









DOI: <https://doi.org/10.22141/2224-0586.21.6.2025.1938>Лурін І.А.<sup>1,2</sup> , Хорошун Е.М.<sup>3,4</sup> , Гуменюк К.В.<sup>5,6</sup> , Ларін О.О.<sup>7</sup> , Грабовський А.В.<sup>7</sup> ,  
Негодуйко В.В.<sup>3,4</sup> , Коломійцев О.В.<sup>8</sup> , Динець А.В.<sup>9</sup> <sup>1</sup>Національна академія медичних наук України, м. Київ, Україна<sup>2</sup>ДНУ «Центр інноваційних технологій охорони здоров'я» ДУС, м. Київ, Україна<sup>3</sup>Військово-медичний клінічний центр Північного регіону, м. Харків, Україна<sup>4</sup>Харківський національний медичний університет, м. Харків, Україна<sup>5</sup>Командування Медичних сил ЗСУ, м. Київ, Україна<sup>6</sup>Національний військово-медичний клінічний центр «Головний військовий клінічний госпіталь», м. Київ, Україна<sup>7</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна<sup>8</sup>Національний науковий центр «Інститут судових експертиз ім. засл. проф. М.С. Бокаріуса»,

м. Харків, Україна

<sup>9</sup>Київський аграрний університет НААНУ, м. Київ, Україна

## Математичне моделювання термінальної балістики вогнепальних кульових та осколкових поранень

For citation: Emergency Medicine (Ukraine). 2025;21(6):639-646. doi: 10.22141/2224-0586.21.6.2025.1938

**Резюме. Мета:** демонстрація особливостей термінальної балістики вогнепальних кульових та осколкових поранень в експерименті з застосуванням математичного моделювання. **Матеріали та методи.** Для експериментальних досліджень були використані два зразки циліндричних уражаючих елементів, а саме готові уражаючі елементи, якими споряджаються осколково-фугасні бойові частини 9М55 122 мм осколково-фугасних некерованих реактивних снарядів 9М28Ф (9М28Ф-1), а також готові уражаючі елементи, якими споряджаються протипіхотні міни ОЗМ-72. Реєстрація контактної швидкості уражаючого елемента перед влучанням у ціль здійснювалась за допомогою оптоелектронного вимірювального комплексу ВБХ-731.4. Постріли здійснювались у блоки балістичного пластиліну Weible розмірами 200...250×200...250×130...200 мм. Відстань між дульним зрізом зброї та блоком балістичного пластиліну становила 1,5 м. Для порівняння проводилися експериментальні стрільби по блоку балістичного пластиліну кулями, вистріляними із нарізної зброї. Експериментальна стрільба здійснювалась із 7,62 мм пістолета ТТ та 5,45 мм автомата АК-74М патронами відповідного калібру. Було побудовано математичну модель для комп'ютерного моделювання процесу проникнення в зразок балістичного пластиліну твердого сталевого уражаючого елемента циліндричної форми. Модель побудовано в осесиметричній формі, де зразок об'єму балістичного пластиліну та уражаючий елемент мають циліндричну форму. Для балістичних випробувань з готовими уражаючими елементами циліндричної форми було проведено комплекс натурних випробувань (стрільб) з оцінкою проникнення уражаючого елемента з різною початковою швидкістю в діапазоні від 70 до 1000 м/с. Аналогічно комплекс розрахункових досліджень було проведено для циліндричних уражаючих елементів з різними швидкостями. **Результати.** Порівняння геометрії ранового каналу (глибини проникнення та максимальної ширини розкриття) дозволило обрати параметри математичної моделі, забезпечити добру збіжність результатів натурних випробувань та комп'ютерних симуляцій. Графіки порівняння глибини ранового каналу, який утворюється внаслідок проникнення уражаючого елемента в балістичний пластилін, які отримані експериментально та розрахунково з математичного моделювання, збігаються. Результати комп'ютерних симуляцій відображають формування ранового каналу при ушкодженні



© 2025. The Authors. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License, CC BY, which allows others to freely distribute the published article, with the obligatory reference to the authors of original works and original publication in this journal.

Для кореспонденції: Негодуйко Володимир Володимирович, доктор медичних наук, професор, полковник медичної служби, начальник клініки невідкладної медичної допомоги (та прийому і евакуації), Військово-медичний клінічний центр Північного регіону, вул. Культури, 5, м. Харків, 61058, Україна; e-mail: vol-ramzes13@ukr.net; тел.: +380 (50) 452-32-73; професор, кафедра хірургії № 4, Харківський національний медичний університет, просп. Науки, 4, м. Харків, 61022, Україна

For correspondence: Volodumyr V. Nehoduiko, MD, DSc, PhD, Professor, Colonel of the Medical Service, Head of the Clinic of Emergency Medical Care (and Reception and Evacuation), Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kultury st., 5, Kharkiv, 61058, Ukraine; e-mail: vol-ramzes13@ukr.net; phone: +380 (50) 452-32-73; Professor, Department of Surgery 4, Kharkiv National Medical University, Nauky ave., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

Full list of authors information is available at the end of the article.

