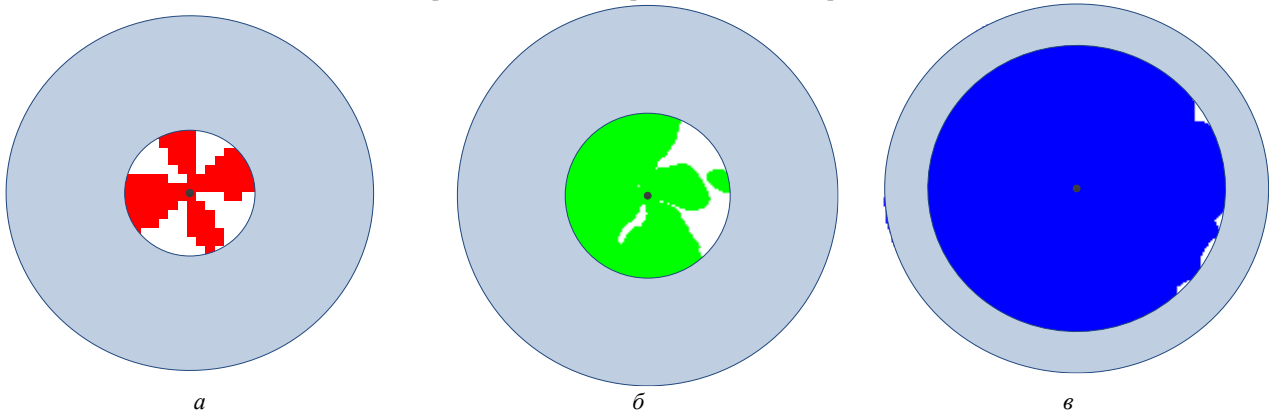


Рисунок 24 – Розрахункова сума площ ймовірності ураження БТР-80 з відстаней, менших радіусу r :
 a – калібр 7.62 мм; b – калібр 12.7 мм; c – калібр 14.5 мм

Висновки. У роботі викладена розроблена комплексна математична модель для побудови тривимірних тактичних діаграм на місцевості і оцінки рівня броньованої захищеності БМ ЛКМ від стрілецької зброї, яка дає можливість розраховувати:

– параметри польоту кулі (швидкість, енергія, зміна кута падіння) в залежності від дальності формулами, отриманими методом апроксимації експериментальних даних;

– кути зустрічі кулі з елементом бронекорпусу з положення стрільця і положення елемента бронекорпусу;

– швидкості пробиття бронеелементів корпусу з урахуванням додаткового бронювання на основі формул, отриманих методом апроксимації експериментальних даних, та забезпечити можливість різнобічного аналізу отриманих результатів розрахунку за рахунок збереження розрахункових параметрів у вигляді масивів, які асоційовані з елементами місцевості, що дає можливість будувати діаграми захищеності.

Створено математичну модель, яка дає можливість, на відміну від існуючих методик, систем і моделей, вирішувати завдання оцінки безпечної зони для БМ ЛКМ з урахуванням її реальної геометрії корпусу і рельєфу місцевості та бронезахищеності існуючих і проєктованих БМ ЛКМ для обґрунтованого вибору методів захисту від сучасної стрілецької зброї, зокрема, з урахуванням додаткового бронювання.

Розроблена комплексна математична модель оцінки захищеності БМ ЛКВ від стрілецької зброї та її компоненти використовуються далі при створенні спеціалізованого програмно-модельного комплексу.

