

Експериментальні дослідження особливостей термінальної та зовнішньої балістики уражаючих елементів циліндричної форми діаметром 5,0 мм

Ігор Лурін ^{1а}, Олексій Ларін ^{2b}, Едуард Хорошун ^{3а},
Володимир Негодуйко ^{4а}, Олександр Коломійцев ^{5с}, Сергій Ларьков ^{6д},
Олег Кокорін ^{7е}, Дмитро Климчук ^{8е}, Віталій Тищенко ^{9е},
Віталій Щербак ^{10е}, Віктор Сапелкін ^{11е}

¹ Д-р мед. наук, проф., віцепрезидент НАМН України, акад. НАМН України, генерал-майор мед. служби, Державна установа «Науково-практичний центр профілактичної та клінічної медицини» Державного управління справами, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6280-1725>, e-mail: lurinnam@ukr.net

² Д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України, Навчально-науковий інститут комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5721-4400>, e-mail: Oleksiy.Larin@khpі.edu

³ Герой України, канд. мед. наук, полковник мед. служби, Військово-медичний клінічний центр Північного регіону Командування Медичних сил Збройних сил України, Харківський національний медичний університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1258-1319>, e-mail: ehoroshun@i.ua

⁴ Д-р мед. наук, доц., полковник мед. служби, клініка невідкладної медичної допомоги (та прийому і евакуації), Військово-медичний клінічний центр Північного регіону Командування Медичних сил Збройних сил України, Харківський національний медичний університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4540-5207>, e-mail: vol-ramzes13@ukr.net

⁵ Канд. техн. наук, ННЦ «ІСЕ ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1932-1034>, e-mail: sashagun@ukr.net

⁶ Канд. техн. наук, Державне космічне агентство України, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1180-252X>, e-mail: sergelarkov@ukr.net

⁷ Харківський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6899-5794>, e-mail: jordan@3g.ua

⁸ Харківський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-68782968>, e-mail: klimchuk_dv@ukr.net

⁹ Харківський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9725-5783>, e-mail: 231986@ukr.net

¹⁰ Канд. мед. наук, доц., Державна спеціалізована установа «Харківське обласне бюро судово-медичної експертизи» Міністерства охорони здоров'я України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2527-9055>, e-mail: medkrim@ukr.net

¹¹ Канд. мед. наук, доц., Державна спеціалізована установа «Харківське обласне бюро судово-медичної експертизи» Міністерства охорони здоров'я України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9795-8463>, e-mail: bodydoc666@gmail.com

^a Концептуалізація, методологія, нагляд.

^b Концептуалізація, методологія, дослідження, програмне забезпечення.

^c Написання оригінального рукопису, методологія, дослідження, нагляд.

^d Оброблення даних, дослідження, програмне забезпечення.

^e Дослідження, ресурси.

DOI: [10.32353/khrife.4.2025.06](https://doi.org/10.32353/khrife.4.2025.06)

УДК 343.98

Надійшло 20.10.2025 / Рецензовано 30.10.2025 / Прийнято до друку 25.12.2025 /
Доступно онлайн 31.12.2025



Мета статті — дослідити особливості механізму формування у в'язко-пружному середовищі пошкоджень, які виникли в результаті високошвидкісної ударно-контактної взаємодії з готовими уражаючими елементами циліндричної форми. Для досягнення мети застосовано загальнонаукові та спеціальні методи. Основну увагу приділено дослідженню уражаючих елементів діаметром 5,0 мм, оскільки ними споряджено значну кількість осколкових бойових припасів (зокрема, протипіхотні міни, боеприпаси для скидання з дронів, а також саморобні вибухові пристрої). Експериментальні дослідження проводили в умовах балістичної траси із застосуванням оптоелектронних вимірювальних комплексів, імітатора біологічних тканин (балістичного пластиліну) і спеціальних патронів. Уведення у вільний політ готових уражаючих елементів здійснювали за допомогою нейробалістичного ручного металюного пристрою, а також нарізної вогнепальної зброї калібру 5,6 мм і 5,45 мм. Це дало змогу провести натурні експерименти в доволі широкому діапазоні контактних швидкостей від 70 м/с до 1082 м/с під час дослідження уражаючих властивостей і в діапазоні від 547 м/с до 1096 м/с під час дослідження аеробалістичних характеристик. Як експериментальні снаряди використано готові уражаючі елементи циліндричної форми діаметром 5,0 мм із подовженням 0,96—1,1, якими споряджують осколкові загороджувальні міни ОЗМ-72. Під час досліджень визначено, що після влучання зазначені готові уражаючі елементи в товщі імітатора біологічних тканин поведуться стабільно й утворюють порожнини конічної форми. Найбільшої шкоди вони завдають на ділянці першої чверті (третьої) каналу пошкодження. Це обумовлено практично повною передачею уражаючими елементами своєї кінетичної енергії шарам середовища, що примикають у цій зоні до центрального каналу пошкодження. Розміри

зони пошкоджень на цій ділянці каналу максимальні. На основі здобутих результатів визначено особливості впливу на параметри каналу пошкодження контактної швидкості й положення уражаючого елемента в момент улучання. Визначено емпіричні залежності коефіцієнта сили опору в'язко-пружного середовища, об'єму та довжини каналу пошкоджень від контактної швидкості. Результати проведених досліджень дають змогу прогнозувати ступінь тяжкості завданих людині осколкових поранень і розв'язати низку ситуаційних завдань, пов'язаних із розслідуванням кримінальних злочинів та терористичних актів, під час скоєння яких застосовано осколкові бойові припаси або саморобні вибухові пристрої. Окремий етап — дослідження аеробалістичних характеристик зразків кінетичних снарядів, що дає змогу визначити їх уражаючі властивості залежно від відстані до центра вибуху.

Ключові слова: балістичний пластилін; бойовий припас; коефіцієнт сили опору середовища; контактна швидкість; осколкова загороджувальна міна ОЗМ-72; осколкове пошкодження; патрон; саморобний вибуховий пристрій; термінальна балістика; уражаючий елемент циліндричної форми.