готовим уражаючим елементом і кулею за однакових початкових швидкостей та в ті самі моменти. Готовий циліндричний уражаючий елемент в усіх випадках впливає однаково якісно, формуючи конічну порожнину ураження з найширшою зоною в місці першого контакту елемента з блоком пластиліну. При цьому характер геометрії ранового каналу не залежить від швидкості, з якою уражаючий елемент потрапляє в блок балістичного пластиліну, а збільшення значення швидкості призводить лише до збільшення глибини та ширини ранового каналу. При збільшенні швидкості проникнення куля в усіх випадках починає втрачати стійкість прямолінійного руху в тілі та здійснює обертання, суттєво збільшуючи ушкодження навколо себе. Спостерігається рановий канал зі значно більшою глибиною у разі поранення кулею за умови тієї самої початкової швидкості, що, очевидно, пояснюється її більш обтічною формою та більшою початковою кінетичною енергією через децю більшу форму та масу. Іншим важливим спостереженням є те, що у місці проникнення розкриття ранового каналу завжди більше при пораненнях готовими уражаючими елементами, тоді як кульові поранення завдають суттєво більшого ушкодження в тілі, що проявляється при помірних та великих швидкостях поранення, та мають завжди ранові канали більшої глибини. Аналіз наведених результатів також показує, що ранові канали, утворені кулею на малих швидкостях ураження, мають більшу глибину, але меншу зону ушкодження. Цей ефект має зрозумілу фізику: за більшої швидкості проникнення довга куля втрачає стійкість прямолінійного руху та обертається, при цьому вона ушкоджує більшу площу та зазнає суттєво більшого опору з боку середовища, що зумовлює меншу глибину її проникнення. **Висновки.** Готові уражаючі елементи циліндричної форми і малого ступеня подовження поводяться стабільно у товщі в'язко-пружного середовища. У разі влучання вони утворюють порожнини конічної форми. Найбільшої шкоди циліндричні уражаючі елементи завдають на ділянці першої третини каналу ушкодження. Це зумовлено практично повною передачею ними своєї кінетичної енергії шарам середовища, що прилягають у цій зоні до центрального каналу ушкодження. Розміри зони ушкоджень на зазначеній ділянці каналу максимальні. Із втратою своєї кінетичної енергії уражаючі елементи продовжують свій рух у товщі перешкоди із завданням мінімальної шкоди оточуючим шарам середовища. Під час влучання готові уражаючі елементи не деформуються та не фрагментуються, на відміну від куль до нарізної вогнепальної зброї, особливо на відміну від куль із свинцевим осердям або експансивних куль. Результати проведених експериментів дозволяють не тільки розширити можливості досліджень особливостей ранової балістики готових уражаючих елементів та осколків бойових припасів і вибухових пристроїв, а й визначити особливості їх руху у повітрі, що має суттєве значення для вивчення їх зовнішньої балістики та визначення аеробалістичних характеристик. Це, в свою чергу, дозволяє визначити розміри зон ушкодження та безпечні відстані. Математичне моделювання дозволяє прогнозувати обсяг ушкодження різними за характеристиками уражаючими елементами у моделі. Результати математичного моделювання в експерименті показують принципову різницю в обсязі ушкодження при кульових та осколкових пораненнях, що повинна враховуватися при оперативному лікуванні.

**Ключові слова:** математичне моделювання; термінальна балістика; вогнепальні поранення

## Вступ

Досвід ведення бойових дій свідчить про те, що значний відсоток необоротних і санітарних втрат серед особового складу збройних сил і цивільного населення припадає на осколкові та кульові поранення, які були завдані у результаті вибухів різних видів бойових припасів та саморобних вибухових пристроїв [2]. Для проведення оперативних дій з метою надання невідкладної допомоги пораненим, їх лікування, а також для проведення відповідних експертних досліджень у галузях судово-медичної експертизи та судової вибухотехнічної експертизи необхідне проведення комплексу експериментальних досліджень, пов'язаних із визначенням особливостей механізму формування осколкових поранень, які були завдані як осколками природного дроблення і напівготовими осколками корпусів бойових припасів, так і різними видами готових уражаючих елементів. Окрім того, визначення особливостей формування полів осколків при підриві бойових припасів та визначення ефективності їх дії на різні види цілей, зокрема і біологічні об'єкти, має пріоритетне значення при розслідуванні кримінальних злочинів та терористичних актів, скоєних із застосуванням саморобних вибухових пристроїв [5, 6, 9].

Світова тенденція військової хірургії останніх десятиліть — поліпшення результатів лікування бойової травми, зниження летальності, що пов'язують із навчанням учасників бойових дій наданню першої медичної допомоги, самодопомоги, оптимізацією медичної логістики, впровадженням принципів хірургії контролю ушкоджень та ранньої ресусцитації, а також етапністю допомоги [2, 3].

Крім клінічних, лабораторних та інструментальних даних, розуміння змін в тканинах при вогнепальних пораненнях значно розширюють експериментальні дані з застосуванням математичного моделювання [2, 3].

Питанням ранової балістики готових уражаючих елементів циліндричної форми, які стосуються механізму і особливостей формування ними у товщі в'язко-пружного середовища каналів ушкоджень, через відносно високу складність не було приділено відповідної уваги. Це зумовлено значними початковими швидкостями їх розльоту в момент вибуху, складністю розрахунків параметрів їх траєкторії розльоту, а також необхідністю досліджень ударно-контактної взаємодії окремого уражаючого елемента із в'язко-пружним середовищем без впливу сторонньої дії на формування

каналу ушкодження інших уражаючих елементів, що при відтворенні реальних умов вибуху є неможливим [5, 6, 9].

При аналізі термінальної балістики вогнепальних поранень є суттєві відмінності, що впливають на обсяг хірургічної допомоги.

**Мета:** демонстрація особливостей термінальної балістики вогнепальних кульових та осколкових поранень в експерименті з застосуванням математичного моделювання.

## Матеріали та методи

Для експериментальних досліджень були використані два зразки циліндричних уражаючих елементів, а саме готові уражаючі елементи, якими споряджаються осколково-фугасні бойові частини 9М55 122 мм осколково-фугасних некерованих реактивних снарядів 9М28Ф (9М28Ф-1), а також готові уражаючі елементи, якими споряджаються протипіхотні міни ОЗМ-72.

Реєстрація контактної швидкості уражаючого елемента перед влучанням у ціль здійснювалась за допомогою оптоелектронного вимірювального комплексу ВБХ-731.4. Постріли здійснювалися у блоки балістичного пластиліну Weible розмірами 200...250 × 200...250 × 130...200 мм. Відстань між дульним зрізом зброї та блоком балістичного пластиліну становила 1,5 м.

Введення у вільний політ уражаючих елементів здійснювалося за допомогою піротехнічного розгінного пристрою із мембранним типом підвищення тиску порохових газів, що дозволило компенсувати негативний вплив на процес пострілу малої маси уражаючого елемента, незначного зусилля фіксації уражаючого елемента у каналі розгінного пристрою і низьку щільність заряджання порохового заряду, що були зумовлені особливостями універсальної конструкції розгінного пристрою і застосованих для стрільби холостих патронів. Введення у вільний політ окремих уражаючих елементів здійснювалося за допомогою гладкоствольної зброї 12-го і 16-го калібрів. Для введення у вільний політ уражаючих елементів із швидкостями до 100 м/с використовувався нейробалістичний телескопічний металний пристрій, який дозволяє досягти стабільності початкових умов стрільби. У ході експериментальних досліджень при стрільбі у блоки балістичного пластиліну визначалися довжина каналу пошкодження і об'єм остаточної порожнини.