Список літератури

1. Дудар Є. Є., Шаталов О. Є., Васильєв А. Ю. Методика врахування геометрії бойових машин легкої категорії ваги для побудови тактичних діаграм. *Збірник науково-технічних праць "Науковий вісник НЛТУ України"*. Львів, 2017. Вип. 27 (5). С. 139–147.
2. Васильєв А. Ю., Мартыненко А. В., Шаталов О. Е. [та ін.] Комплексный подход к модернизации корпусов легкобронированных машин с использованием современных программных комплексов. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Мелітополь. 2005. Вип. 26. С.169–174.
3. Шаталов О. Е. К вопросу построения и использования 3D мерных планов местности. *Механіка та машинобудування*. 2005. №1. С. 210–213.
4. Ткачук А. Н., Шаталов О. Е., Ларин А. Ю. [и др.]. Расчет траектории полета пуль и снарядов с учетом угла нутации, прецессии и собственного вращения. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. 2005. №3. С. 38–42.
5. Козлов А.Г., Таль О.А. *Конструкция и расчёт танков*. Москва: Изд-во Академии БТВ, 1965. 602 с.
6. Морозов Е. М., Музеймек А. Ю., Шадский А. С. *ANSYS в руках инженера. Механика разрушений*. Москва: Ленанд, 2008. 456 с.
7. Hallquist J. *LS-DYNA: Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation, 1998, May. 498 p.
8. Сабонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. *Метод конечных элементов и САПР*. Москва: Мир, 1989. 192 с.
9. Mark H. *Holmes Introduction to Numerical Methods in Differential Equations*. Springer, 2007. 238p.
10. Галлагер Р. *Метод конечных элементов. Основы. Пер. с англ. / под ред. Н. В. Баничука*. Москва: Мир, 1984. 428 с.
11. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. Москва: Мир, 1981. 304 с.
12. Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor *The Finite Element Method. Vol. 1: Basic Formulation and Linear Problems*. Mc Graw-Hill. London, 1989. 725 p.
13. Armstrong C. G., D. J. Robinson, R. M. McKeage, [and other] Medials for Meshing and More. *4th Annual International Meshing Roundtable, The Queen's University of Belfast* (N. Ireland 16-17, 1995).
14. Васильєв А. Ю., Малакей А. Н., Пелешко Е. В., Шаталов О. Е. К вопросу интегрированных систем анализа динамических процессов в корпусах транспортных средств специального назначения. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ "ХПИ", 2004. №1. С. 51–60.

15. *Бронированная разведывательно-дозорная машина БРДМ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / под редакцией И. М. Голощапов.* Москва: Воен. издат., 1984. 408 с.
16. Куприненко О. М., Голуб В. А. Синтез вариантов проектных гипотез технического облика перспективных типов боевых бронированных машин. *Військово-технічний збірник.* Львів, 2013. №2(9). С. 36–42.
17. Васильев А. Ю., Бруль С. Т., Ткачук Н. А., Карапейчик И. Н. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты. *Механіка та машинобудування.* Харків: НТУ "ХПИ", 2011. № 1. С. 66–73.
18. Васильев А. Ю., Малакей А. Н., Пелешко Е. В., Шаталов О. Е. К вопросу интегрированных систем анализа динамических процессов в корпусах транспортных средств специального назначения. *Механіка та машинобудування.* Харків: НТУ "ХПИ", 2004. №1. С. 51–60.
19. Ткачук Н. А., Пономарев Е. П., Миргородский Ю. Я. [и др.] Специализированные системы для автоматизированного проектирования, исследования и изготовления транспортных средств специального назначения и элементов технологических систем. *Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск "Колесные и гусеничные машины специального назначения".* Харків: НТУ "ХПИ", 2003. №27. С. 13–20.