Постановка наукової проблеми

Термінальна балістика осколків природного дроблення й готових уражаючих¹ елементів — доволі складна галузь досліджень військової та судової медицини. Швидкоплинність процесів утворення осколкових поранень, одночасне формування множинних поранень та доволі високі контактні швидкості кінетичних снарядів (осколків і готових уражаючих елементів) не дають змоги точно визначити вплив конкретних чинників на формування каналу осколкового поранення та ступінь тяжкості шкоди, завданої біологічним тканинам. Неможливо чітко визначити зони ушкоджень (контузії (первинного некрозу)

і комоції (вторинного некрозу)) у товщі біологічних тканин тіла людини, оскільки доволі складно з'ясувати характер поширення хвиль тиску у в'язко-пружному середовищі за високошвидкісної взаємодії осколка довільної форми або уражаючого елемента типової (куб, циліндр, сфера) форми, улучання яких характеризуються не тільки високою контактною швидкістю, а й варіабельністю їх положення в момент улучання (боковою проекцією під певним кутом або торцевою поверхнею) і обертанням навколо своїх повздожньої або полярних осей (ефект «перекидання») тощо. Це унеможлиблює прогнозування наслідків улучань осколків у тіло людини та визначення ступеня тяжкості завданої

1 За правилами української мови від глагола «уражати» (у значенні *ранити, убивати; порушувати життєдіяльність* — про хвороби) дієприкметники утворити *не можна*, варіант «уражаючий» є калькою з російської: суфікси *-уч-, -юч-* не характерні для української мови. Доречніше послуговуватися словосполученням «той, який (що) уражає». Проте, зважаючи на стале застосування в чинних нормативно-правових актах і спеціалізованих методиках згаданих помилкових словоформ, ми змушені оперувати у цій праці саме ними.— Ред.

ними шкоди. Окреме питання — визначення параметрів траєкторії польоту досліджуваних кінетичних снарядів і їх уражаючих властивостей залежно від відстані до центра вибуху, оскільки це також пов'язано з доволі значними величинами їх початкових швидкостей і невизначеністю їхньої поведінки у вільному польоті.

Єдиний спосіб здобути достовірні дані про термінальну та зовнішню балістику кінетичних снарядів — провести натурні випробування й експериментальні дослідження. Проте цей процес також стикається із труднощами. Насамперед це діапазон контактних швидкостей кінетичних снарядів, який можна отримати винятково в результаті підривів зарядів вибухової речовини різної маси. Окрім того, під час підриву зарядів утворюється безліч осколків природного дроблення або вводиться у вільний політ значна кількість готових уражаючих елементів, що негативно впливає на об'єктивність отриманих даних, оскільки в імітатор біологічних тканин може влучити одночасно певна кількість кінетичних снарядів, післядія яких накладається одна на одну, що практично унеможлиблює виявлення особливостей формування осколкового поранення окремим зразком конкретного кінетичного снаряда. Користування для сепарації осколкового поля пристосуваннями у вигляді захисних щитів не розв'язує проблеми цілком. Це обумовлено тим, що ймовірність улучання досліджуваного кінетичного снаряда в обмежений простір у конкретному напрямку після вибуху доволі мала й отримання певних результатів потребує проведення певної кількості експериментів зі значними витратами вибухової речовини та засобів підриву. Застосування технічних пристроїв для примусового спрямування потоку осколків у відпо-

відному напрямку із подальшою їх сепарацією за допомогою захисних пристосувань не розв'язує цієї проблеми, оскільки може статися не пряме його влучання в імітатор біологічних тканин, а внаслідок рикошету від стінок пристрою, який направляє. До того ж не виключена ймовірність улучання в імітатор одночасно кількох кінетичних снарядів або їх послідовне влучання із накладенням наслідків.

Навіть більше, наявні проблеми з визначенням контактної швидкості досліджуваних кінетичних снарядів. Під час вибуху доволі складно забезпечити прилади реєстрації та визначити швидкість окремого кінетичного снаряда в осколковому полі. Загалом зазначені чинники негативно впливають на результативність досліджень і ступінь достовірності здобутих даних.

Розв'язати окреслені проблемні питання можна за допомогою методів експериментальної (судової) балістики. Експериментальні дослідження доцільно здійснювати в умовах балістичної траси, оснащеної вимірювальними комплексами (оптоелектронними або доплерівським радіолокаційним хронографом типу *LabRadar*), користуючись спеціальними патронами та зразками вогнепальної зброї відповідного калібру, або за допомогою спеціалізованих балістичних установок чи пристосувань для метання кінетичних снарядів. Як імітатор біологічних тканин доцільно використовувати балістичний пластилін, оскільки в ньому після влучання формується остаточна порожнина, що дає змогу визначити зону поширення хвиль тиску, а також розміри й інші параметри завданого пошкодження.

Такий підхід допомагає досягти відповідного діапазону контактних швидкостей, зареєструвати значення швидкості в момент улучання, візуалізувати

характер завданого пошкодження, визначити характеристики цього пошкодження та виключити вплив множинної дії інших кінетичних снарядів на процес формування пошкодження в імітаторі біологічних тканин окремим уражаючим елементом. Окрім того, у такий спосіб можна отримати достовірні дані щодо стабільності уражаючих елементів у польоті й визначити їхні аеробалістичні характеристики.

Мета статті

Дослідити особливості механізму формування у в'язко-пружному середовищі пошкоджень, спричинених високошвидкісною ударно-контактною взаємодією з готовими уражаючими елементами певної форми та розмірів. Визначити вплив варіабельності початкових умов контакту на параметри сформованої остаточної порожнини в товщі імітатора біологічних тканин. На основі результатів експериментальних досліджень визначити залежність коефіцієнта сили опору середовища, довжини каналу й об'єму завданих пошкоджень від величини контактної швидкості уражаючого елемента та його положення в момент улучання. Паралельно з цими дослідженнями провести дослідження аеробалістичних характеристик готових уражаючих елементів циліндричної форми, необхідне для визначення величин дисипації їхньої кінетичної енергії на траєкторії.