Для порівняння проводилися експериментальні стрільби у блок балістичного пластиліну кулями, вистріляними із нарізної зброї. Враховуючи особливості польоту готового уражаючого елемента до моменту влучання, а саме його нестабільність, що призводить до досить складного його поступального руху із одночасним обертанням навколо своєї полярної осі (або осей) і випадкового положення уражаючого елемента у момент влучання, основну увагу було приділено стрільбі із нарізної зброї, яка не забезпечує гіроскопічну стійкість кулі після покидання нею каналу ствола. Стрільба здійснювалась із 7,62 мм пістолета ТТ, канал ствола якого мав сильно зношені нарізи, а також із 5,45 мм автомата АК-74М. Для експериментальної

стрільби використовувалися пістолетні патрони калібру 7,62 × 25ТТ (57-Н-134С) та проміжні патрони калібру 5,45 × 39 (7Н6).

Було побудовано математичну модель для комп'ютерного моделювання процесу проникнення в зразок балістичного пластиліну твердого сталевого уражаючого елемента циліндричної форми. Модель побудовано в осесиметричній формі, де зразок об'єму балістичного пластиліну та уражаючий елемент мають циліндричну форму. Тіло з пластиліну мало діаметр 100 мм та довжину 150 мм. Уражаючий елемент — циліндр діаметром 10 мм та довжиною 10 мм.

Для фізичної моделі обрано в'язко-пружний пластичний матеріал за моделлю Ковера — Саймондса, що посилена лінійною моделлю розвитку шокової хвилі. Відповідно до згаданої моделі фізична залежність напружень від деформацій та швидкості деформацій у матеріалі визначалась так:

$$\sigma(\varepsilon_p; \dot{\varepsilon}_p) = (\sigma_{y0} + B\varepsilon_{pl}^n) \left( 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{D} \right)^{1/q} \right),$$

де  $\varepsilon_{pl}$  — пластичні деформації;  $\dot{\varepsilon}_{pl}$  — швидкість пластичних деформацій;  $\sigma_{y0}$  — початкова межа плинності;  $B$  — коефіцієнт зміцнення за деформаціями;  $n$  — показник зміцнення деформацій;  $D$  — коефіцієнт зміцнення швидкості деформації;  $q$  — показник зміцнення швидкості деформації. Значення констант моделі, які використані у нашому дослідженні, наведені в табл. 1.

**Таблиця 1. Матеріальні константи для моделі Ковера — Саймондса балістичного пластиліну**

| $\sigma_{y0}$ | $B$     | $N$ | $D$ | $q$ |
|---------------|---------|-----|-----|-----|
| 0,1 МПа       | 0,1 МПа | 0,4 | 1   | 100 |

Рівняння стану Мі — Грюнайзена використовується для опису ударної хвилі тиску у м'яких матеріалах:

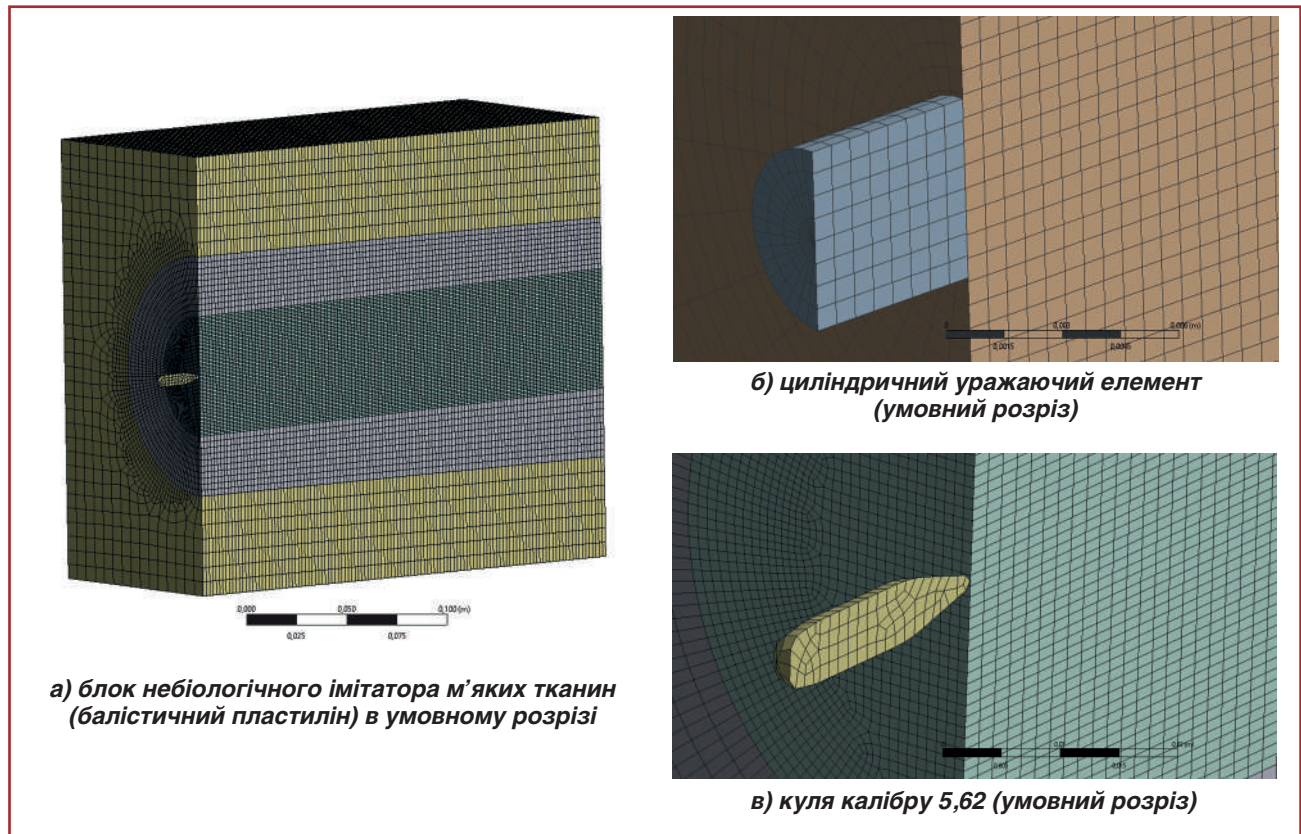
$$p = \rho_0 C_0^2 \frac{\mu}{(1-s\mu)^2} + \Gamma_0 \rho,$$

де  $p$  — тиск;  $\rho$  — щільність (густина матеріалу);  $\rho_0$  — початкова щільність (густина матеріалу);  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$  — коефіцієнт стиснення;  $s$  — показник Гюгонію;  $C_0$  — швидкість звуку в матеріалі;  $\Gamma_0$  — коефіцієнт Грюнайзена. Значення констант моделі, які використані в даному дослідженні, наведені в табл. 2.