20. Голуб В. А. *Балістичний та протимінний захист бойових колісних машин. Методологічні основи побудови: Монографія.* Львів: АСВ, 2014. 224 с.
21. LIAO Ri-dong, WANG Jian, ZUO Zheng-xing, FENG Hui-hua Application of Finite Element Analysis of Heavy Vehicle Frames. *School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology,* (Beijing 100081, China): электрон. версия журн. 2006. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-BGTK200602014.htm (дата звернення: 20 січня 2015).
22. YU Ya-ting, DU Ping-an, WANG Zhen-wei Research on the current application status of finite element method. *School of Mechatronics Engineering, University of Electronics Science and Technology,* (Chengdu 610054, China): электрон. версия журн. 2005. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-JXSJ200503002.htm (дата звернення: 21 січня 2015).
23. Williams K. A., Poon K. *Numerical Analysis of the Effect of Surrogate Anti-Tank Mine Blasts on the M113.* URL: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA375585> (дата звернення: 20.01.2017).
24. K. Williams, Fillion-Gourdeau F. Numerical Simulation of Light Armoured Vehicle Occupant Vulnerability to Anti-Vehicle Mine Blast. *The report materials 7-th International LS-DYNA Users Conference.* URL: http://www.dynalook.com/international-conf-2002/Session_6-2.pdf. (дата звернення: 12 лютого 2015)
25. Zhang Tieshan, Hu Jianli, Tang Yun Dynamic Finite Element Analysis of Light Vehicle Frame. *School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094,* (Yuejin Automobile Group Corporation, Nanjing 210037): электрон. версия журн., 2001. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-NJLG200106006.htm. URL: (дата звернення: 21.01.2015).
26. Рубина Н. Ю. *Autodesk Inventor. Практический курс.* Москва: Компьютер-Пресс, 2004. 258 с.
27. Корольов В. М., Заць Я. Г., Савчук Р. Г. Аналіз забезпечення топографічними картами збройних сил провідних країн світу у локальних війнах і збройних конфліктах. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: матеріали наук.-техн. конф. з міжнар. участю (м. Львів, 14-15 травня 2015 р.).* Львів: АСВ, 2015. С. 148.
28. Попов М. О., Середнін С. С. Геоінформаційні системи та технології в завданнях оборони й національної безпеки. *Наука і оборона,* 2009. № 3. С. 49–56.
29. Корольов В. М., Лучук Е. В., Заць Я. Г. Аналіз стану місцевості під час планування та організації бою підрозділами сухопутних військ. *Геоінформаційні системи та інформаційні технології у військових і спеціальних задачах: матеріали наук.-техн. семін (м. Львів, 2014 р.).* Львів, АСВ, 2014. С. 97-98.
30. Васківський М. І., Чепков Р. І. Деякі аспекти застосування геоінформаційних технологій для інформаційно-управляючих систем бронетанкового озброєння. *Січневі ПС: матеріали наук.-техн. семін.* (м. Львів, 21-22 січня 2011 р.). Львів, АСВ, 2011. С. 139-140.
31. Куньву Ли *Основы САПР CAD/CAM/CAE.* Санкт-Петербург: Питер, 2004. 560 с.
32. Томусьяк А. А., Трохименко В. С. *Математичний аналіз: посібник.* Вінниця: Вінницький державний педагогічний університет, 1999. 489 с.
33. Шабатура Ю. В., Чіх В. І. *Фізика в задачах і прикладах у військовій справі: Навчальний посібник.* Львів: АСВ, 2011. 414с.
34. Дудар Є. Є., Шаталов О. Є., Васильев А. Ю. Математичне моделювання геометрії місцевості – методика моделювання геометрії місцевості для вирішення задач із побудови тактичних діаграм захищеності БМ ЛКВ. *Науковий вісник "Біоресурси і природокористування".* Київ, 2017. Т. 9. № 3–4, С. 80-88.