Методи дослідження

Застосовано загальнонаукові (аналіз, синтез тощо) і спеціальні методи (аерометричний, натурні експерименти тощо). Для проведення досліджень користувалися оптоелектронними вимірювальними комплексами, балістичним пластиліном (імітатором біологічних тканин тіла людини) і кількома видами зброї.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Основні положення досліджень у галузі термінальної балістики осколків та готових уражаючих елементів викладено в низці фундаментальних наукових і науково-практичних робіт таких авторів, як V. Tsymbaliuk зі співавторами², R. M. Coupland зі співавторами³, N. Rozen та I. Dudkiewicz⁴, T. O. Terefe зі співавторами⁵ та ін. У їхніх працях наведено не тільки загальні методи досліджень травм, завданих осколками та кулями, а й докладно описано методи проведення експериментів, представлено аналітичні моделі для визначення параметрів вогнепальної травми та осколкових ушкоджень; окреслено емпіричні залежності для визначення глибини ранових каналів, розмірів тимчасово пульсуючих порожнин, ступеня тяжкості завданої біологічним тканинам шкоди, а також результати комп'ютерного моделювання фізичних

- 2 Tsymbaliuk V., Lurin I., Gumeniuk K., Herasymenko O., Furkalo S., Oklei D., Negoduyko V., Gorobeiko M., Dinets A. Modeling of wound ballistics in biological tissues simulators. *Medicni perspektivi*. 2023. Vol. 28. No. 1. С. 37–48. DOI: 10.26641/2307-0404.2023.1.275866 (дата звернення: 18.09.2025).
- 3 Coupland R. M., Rothschild M. A., Thali M. J. Wound ballistics: basics and applications / B. P. Kneubuehl (Ed.). Berlin, 2014. 496 p. DOI: 10.1007/978-3-642-20356-5 (дата звернення: 18.09.2025).
- 4 Rozen N., Dudkiewicz I. Wound ballistics and tissue damage / *Armed Conflict Injuries to the Extremities*. Berlin, 2011. Pp. 21–33. DOI: 10.1007/978-3-642-16155-1_2 (дата звернення: 18.09.2025).
- 5 Terefe T. O., Chawla A., Datla N. V. Damage mechanisms from low-velocity penetrating shrapnel in ballistic gelatin. *Defence Technology*. 18 July 2025. DOI: 10.1016/j.dt.2025.07.008 (дата звернення: 18.09.2025).

процесів, що супроводжують улучання кінетичних снарядів у біологічні тканини й у їх імітатори. Більшість цих праць присвячено дослідженням сферичних уражаючих елементів, стандартизованих імітаторів осколків із пласкою та долотоподібною формами головних частин, але практично не приділено уваги дослідженням готових уражаючих елементів та осколків природного дроблення реальних зразків бойових припасів і саморобних вибухових пристроїв, хоча результати досліджень таких зразків кінетичних снарядів мають більше практичне значення як для військової медицини, так і для судової експертизи. У зв'язку із цим ми акцентували увагу на дослідженні уражаючих елементів конкретного зразка бойових припасів, а саме загороджувальній осколковій міні ОЗМ-72.

Викладення основного матеріалу дослідження

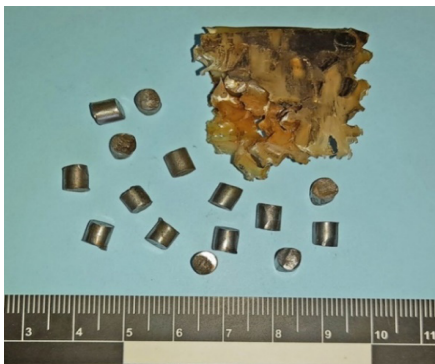
Уражаючі елементи циліндричної форми — одні з найбільш поширених готових уражаючих елементів, якими споряджують осколкові й осколково-фугасні бойові припаси, бойові частини різних видів засобів ураження та саморобні ви-

бухові пристрої. Передусім вони більш технологічні у виготовленні, а завдяки високій початковій швидкості мають доволі високі уражаючі властивості. Це обумовлено тим, що, улучаючи в ціль, вони часто передають усю свою кінетичну енергію біологічним тканинам тіла людини й завдають значних ушкоджень.

Найменший готовий уражаючий елемент циліндричної форми діаметром 5,0 мм. Такими елементами споряджують осколкові загороджувальні міни ОЗМ-72. Кількість уражаючих елементів в одній міні — майже 2400 шт. Загальний вигляд міни та її уражаючих елементів представлено на рис. 1 і 2.



Рис. 1. Загальний вигляд осколкової загороджувальної міни ОЗМ-72 (фото із мережі «Інтернет»)



а



б

Рис. 2. Загальний вигляд готових уражаючих елементів циліндричної форми міни ОЗМ-72 (а) і фрагмента полімерної сорочки, у яку їх залито (б)

Основні характеристики уражаючих елементів:

- форма: циліндр;
- розміри: діаметр — 5,0–5,1 мм, довжина — 4,8–5,5 мм;
- середня маса готового елемента: 0,77 г (0,65–0,80 г);
- середнє значення об'єму: 0,105 см³.

Достовірних даних про величину початкової швидкості готових уражаючих елементів міни ОЗМ-72 у відкритих інформаційних джерелах немає, проте їхню початкову швидкість можна визначити на основі даних про особливості конструкції боеприпасу й масу його основних конструктивних елементів, які беруть участь у формуванні осколкового поля.

Характеристики міни ОЗМ-72:

- вибухова речовина (далі — ВР) — тротил;
- швидкість детонації за $\rho = 1600$ кг/м³, плавлений 6700 м/с;
- маса ВР — 0,66 кг;
- середня маса готового уражаючого елемента — 0,77 г;
- кількість уражаючих елементів — 2400 шт.;
- середнє значення загальної маси осколків — 1,848 кг;
- загальна маса міни — 5,0 кг;
- маса напрямного стакана міни з тросом — 0,675 кг;
- маса міни без напрямного стакана — 4,325 кг;
- радіус суцільного ураження — 25–30 м;
- дальність польоту окремих уражаючих елементів — до 50 м;
- маса вишибного заряду (димного пороху) — 7 г;

- маса проміжного заряду (тротилу) — 23 г.

Зважаючи на те, що готові уражаючі елементи розташовані безпосередньо в міні, яка після спрацювання підривача й вишибного заряду вилітає вгору з напрямного стакана, то в розрахунках загальна маса такої бойової частини (далі — БЧ) становитиме 4,325 кг.

За методиками ⁶ початкову швидкість уражаючих елементів можна розрахувати за формулою:

$$V_0 = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\alpha}{2-\alpha}}, \quad (1)$$

де:

V_0 — початкова швидкість уражаючого елемента, м/с;

D — швидкість детонації ВР, м/с;

α — коефіцієнт наповнення корпусу:

$$\alpha = \frac{m_{\text{ВР}}}{m_{\text{к}}}, \quad (2)$$

де:

$m_{\text{ВР}}$ — маса вибухової речовини, кг;

$m_{\text{к}}$ — маса корпусу боеприпасу, яка бере участь в утворенні осколків:

$$m_{\text{к}} = M - m_{\text{пас}}, \quad (3)$$

де:

M — загальна маса боеприпасу (БЧ), кг;

$m_{\text{пас}}$ — пасивна маса корпусу боеприпасу, кг.