**Таблиця 2. Матеріальні константи для моделі Мі — Грюнайзена балістичного пластиліну**

| $\rho_0$               | $G$   | $C_0$   | $S$ | $\Gamma_0$ |
|------------------------|-------|---------|-----|------------|
| 1600 кг/м <sup>3</sup> | 2 МПа | 350 м/с | 3   | 1,2        |

Математичне моделювання здійснювалось у рамках комп'ютерних симуляцій з використанням методу скінченних елементів, з явною схемою інтегрування у часі та застосуванням технології «смерті елементів» для моделювання процесу руйнування матеріалу (проникнення уражаючого елемента у блок імітатора м'яких тканин). Скінченно-елементну тривимірну схему блоку небіологічного імітатора та два типи проникних елементів



**Рисунок 1. Скінченно-елементні моделі для математичного моделювання**

(уражаючі елементи циліндричної форми та кулі калібру 5,45 мм) наведено на рис. 1.

Для балістичних випробувань з готовими уражаючими елементами циліндричної форми було проведено комплекс натурних випробувань (стрільб) з оцінкою проникнення уражаючого елемента з різною початковою швидкістю в діапазоні від 70 до 1000 м/с. Аналогічно комплекс розрахункових досліджень було проведено для циліндричних уражаючих елементів з різними швидкостями.

## Результати

Порівняння геометрії ранового каналу (глибини проникнення та максимальної ширини розкриття) дозволило обрати параметри математичної моделі, які наведені в табл. 1 і 2, та забезпечити добру збіжність результатів натурних випробувань та комп'ютерних симуляцій.

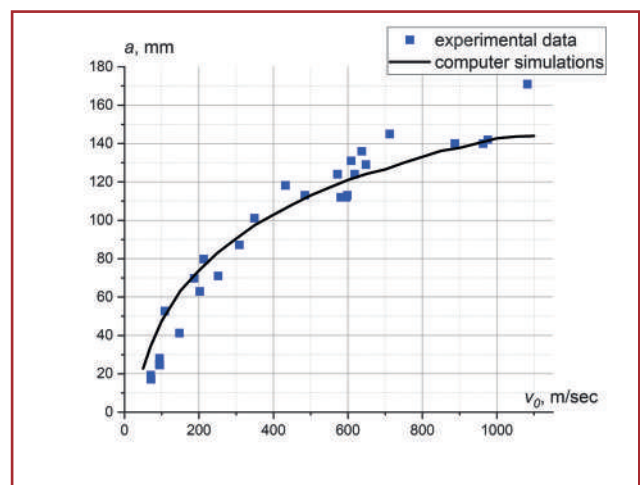
Графік порівняння глибин ранового каналу, що утворюється внаслідок проникнення уражаючого елемента в балістичний пластилін, які отримані експериментально та розрахунково з математичного моделювання, наведено на рис. 2.

Порівняння типового ранового каналу, отриманого з математичного моделювання та за результатами натурних балістичних стрільб, представлено на рис. 3.

На основі сформованої та перевіреної математичної моделі було додатково здійснено комплекс порівняльних досліджень щодо різного за характером процесу формування ранового каналу при проникному ушко-

дженні, яке завдається готовим уражаючим елементом діаметром 5,0 мм та кулею калібру 5,45 мм. Ці дослідження проводились на кількох початкових швидкостях проникнення уражаючого елемента: малих (100 м/с), середніх (300 м/с) та великих (600 м/с).

На рис. 4–6 наведено результати отриманих комп'ютерних симуляцій, які показують формування у часі ранового каналу під час ушкодження готовим уражаючим елементом та кулею в однакові

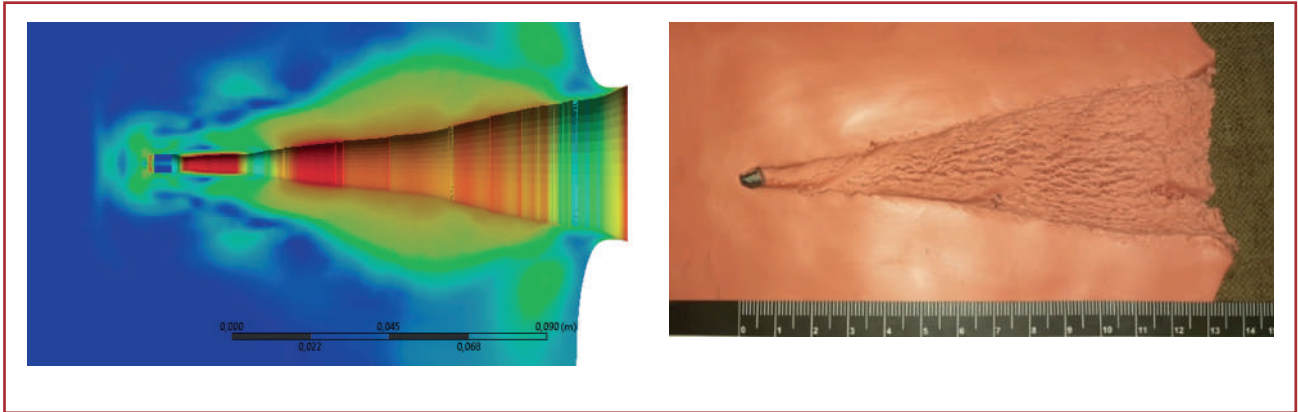


**Рисунок 2. Кількісне порівняння результатів експериментів з комп'ютерними розрахунками (уражаючий елемент з різними початковими швидкостями)**