References (transliterated)

1. Dudar Ye. Ye., Shatalov O. Ye., Vasylyev A. Yu. Metody ka vrazuvannya geometriyi bojovykh mashyn legkoyi kategoriyi vagy` dlya pobudovy` taktychnykh diagram [The method of taking into account the geometry of lightweight combat vehicles for the construction of tactical diagrams]. *Zbirnyk naukovykh i tekhnichnykh prac` "Naukovy`j visnyk NLTU Ukrainy"*. L`viv, 2017, vy`p. 27 (5), pp. 139–147.
2. Vasil'ev A. Ju., Martynenko A. V., Shatalov O. E. [ta in.] Kompleksnyj podhod k modernizacii korpusov legkobrionirovannykh mashin s ispol'zovaniem sovremennykh programmnykh kompleksov [An integrated approach to the modernization of light armored cars with the use of modern software systems]. *Praci Tavrijs'koyi derzhavnoyi agrotexnichnoyi akademiyi.* Melitopol'. 2005, vy`p. 26, pp.169–174.
3. Shatalov O. E. K voprosu postroyeniya i ispol'zovaniya 3D memykh planov mestnosti [On the issue of building and using 3D dimensional terrain plans]. *Mexanika ta mashynobuduvannya.* 2005, no.1, pp. 210–213.
4. Tkachuk A. N., Shatalov O. E., Larin A. Ju. [i dr.]. Raschet traektorii poleta pul' i snarjadov s uchedom ugla nutacii, precessii i sobstvennogo vrashcheniya [Calculation of the trajectory of the flight of bullets and shells, taking into account the nutation angle, precession and proper rotation]. *Artillerijskoe i strelkovoe vooruzhenie.* 2005, no. 3, pp. 38–42.
5. Kozlov A.G., Tal' O.A. *Konstrukcija i raschjot tankov* [Design and calculation of tanks]. Moskva: Izd-vo Akademii BV, 1965. 602 p.
6. Morozov E. M., Muzejmnek A. Ju., Shadskij A. S. *ANSYS v rukah inzhenera. Mehanika razrushenij* [ANSYS in the hands of an engineer. Mechanics of destruction.]. Moskva: Lenand, 2008. 456 p.
7. Hallquist J. *LS-DYNA: Theoretical Manual.* Livermore Software Technology Corporation, 1998, May. 498 p.
8. Sabonad'er Zh.-K., Kulon Zh.-L. *Metod konechnykh jelementov i SAPR* [Finite element method and CAD]. Moskva: Mir, 1989. 192 p.
9. Mark H. *Holmes Introduction to Numerical Methods in Differential Equations.* Springer, 2007. 238p.
10. Gallager R. *Metod konechnykh jelementov. Osnovy* [Finite element method. The basics]. Per. s angl. / pod red. N. V. Banichuka. Moscow: Mir, 1984. 428 p.
11. Norri D., Friz Zh. *Vvedenie v metod konechnykh jelementov* [introduction to the Finite Element Method. The basics]. Moscow: Mir, 1981. 304 s.
12. Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor *The Finite Element Method. Vol. 1: Basic Formulation and Linear Problems.* Mc Graw-Hill. London, 1989. 725 p.
13. Armstrong C. G., D. J. Robinson, R. M. Mckeage, [and other] *Medials for Meshing and More. 4th Annual International Meshing Roundtable, The Queen's University of Belfast* (N. Ireland 16-17, 1995).
14. Vasil'ev A. Ju., Malakej A. N., Peleshko E. V., Shatalov O. E. K voprosu integrirovannykh sistem analiza dinamicheskikh processov v korpusah transportnykh sredstv special'nogo naznachenija [On the issue of integrated systems for the analysis of dynamic processes in special vehicle bodies]. *Mexanika ta mashynobuduvannya.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2004, no.1, pp. 51–60.
15. *Bronirovannaja razvedyvatel'no-dozornaja mashina BRDM. Tehnicheskoe opisanie i instrukcija po jekspluatacii* [Armored reconnaissance and patrol vehicle BRDM. Technical specification and maintenance instruction] / pod redakciej I. M. Goloshhapov. Moscow: Voен. izdat., 1984. 408 p.
16. Kuprinenko O. M., Golub V. A. Sintez variantov proektnykh gipotez tehniceskogo oblika perspektivnykh tipov boevykh bronirovannykh mashin [Synthesis of variants of the design hypotheses of the technical appearance of promising types of armored combat vehicles]. *Vijs'kovo-tekhnichny`j zbirnyk.* L`viv, 2013, no. 2(9), pp. 36–42.
17. Vasil'ev A. Ju., Brul' S. T., Tkachuk N. A., Karapejchik I. N. Modelirovanie fiziko-mehaničeskikh processov v korpusah legkobrionirovannykh mashin: podhody, modeli, jeffekty [Modeling of physicomachanical processes in cases of lightly armored cars: approaches, models, effects]. *Mexanika ta mashynobuduvannya.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2011, no 1, pp. 66–73.
18. Vasil'ev A. Ju., Malakej A. N., Peleshko E. V., Shatalov O. E. K voprosu integrirovannykh sistem analiza dinamicheskikh processov v korpusah transportnykh sredstv special'nogo naznachenija [On the issue of integrated systems for the analysis of dynamic processes in special vehicle bodies.]. *Mexanika ta mashynobuduvannya.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2004, no. 1, pp. 51–60.
19. Tkachuk N. A., Ponomarev E. P., Mirgorodskij Ju. Ja. [i dr.] Specializirovannye sistemy dlja avtomatizirovannogo projektirovaniya, issledovaniya i izgotovleniya transportnykh sredstv special'nogo naznachenija i jelementov tehnologicheskikh sistem [Specialized systems for computer-