6 Прохоров-Лукин Г. В., Пащенко В. І., Биков В. І. та ін. Методика комплексного дослідження вибухових пристроїв, вибухових речовин і слідів вибуху. № ДР 0103U002003. Київ, 2011. 216 с. URL: https://arm.navs.edu.ua/arm/arm_bmb_exp/idb/metod_wte.html (дата звернення: 18.09.2025) ; Полениця П., Науменко І., Ліцман А., Нестеров Д. Методика оцінювання ефективності дії осколково-фугасного снаряда по наземних цілях. Київ, 2024. 46 с. Реєстр. код ВП 7-07(01).010.1.12.

Якщо вважати, що практично весь корпус міни (БЧ) бере участь у формуванні осколків, то за винятком маси ВР відповідно до (3) значення $m_k = 4,325 - 0,66 = 3,665$ кг. У такому разі відповідно до (2) коефіцієнт наповнення корпусу становитиме $\alpha = 0,180$.

Розрахункове значення початкової швидкості уражаючих елементів за формулою (1) дорівнюватиме $V_0 = 1053$ м/с. Ця величина початкової швидкості розльоту готових уражаючих елемен-

тів орієнтовна, визначити показники початкової швидкості розльоту готових уражаючих елементів експериментально доволі складно, особливо — швидкість окремого уражаючого елемента.

Під час експериментальної стрільби контактну швидкість уражаючого елемента перед улучанням у ціль реєстрували за допомогою оптичелектронного вимірювального комплексу ИБХ-731.4 (див. рис. 3а). Біологічні тканини імітував балістичний пластилін Weible (див. рис. 3б).



а



б

Рис. 3. Загальний вигляд вимірювального обладнання (а) і блока балістичного пластиліну (б)

Окремі уражаючі елементи вводили у вільний політ в три етапи. На першому етапі застосовували нейробалістичний ручний металевий пристрій. Це дало змогу дослідити характер пошкоджень за контактних швидкостей від 70 м/с до 110 м/с. На другому етапі стрільбу здійснювали з малокаліберної гвинтівки ТОЗ-8, що дало змогу провес-

ти дослідження в діапазоні контактних швидкостей 140–260 м/с. На заключному етапі стрільбу здійснювали з 5,45 мм автомата АК-74М з використанням спеціальних патронів калібру 5,45 × 39 (див. рис. 4). Це забезпечило отримання результатів досліджень у діапазоні контактних швидкостей 300–1082 м/с.



а



б

Рис. 4. Загальний вигляд спеціального патрона, спорядженого готовим уражаючим елементом міни ОЗМ-72 (а), і автомата АК-74М (б)

За допомогою такого підходу вдалося досягти контактних швидкостей уражаючих елементів, сумірних із розрахунковими значеннями початкових швидкостей польоту уражаючих елементів міни ОЗМ-72.

Із метою визначення особливостей формування сліпих і наскрізних пошкоджень під час проведення досліджень імітували влучання в тулуб та кінцівки біологічного об'єкта.

Під час дослідження сліпих пошкоджень визначали вплив контактної швидкості уражаючого елемента на па-

раметри каналу пошкодження та коефіцієнти сили опору середовища залежно від величини контактної швидкості й глибини проникнення в середовище.

Під час дослідження наскрізних пошкоджень визначали величини контактної швидкості уражаючого елемента та його остаточної швидкості після подолання перешкоди, утрати кінетичної енергії і масштаби завданої шкоди.

Результати експериментальних досліджень сліпих пошкоджень у товщі балістичного пластиліну представлено на рис. 5—28 і в табл. 1.