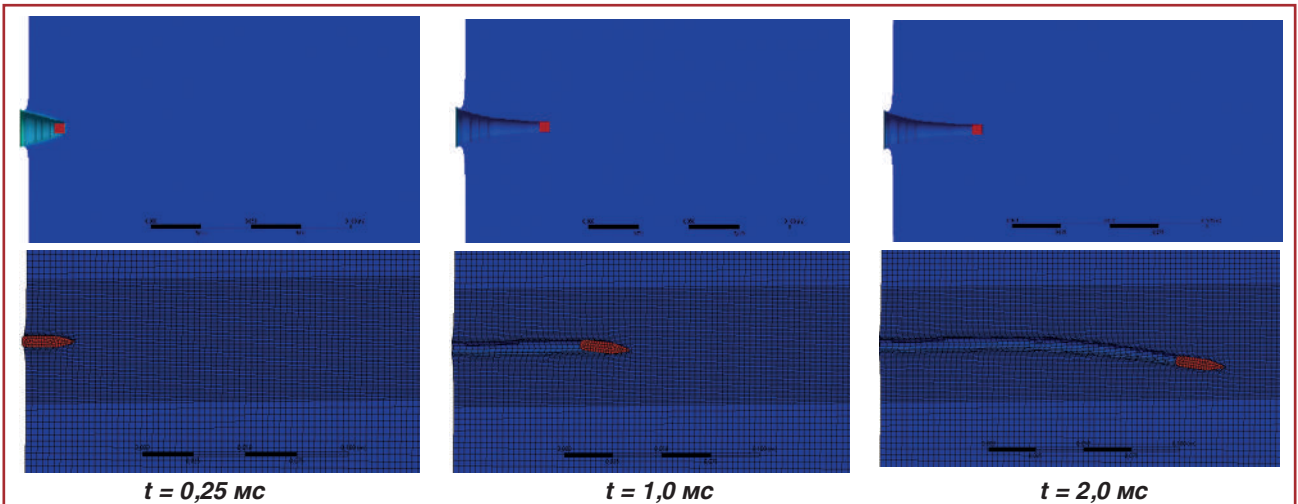
моменти часу та за умови однакової у момент ураження початкової швидкості. Готовий циліндричний уражаючий елемент в усіх випадках однаково якісно впливає, формуючи конічну порожнину ураження з найширшою зоною в місці першого контакту елемента з блоком пластиліну. При цьому характер геометрії ранового каналу не залежить від швидкості, з якою уражаючий елемент потрапляє в блок балістичного

пластиліну, а збільшення значення швидкості призводить лише до збільшення глибини та ширини ранового каналу.

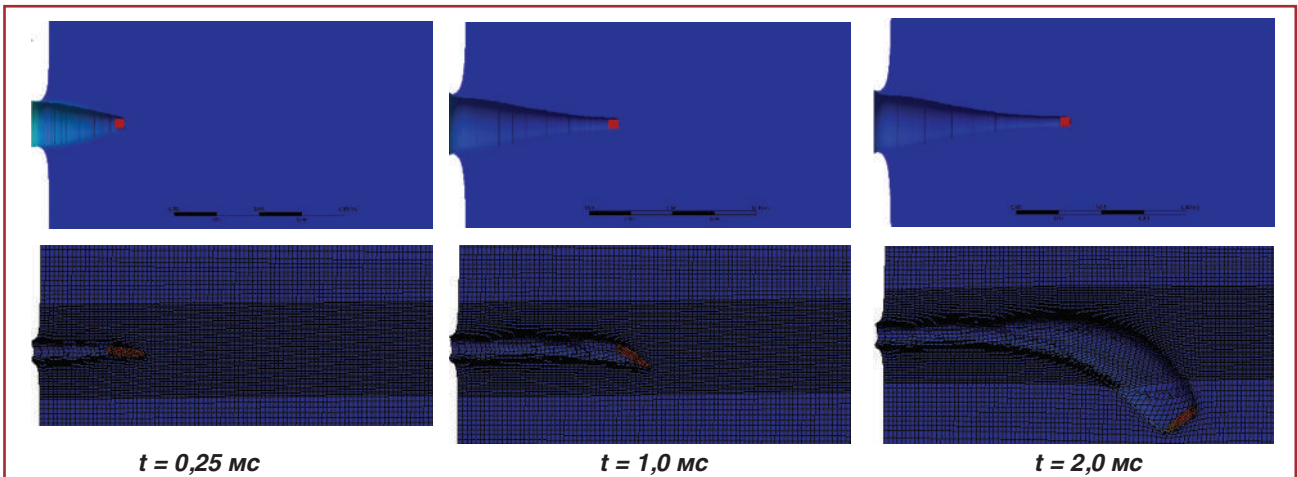
У випадку ураження кулею калібру 5,45 мм характер формування ранового каналу суттєво залежить від початкової швидкості, з якою відбувається проникнення. Так, на малих швидкостях проникнення (приблизно до 200 м/с) куля формує тонкий рівномірний канал майже



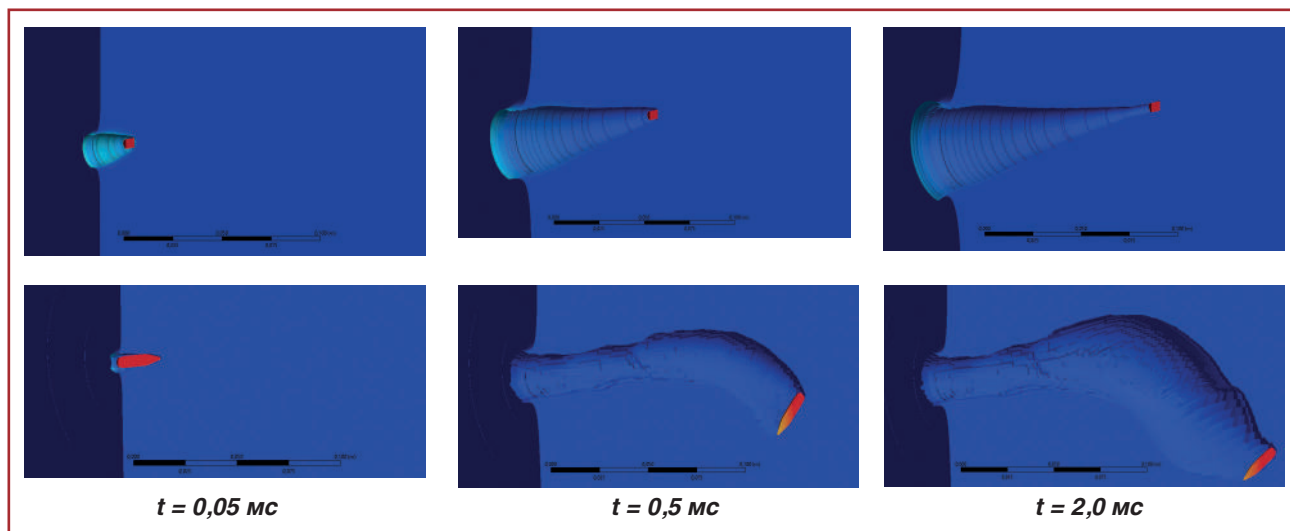
**Рисунок 3. Порівняння ранового каналу, отриманого з експериментів та з математичного моделювання при швидкості проникнення 600 м/с**