- aided design, research and manufacturing of special purpose vehicles and elements of technological systems]. Vestnik NTU "KhPI". Tematicheskij vypusk "Kolesnye i gusenichnye mashiny special'nogo naznacheniya". Kharkiv: NTU "KhPI", 2003, no.27, pp. 13–20.
21. LIAO Ri-dong, WANG Jian, ZUO Zheng-xing, FENG Hui-hua Application of Finite Element Analysis of Heavy Vehicle Frames. *School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology*, (Beijing 100081, China): електрон. версія журн. 2006. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-BGTK200602014.htm (data zvernennya: 20 sichnya 2015).
 22. YU Ya-ting, DU Ping-an, WANG Zhen-wei Research on the current application status of finite element method. *School of Mechatronics Engineering, University of Electronics Science and Technology*, (Chengdu 610054, China): електрон. версія журн. 2005. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-JXSJ200503002.htm (data zvernennya: 21 sichnya 2015).
 23. Williams K. A, Poon K. *Numerical Analysis of the Effect of Surrogate Anti-Tank Mine Blasts on the M113*. URL: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA375585> (data zvernennya: 20.01.2017).
 24. K. Williams, Fillion-Gourdeau F. Numerical Simulation of Light Armoured Vehicle Occupant Vulnerability to Anti-Vehicle Mine Blast. *The report materials 7-th International LS-DYNA Users Conference*. URL: http://www.dynalook.com/international-conf-2002/Session_6-2.pdf. (data zvernennya: 12.02.2015)
 25. Zhang Tieshan, Hu Jianli, Tang Yun Dynamic Finite Element Analysis of Light Vehicle Frame. *School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094*, (Yuejin Automobile Group Corporation, Nanjing 210037): електрон. версія журн., 2001. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-NJLG200106006.htm. (data zvernennya: 21.01.2015).
 26. Rubina N. Ju. *Autodesk Inventor. Prakticheskij kurs* [Autodesk Inventor. Practical course]. Moscow: Komp'juter–Press, 2004. 258 p.
 27. Korol'ov V. M., Zayecz' Ya. G., Savchuk R. G. Analiz zabezpechennya topografichny'my' kartamy' zbrojny'x sy'l providny'x krayin svitu u lokal'ny'x vijnax i zbrojny'x konfliktax [Analysis of the provision of topographic maps of the armed forces of the leading countries of the world in local wars and armed conflicts]. *Perspekty'vy' rozvy'tku ozbrojenyja ta vijs'kovoyi teknyky' Suxoputny'x vijs'k: materialy' nauk.-texn. konf. z mizhnar. uchastyu* (m. L'viv, 14-15 travnya 2015 r.). L'viv: ASV, 2015, P. 148.
 28. Popov M. O., Serey'nin Ye. S. Geoinformacijni sy'stemy' ta teknygyi v zavdannax oborony' j nacional'noyi bezpekyy' [Geoinformation systems and technologies in the tasks of defense and national security]. *Nauka i oborona*. 2009, no. 3, pp. 49–56.
 29. Korol'ov V. M., Luchuk E. V., Zayecz' Ya. G. Analiz stanu miscevoli pid chas planuvannya ta organizaciji boju pidrozdilamy' suxoputny'x vijs'k [Analysis of the state of the area during the planning and organization of combat units of the Army]. *Geoinformacijni sy'stemy' ta informacijni teknygyi u vijs'kovy'x i special'ny'x zadachax: materialy' nauk.-texn. semin* (m. L'viv, 2014 r.). L'viv: ASV, 2014, pp. 97–98.
 30. Vas'kivs'ky'j M. I., Chepkov R. I. Deyaki aspekty' zastosuvannya geoinformacijny'x teknygij dlya informacijno-upravlyayuchy'x sy'stem bronetankovogo ozbrojenyja [Some aspects of the application of geoinformation technologies for information-control systems of armored armament]. *Sichnevi GISy': materialy' nauk.-texn. semin*. (m. L'viv, 21-22 sichnya 2011 r.). L'viv: ASV, 2011, pp. 139–140.
 31. Kunvu Li. *Osnovy SAPR CAD/CAM/CAE* [The basics SAPR CAD/CAM/CAE]. Sankt-Piterburg: Piter, 2004. 560 p.
 32. Tomusyak A. A., Troxy'menko V. S. *Matematy'chny'j analiz: posibny'k* [Mathematical analysis: manual]. Vinny'cya: Vinny'cz'ky'j derzhavny'j pedagogichny'j universytet, 1999. 489 p.
 33. Shabatura Yu. V., Chix V. I. *Fizy'ka v zadachax i pry'kladax u vijs'kovij spravi: Navchal'ny'j posibny'k* [Physics in tasks and examples in military affairs]. L'viv: ASV, 2011. 414p.
 34. Dudar Ye. Ye., Shatalov O. Ye., Vasy'lyev A. Yu. Matematy'chne modelyuvannya geometriyi miscevoli – metody'ka modelyuvannya geometriyi miscevoli dlya vy'rishennya zadach iz pobudovy' takt'y'chny'x diagram zaxy'shhenosti BM LKV [Mathematical modeling of geometry of a locality is a technique of modeling of geometry of a locality for solving problems from construction of tactical security diagrams of BM LKV]. *Naukovy'j visny'k "Bioresursy' i pry'rodokory'stuvannya"*. Ky'viv, 2017, V. 9, no. 3–4, pp. 80–88.

Надійшла (received) 8.07.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шаталов Олег Євгенійович (Шаталов Олег Евгеньевич, Shatalov Oleg) – кандидат технічних наук, Національна Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, доцент кафедри бронетанкової техніки, Львів, тел. 097-457-38-31, e-mail: shatl-oleg-ua@ukr.net

Дудар Євген Євгенович (Дудар Евгений Евгеньевич, Dudar Yevhen) – Національна Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, начальник циклової комісії бронетанкової техніки та водіння відділення підготовки Військового коледжу сержантського складу, Львів,

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: <http://orcid.org/0000-0001-8106-0950>; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.