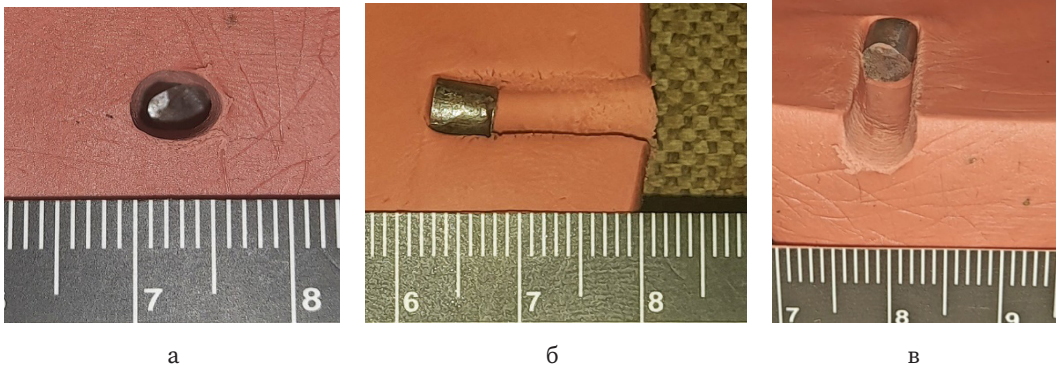


Рис. 5. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 70,5 м/с

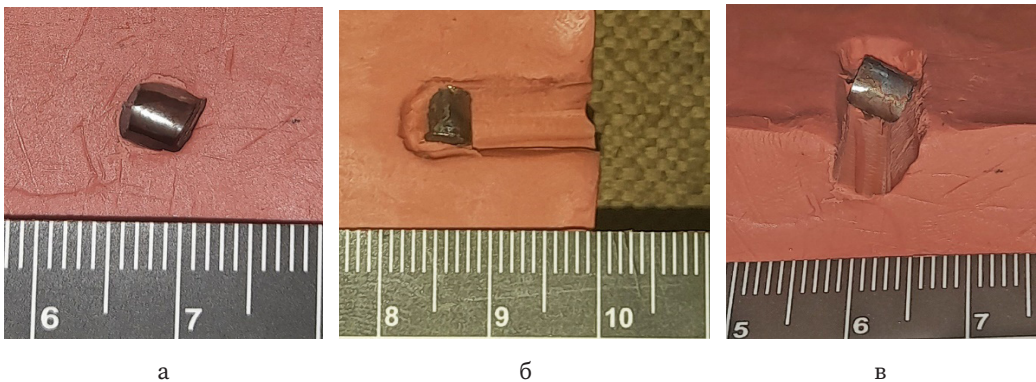


Рис. 6. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 71,2 м/с

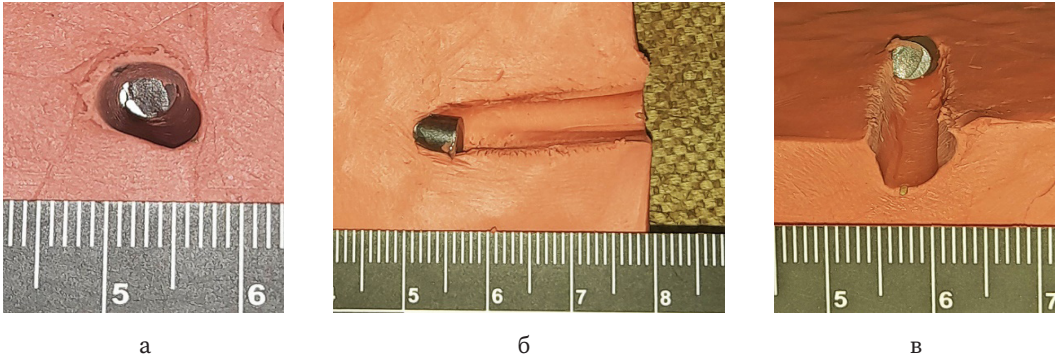


Рис. 7. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 94,0 м/с

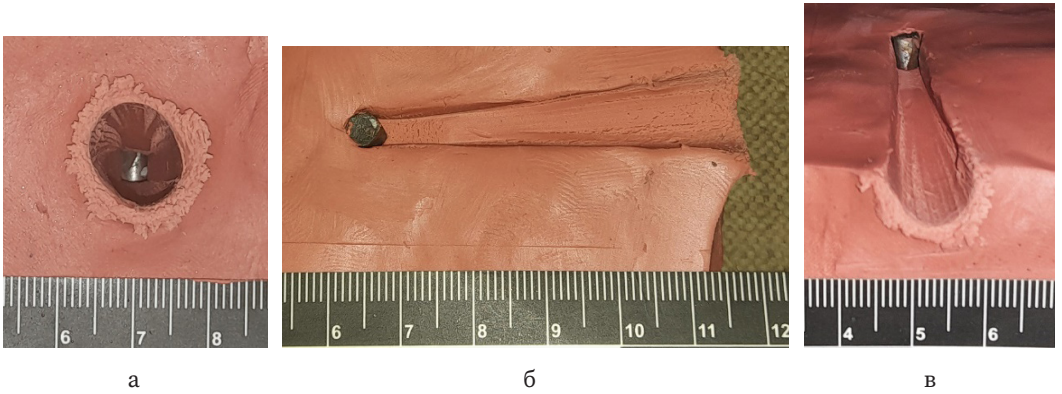


Рис. 8. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 108,2 м/с

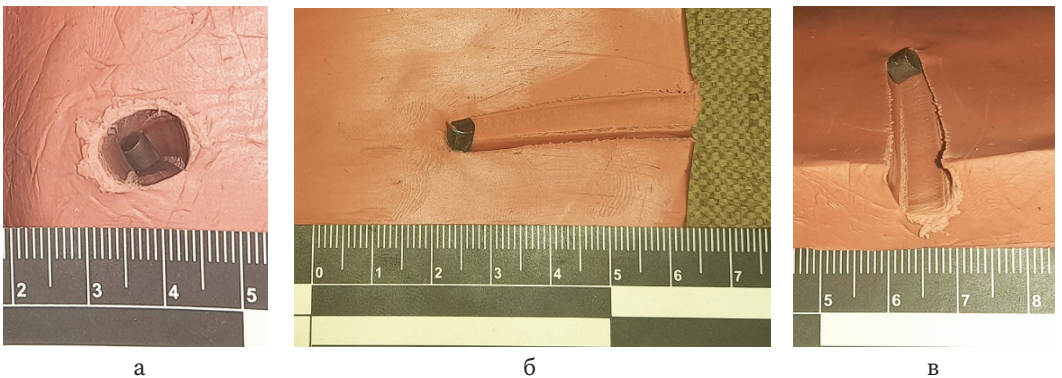


Рис. 9. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 147,5 м/с

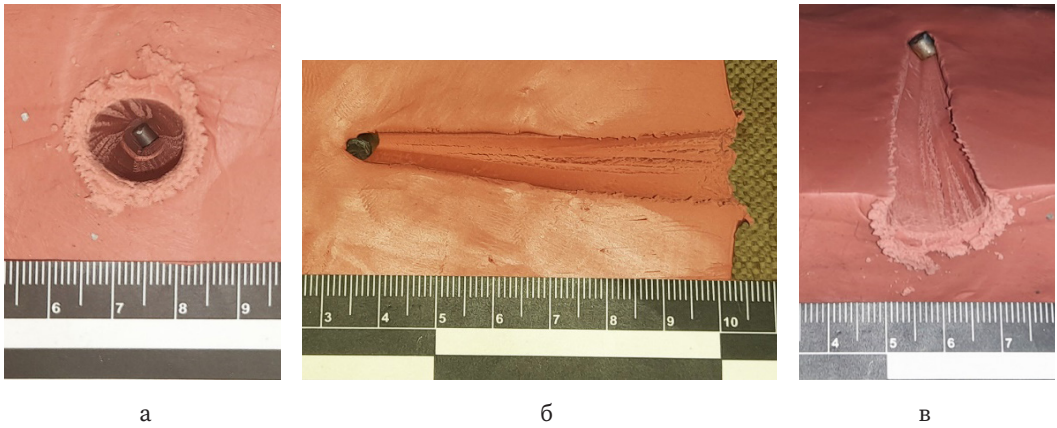


Рис. 10. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 187,0 м/с

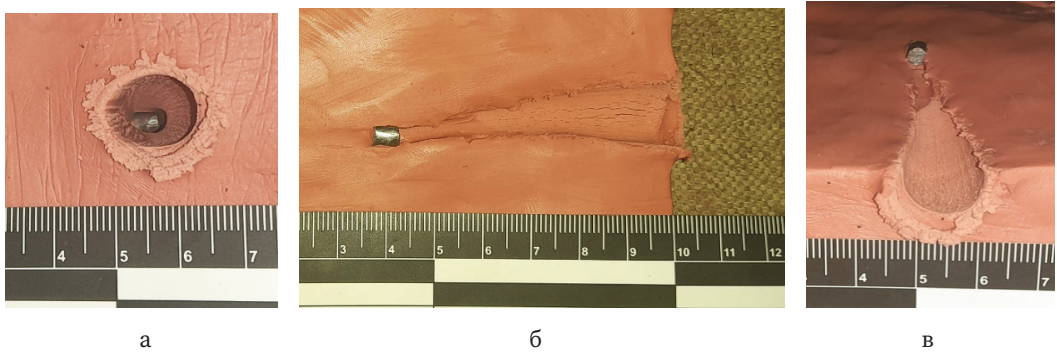