**Рисунок 4. Результати комп'ютерних симуляцій проникнення осколка та кулі на швидкості 100 м/с**



**Рисунок 5. Результати комп'ютерних симуляцій проникнення осколка та кулі на швидкості 300 м/с**



**Рисунок 6. Результати комп'ютерних симуляцій проникнення осколка та кулі на швидкості 600 м/с**

циліндричної форми, який має більшу глибину, ніж аналогічне ураження готовим циліндричним уражаючим елементом, але суттєво менше розкриття ранового каналу (рис. 4).

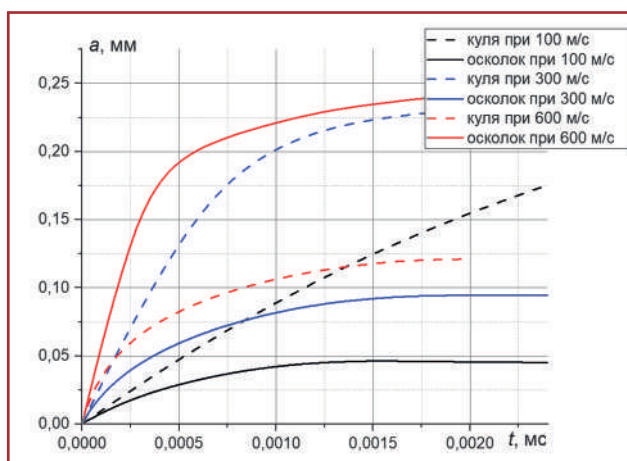
При збільшенні швидкості проникнення кулі в усіх випадках починає втрачати стійкість прямолінійного руху в тілі та здійснює обертання, суттєво збільшуючи ушкодження навколо себе (рис. 5, 6).

Слід відзначити, що в усіх випадках спостерігається рановий канал зі значно більшою глибиною у разі поранення кулею за умови тієї самої початкової швидкості, що, очевидно, пояснюється її більш обтічною формою та більшою початковою кінетичною енергією через дещо більшу форму та масу. Іншим важливим спостереженням є те, що в місці проникнення розкриття ранового каналу завжди більше при пораненнях готовими уражаючими елементами, тоді як кульові поранення завдають суттєво більшого ушкодження в тілі, що проявляється на помірних та великих швидкостях поранення, та мають завжди ранові канали більшої глибини. Кількісні характеристики утворення довжини ранового каналу у часі його формування з урахуванням початкової швидкості проникнення кулі та готового уражаючого елемента циліндричної форми (на рисунку позначено як осколок) подано на рис. 7.

Аналіз наведених результатів також показує, що ранові канали, утворені кулею на малих швидкостях ураження, мають більшу глибину, але меншу зону ушкодження. Такий ефект має зрозумілу фізику: при більшій швидкості проникнення довга куля втрачає стійкість прямолінійного руху та обертається, при цьому вона ушкоджує більшу площу та зазнає суттєво більшого опору з боку середовища, що зумовлює меншу глибину її проникнення.

## Обговорення

Математичне моделювання термінальної балістики вогнепальних поранень наочно демонструє особливості формування ранового каналу, його розміри, напрямок руху снаряду, що раниць, та обсяг ушкодження, що вра-



**Рисунок 7. Залежності глибини ранового каналу, що формується у часі при проникненнях кулі та готового уражаючого елемента на різних швидкостях ушкодження**

ховується при визначенні тактики хірургічного лікування [2, 3, 5, 7, 8].

Введення у вільний політ готових окремих уражаючих елементів або осколків вільного дроблення масою до 6,0 г і розмірами до 11 мм у діапазоні швидкостей до 1000 м/с може бути досягнуто без застосування дорогого спеціалізованого обладнання, що відкриває досить широкі можливості для дослідження особливостей ранової балістики готових уражаючих елементів і осколків бойових припасів та вибухових пристроїв.

Влучання готових уражаючих елементів циліндричної форми у ціль характеризується варіабельністю їх положення відносно зовнішньої поверхні перешкоди, що суттєво впливає на визначення параметрів, необхідних для проведення розрахунків і прогнозування ступеня тяжкості та об'єму завданої шкоди [1, 4]. Проте це можливо виправити за рахунок суттєвого збільшення статистичного матеріалу із подальшою диференціацією результатів, які відповідають конкретним положенням уражаючого елемента у момент влучання у ціль.

За своїм характером ушкодження в'язко-пружного середовища, які були завдані готовими уражаючими елементами циліндричної форми, схожі із ушкодженнями, які можуть бути завдані дестабілізованими кулями, що втратили свою гіроскопічну стійкість внаслідок рикошету, попереднього пробиття перешкоди або внаслідок зриву з нарізів у каналі ствола [1, 4].

## Висновки

1. Готові уражаючі елементи циліндричної форми і малого ступеня подовження поводяться стабільно у товщі в'язко-пружного середовища. У разі влучання вони утворюють порожнини конічної форми. Найбільшої шкоди циліндричні уражаючі елементи завдають у ділянці першої третини каналу ушкодження. Це зумовлено практично повною передачею ними своєї кінетичної енергії шарам середовища, що прилягають у цій зоні до центрального каналу ушкодження. Розміри зони ушкодження на зазначеній ділянці каналу максимальні. Із втратою своєї кінетичної енергії уражаючі елементи продовжують свій рух у товщі перешкоди із завданням мінімальної шкоди оточуючим шарам середовища.