Рис. 11. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 202,2 м/с



Рис. 12. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 251,4 м/с

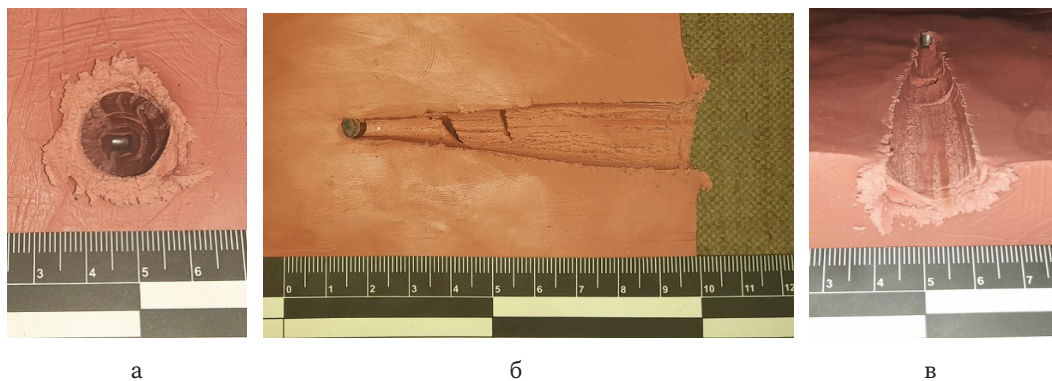


Рис. 13. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 308,4 м/с

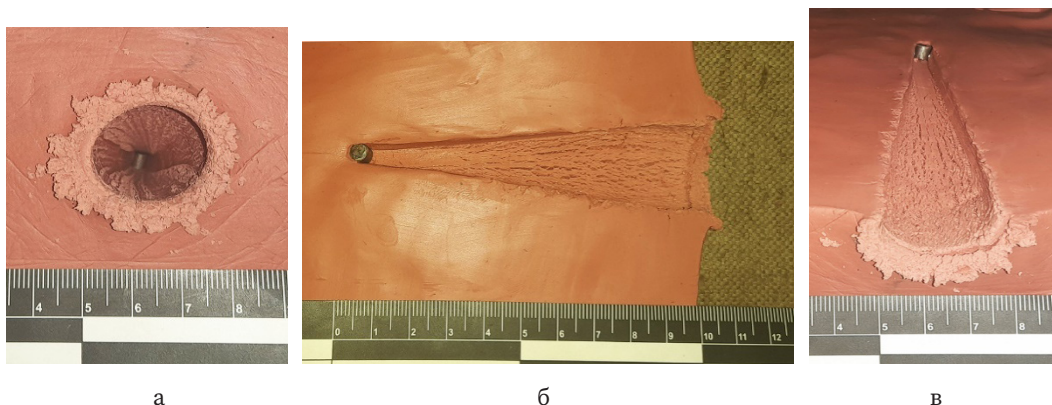


Рис. 14. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 349,1 м/с

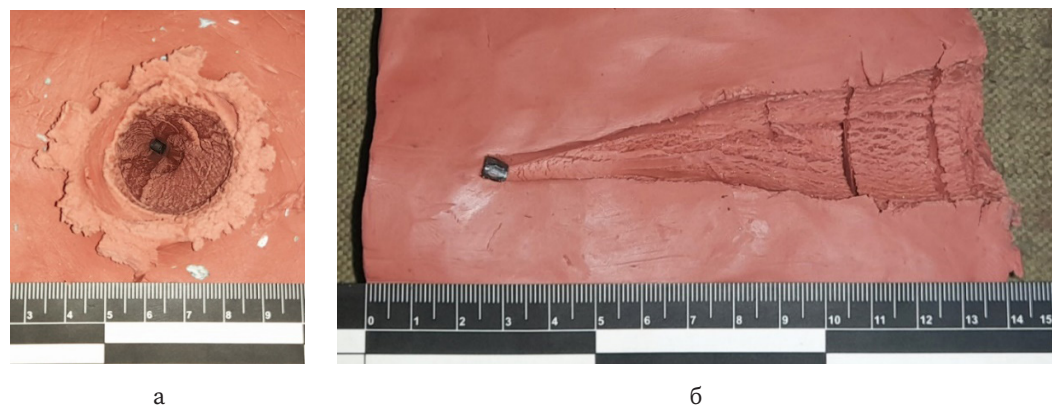


Рис. 15. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 432,1 м/с

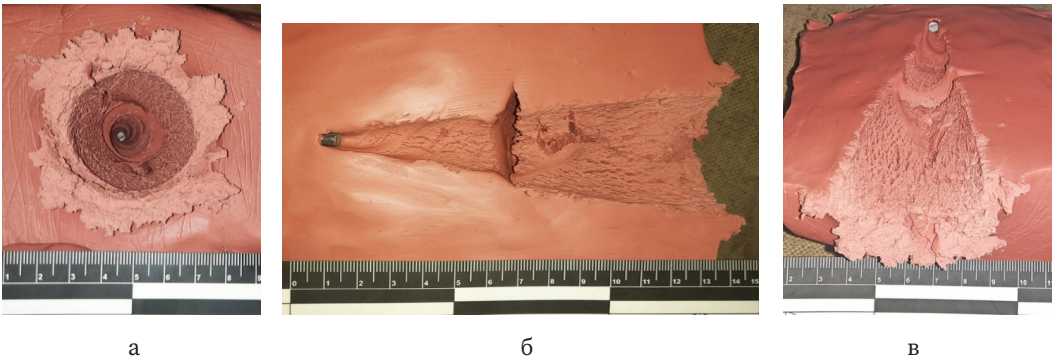


Рис. 16. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 572,2 м/с

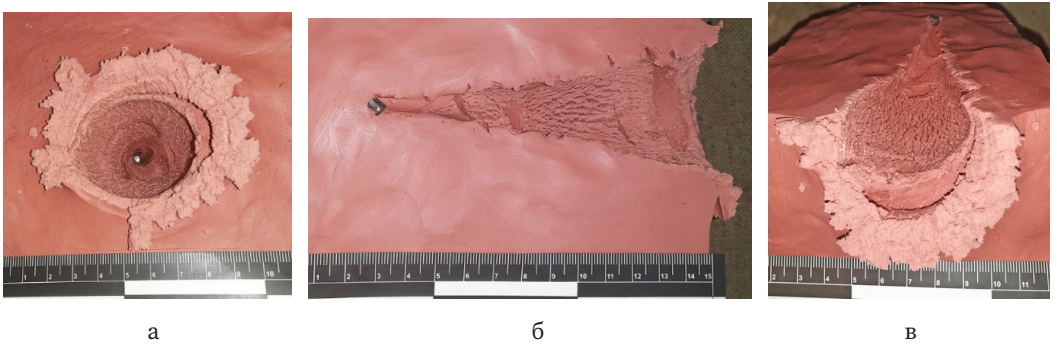


Рис. 17. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 595,9 м/с

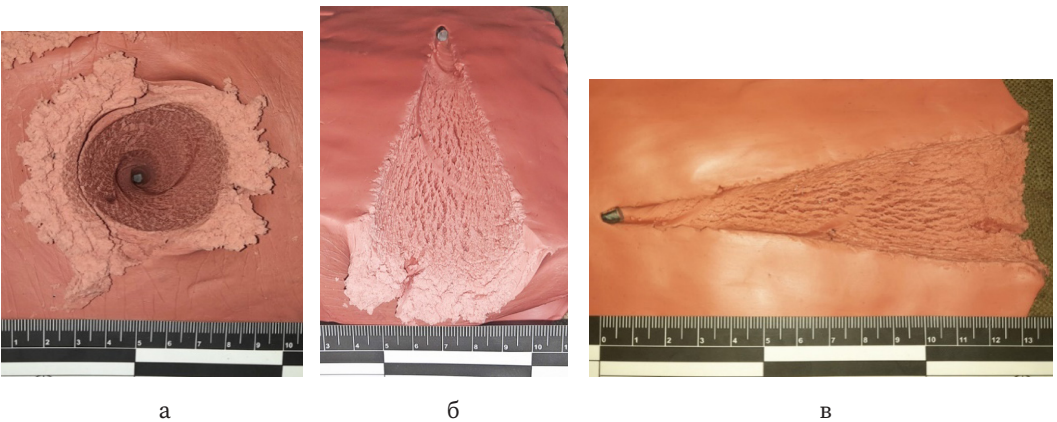
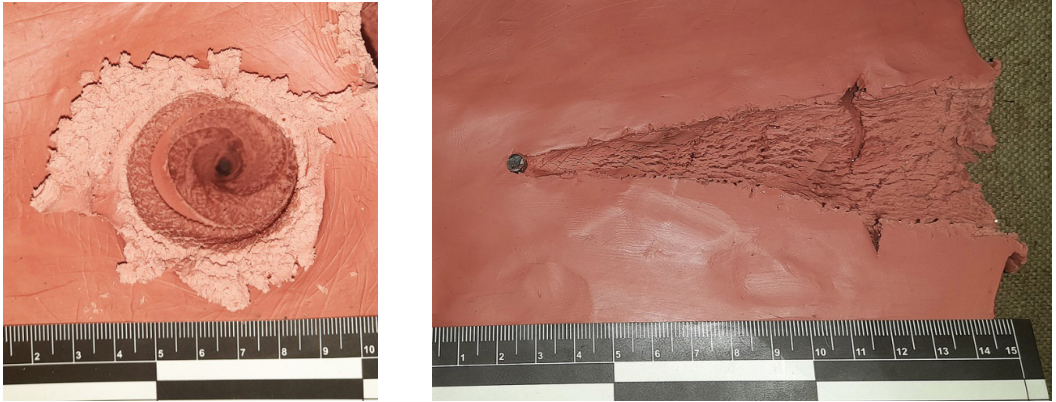


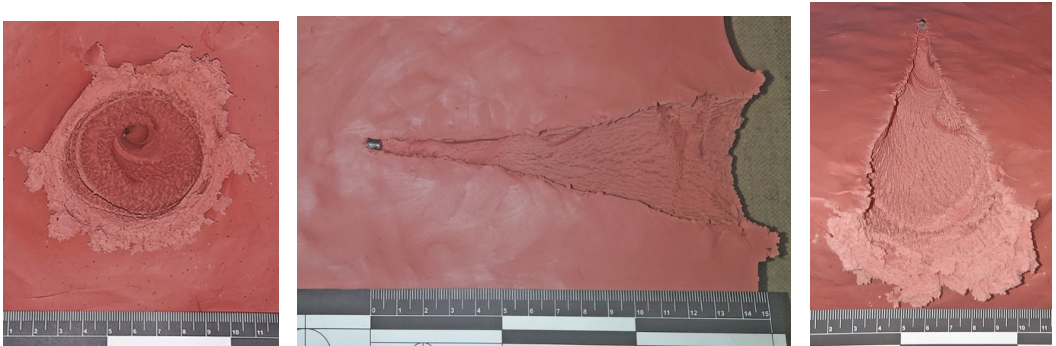
Рис. 18. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 608,9 м/с



а

б

Рис. 19. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 648,3 м/с

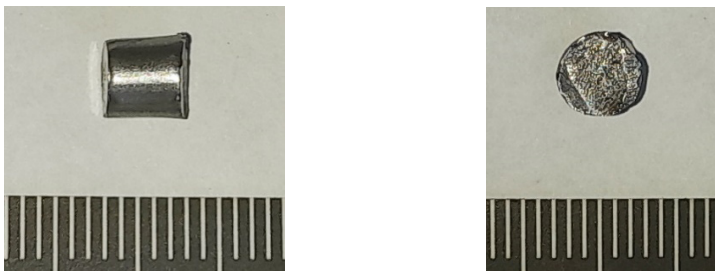


а

б

в

Рис. 20. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 712,3 м/с



а

б

Рис. 21. Загальний вигляд готового уражаючого елемента після влучання в блок балістичного пластиліну

Оскільки влучання готового уражаючого елемента в блок балістичного пластиліну сталося плоскою торцевою частиною (див. рис. 20), то він

унаслідок ударно-контактної взаємодії деформованої частини уражаючого зазнав сильного стиснення вздовж своєї елемента — 5,5 мм, недеформованої — повздовжньої осі (див. рис. 21). Діаметр 5,0 мм.