2. Під час влучання готові уражаючі елементи не деформуються та не фрагментуються, на відміну від куль до нарізної вогнепальної зброї, особливо на відміну від куль із свинцевим осердям або експансивних куль.

3. Результати проведених експериментів дозволяють не тільки розширити можливості досліджень особливостей ранової балістики готових уражаючих елементів та осколків бойових припасів і вибухових пристроїв, а й визначити особливості їх руху у повітрі, що має суттєве значення для вивчення їх зовнішньої балістики та визначення аеробалістичних характеристик. Це дозволяє визначити розміри зон ураження та безпечні відстані.

4. Математичне моделювання дозволяє прогнозувати обсяг ушкодження різними за характеристиками снарядами, що ранять, у моделі.

5. Результати математичного моделювання в експерименті показують принципову різницю в обсязі ушкодження при кульових та осколкових пораненнях, що повинна враховуватися при оперативному лікуванні.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

**Внесок авторів.** Хорошун Е.М. — автор ідеї; Лурін І.А. — редакція статті; Гуменюк К.В. — аналіз матеріалу; Ларін В.В., Грабовський А.В. — проведення

математичного моделювання; Негодуйко В.В. — написання статті; О.В. Коломійцев — проведення стендових досліджень; Динець А.В. — збір матеріалу.

## References

1. Kolomiitsev OV, Sapielkin VV. Determination of the ballistic characteristics and the damaging properties of self-made loading cartridges of 7.62x39 caliber. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*. 2017;(17):227-236. doi: 10.32353/khrife.2017.29.
2. Lurin IA, Mykhailusov RM, Negoduyko VV, et al., authors; Tsybaliuk VI, editor. *Simulation of gunshot wounds*. Kharkiv; 2022. 322 p. Ukrainian.
3. Gumeniuk KV, Korol SO, Gybalo RV, editors. *Guidelines for military field surgery*. Kyiv: Ljudmila; 2024. 572 p. Ukrainian.
4. Kolomiitsev O, Sapielkin V, Giverts P, Herman O. Peculiarities of Determining Affecting Properties of Small-bore Bullets After Ricochet. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*. 2022;27(2):59-75. doi: 10.32353/khrife.2.2022.05.
5. Savka I, Zmievskaya L. Forensic-medical analysis of gunshot injuries according to expert cases. *Forensic-medical examination*. 2024;(2):60-67. Ukrainian. doi: 10.24061/2707-8728.2.2024.9.
6. Gumeniuk K, Lurin I, Tsema Ie, et al. Wound ballistics of biological tissue's plastic deformation on the model of ballistic plasticity using hollow point and shape-stable bullets. *J Educ Health Sport*. 2021;11(11):37-57. doi: 10.12775/JEHS.2021.11.11.003.
7. Kolisnyk K, Sokol Y, Shchapov P, Nehoduiko V. Mathematical Modelling of the Multifactorial Influence of Striking Fragments on the Dynamics of the Rehabilitation Processes of the Wounded. In: Sontea V, Tiginyanu I, Railean S, editors. *Proceeding of the 6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering ICNBME 2023*. 2023; September 20-23; Chisinau, Moldova. Series: *IFMBE Proceedings*, vol 92. Cham: Springer; 2024. 160-169 pp. doi: 10.1007/978-3-031-42782-4\_18.
8. Larin O, Tomashevskiy R, Lurin I, Gumeniuk K, Nehoduiko V. Computational Modeling and Analysis of Wound Formation in Gunshot Injuries. In: Sontea V, Tiginyanu I, Railean S, editors. *Proceeding of the 6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering ICNBME 2023*. 2023; September 20-23; Chisinau, Moldova. Series: *IFMBE Proceedings*, vol 92. Cham: Springer; 2024. 218-227 pp. doi: 10.1007/978-3-031-42782-4\_24.
9. Tsybaliuk V, Lurin I, Gumeniuk K, et al. Modeling of wound ballistics in biological tissues simulators. *Med perspekt*. 2023 Mar;28(1):37-48. doi: 10.26641/2307-0404.2023.1.275866.

Отримано/Received 20.07.2025

Рецензовано/Revised 02.08.2025

Прийнято до друку/Accepted 27.08.2025

## Information about authors

Ihor A. Lurin, MD, DSc, PhD, Professor, Major General of the Medical Service, Academician and Vice President of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: lurinam@ukr.net, lurin.igor@icloud.com; phone: +380 (50) 135-30-39; Chief Research Fellow, Scientific Department of Medical Care Organization, Center of Innovative Healthcare Technologies, Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0001-6280-1725>

Eduard M. Khoroshun, Hero of Ukraine, PhD in Medicine, Colonel of the Medical Service, Head of the Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kharkiv, Ukraine; e-mail: ehoroshun@ua; phone: +380 (67) 692-31-20; Associate Professor, Department of Surgery 4, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0003-1258-1319>

Kostiantyn V. Gumeniuk, PhD in Medicine, Associate Professor, Colonel of the Medical Service, Chief Surgeon of the Command of the Medical Forces of the Ukraine Armed Forces, National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine; e-mail: gkv73@ukr.net; phone: +380 (67) 976-36-17; <https://orcid.org/0000-0001-8892-4061>

Oleksiy O. Larin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAMSU, Director of the Institute of Computer Modeling, Applied Physics and Mathematics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: Oleksiy.Larin@khp.edu.ua; phone: +380 (50) 619-50-68; <https://orcid.org/0000-0002-5721-4400>

Andriy V. Grabovskiy, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Leading Research Fellow, Department of Theory and Computer-Aided Design of Mechanisms and Machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: grabovskiy@tmm-sapr.org; phone: +380 (50) 288-10-27; <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>

Volodymyr V. Nehoduiko, MD, DSc, PhD, Professor, Colonel of the Medical Service, Head of the Clinic of Emergency Medical Care (and Reception and Evacuation), Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kharkiv, Ukraine; e-mail: vol-ramzes13@ukr.net; phone: +380 (50) 452-32-73; Professor, Department of Surgery 4, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0003-4540-5207

Oleksandr V. Kolomiitsev, PhD in Technical Sciences, Leading Research Fellow, National Scientific Center "Hon. Prof. M.S. Bokarius Forensic Science Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: sashagun@ukr.net; phone: +380 (67) 357-27-42; https://orcid.org/0000-0003-1932-1034

Andrii V. Dinets, PhD in Medicine, Head of the Department of Healthcare, Kyiv Agrarian University of NAASU, Kyiv, Ukraine; e-mail: andrii.dinets@gmail.com, andrii.dinets@kaunaas.com; phone: +380 (96) 297-44-77; https://orcid.org/0000-0001-9680-7519

**Conflicts of interests.** Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

**Authors' contribution.** E.M. Khoroshun — author of the idea; I.A. Lurin — editing the article; K.V. Gumeniuk — analysis of the material; V.V. Larin, A.V. Grabovskiy — conducting mathematical modeling; V.V. Nehoduiko — writing the article; O.V. Kolomiitsev — conducting bench research; A.V. Dinets — collecting material.

I.A. Lurin<sup>1,2</sup>, E.M. Khoroshun<sup>3,4</sup>, K.V. Gumeniuk<sup>5,6</sup>, O.O. Larin<sup>7</sup>, A.V. Grabovskiy<sup>7</sup>, V.V. Nehoduiko<sup>3,4</sup>, O.V. Kolomiitsev<sup>8</sup>, A.V. Dinets<sup>9</sup>

<sup>1</sup>National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Center of Innovative Healthcare Technologies, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kharkiv, Ukraine

<sup>4</sup>Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine

<sup>5</sup>Command of the Medical Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>6</sup>National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine

<sup>7</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

<sup>8</sup>National Scientific Center "Hon. Prof. M.S. Bokarius Forensic Science Institute", Kharkiv, Ukraine

<sup>9</sup>Kyiv Agrarian University of NAASU, Kyiv, Ukraine

## Mathematical modeling of terminal ballistics of gunshot and shrapnel wounds

**Abstract. Background.** The goal is to demonstrate the features of terminal ballistics of gunshot and shrapnel wounds in an experiment using mathematical modeling. **Materials and methods.** Two samples of cylindrical damaging elements were used for experimental studies, namely preformed fragments with which high-explosive fragmentation warheads 9M55 of 122-mm high-explosive fragmentation unguided rockets 9M28F (9M28F-1) are equipped, and preformed fragments with which anti-personnel mines OZM-72 are equipped. Registration of the contact velocity of the damaging element before hitting the target was carried out using the optoelectronic measuring complex IBKH-731.4. Shots were fired at blocks of ballistic plasticine Weible with dimensions of 200... 250 × 200... 250 × 130... 200 mm. The distance between the muzzle of the weapon and the block of ballistic plasticine was 1.5 m. For comparison, experimental shootings were conducted at a block of ballistic plasticine with bullets fired from rifled weapons. Experimental shooting was carried out with a 7.62 mm TT pistol and a 5.45 mm AK-74M assault rifle using cartridges of the appropriate caliber. A mathematical model was constructed for computer simulation of the process of penetration of a solid steel impact element of cylindrical shape into a ballistic plasticine sample. The model had an axisymmetric form where the ballistic plasticine volume sample and the damaging element are cylinders. For ballistic tests with cylindrical preformed fragments, a set of field tests (firing) was conducted to assess the penetration of the damaging element with different initial velocities in the range from 70 to 1000 m/s. Similarly, a set of computational studies were conducted for cylindrical damaging elements with different velocities. **Results.** Comparison of the wound channel geometry (depth of penetration and maximum opening width) allowed us to select the parameters of the mathematical model, ensuring good convergence of the results of field tests and computer simulations. The graphs comparing the depth of the wound channel formed as a result of the penetration of a damaging element into ballistic plasticine, obtained experimentally and calculated from mathematical modeling, coincide. The results of the obtained computer simulations show the formation of a wound channel during damage by a preformed fragment and a bullet at the same time points and under the condition of the same initial velocity at the moment of impact. Cylindrical preformed fragment in all cases qualitatively exerts the same effect, forming a conical lesion cavity with the widest zone at the point of first contact of the element with the plasticine block. At the same time, the nature of the wound channel geometry does not depend on the velocity with which the damaging element enters the block of ballistic plasticine, and an increase in the velocity leads, in fact, only to an increase in the depth and width of the wound

channel. As the penetration velocity increases, the bullet in all cases begins to lose the stability of its rectilinear motion inside the body and rotates significantly increasing the damage around it. In all cases, a wound channel with a significantly greater depth is observed in case of a bullet wound given the same initial velocity, which is obviously explained by its more streamlined shape and greater initial kinetic energy due to its slightly larger shape and mass. Another important observation is that at the point of penetration, the opening of the wound channel is always greater in case of using preformed fragments, while bullet wounds cause significantly more damage inside the body, which is manifested at moderate and high wound velocities and always have wound channels of greater depth. Analysis of the above results also shows that wound channels formed by a bullet at low impact velocities have greater depth but a smaller area of damage. This effect has understandable physics — at a higher penetration velocity, a long bullet loses its stability of rectilinear motion and rotates damaging a larger area and receiving significantly greater resistance from the environment, which determines its smaller penetration depth. **Conclusions.** Preformed fragments with cylindrical shape and small elongation behave stably in the thickness of the viscoelastic medium. In case of impact, they form conical cavities. The greatest damage is caused by cylindrical damaging elements in the first third of the damage channel. This is due to the almost complete transfer of their kinetic energy to the layers of the environment adjacent to the central damage channel in this zone. The dimensions of the damage zone in this section of the channel are maximum. With the loss of their kinetic energy, the damaging elements continue their movement into the thickness of the obstacle and cause minimal damage to the surrounding layers of the environment. When hit, preformed fragments do not deform or fragment, unlike bullets for rifled firearms, especially unlike bullets with a lead core or expanding bullets. The results of the experiments allow us to expand the possibilities of research not only into the features of wound ballistics of preformed fragments and fragments of ammunition and explosive devices, but also to determine the features of their movement in the air, which is of significant importance for studying external ballistics and determining aeroballistic characteristics. This, in turn, allows us to determine the size of the damage zones and safe distances. Mathematical modeling enables predicting the amount of damage caused by projectiles with different characteristics in the model. The results of mathematical modeling in the experiment show a fundamental difference in the amount of damage in bullet and shrapnel wounds, which should be taken into account during surgical treatment.

**Keywords:** mathematical modeling; terminal ballistics; gunshot wounds