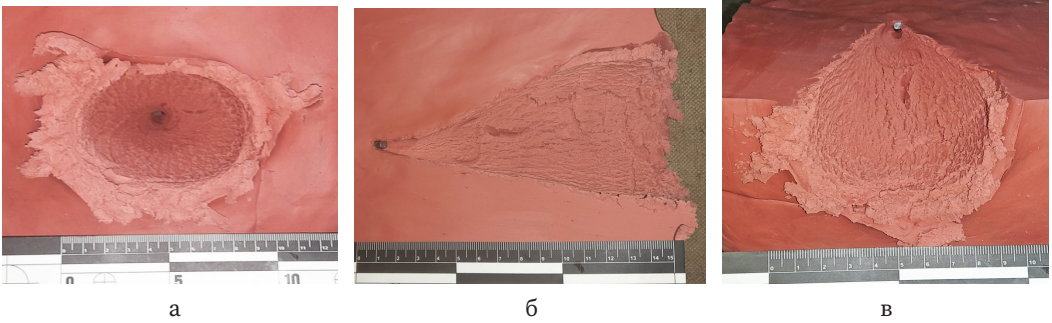


Рис. 22. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 963,2 м/с

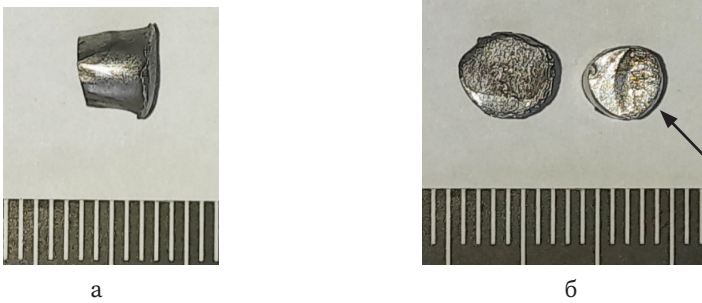


Рис. 23. Загальний вигляд готового уражаючого елемента після влучання в блок балістичного пластиліну та порівняння його із недеформованим зразком (позначено стрілкою)

Улучання готового уражаючого елемента в блок балістичного пластиліну відбулося плоскою торцевою частиною (див. рис. 22), унаслідок ударно-контактної взаємодії він зазнав сильного стиснення вздовж своєї повздовжньої осі (див. рис. 23). Діаметр деформованої частини уражаючого елемента — 6,1 мм, недеформованої — 5,0 мм.

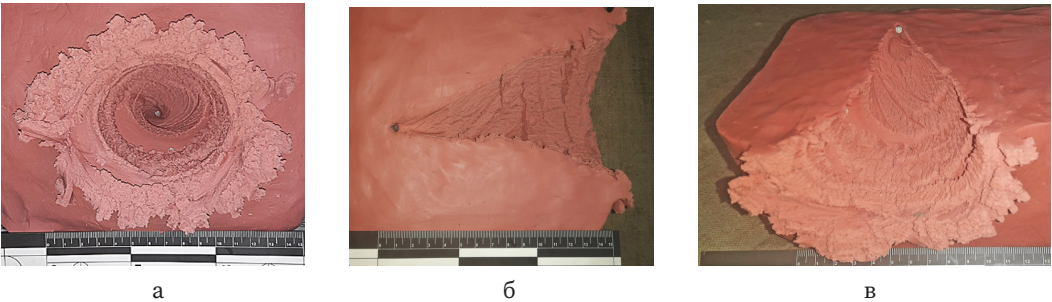


Рис. 24. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 975,6 м/с

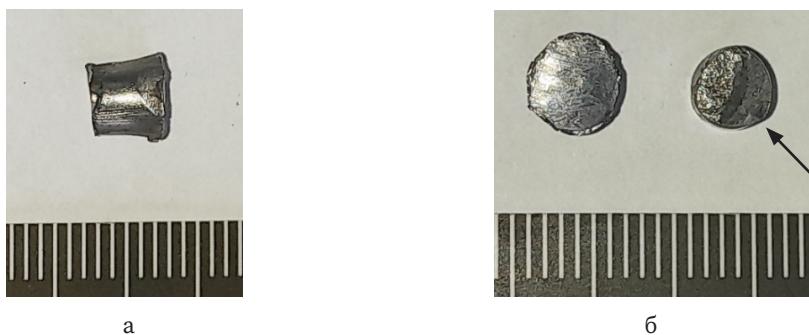


Рис. 25. Загальний вигляд готового уражаючого елемента після влучання в блок балістичного пластиліну та порівняння із недеформованим зразком (позначено стрілкою)

Улучання готового уражаючого елемента в блок балістичного пластиліну сталося плоскою торцевою частиною (див. рис. 24), унаслідок ударно-контактної взаємодії він зазнав сильного стиснення вздовж своєї повздовжньої осі (див. рис. 25). Діаметр деформованої частини уражаючого елемента — 6,2 мм, недеформованої — 5,0 мм.

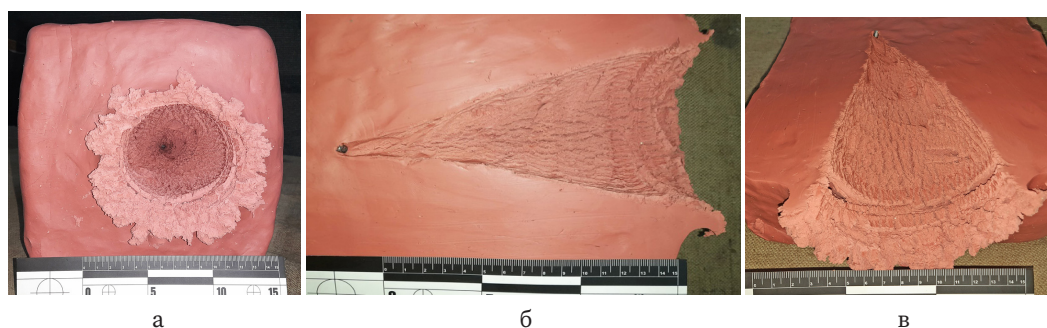


Рис. 26. Характер пошкодження балістичного пластиліну після влучання досліджуваного уражаючого елемента за контактної швидкості 1082,0 м/с

Таблиця 1

**Характеристики сліпих пошкоджень,
завданих готовими уражаючими елементами міни ОЗМ-72**

| Маса, г | Контактна швидкість, м/с | Контактна кінетична енергія, Дж | Довжина каналу пошкодження, мм | Об'єм каналу пошкодження, см ³ |
|---------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| 0,77 | 70,5 | 1,91 | 19,3 | 0,52 |
| 0,75 | 71,2 | 1,90 | 17,1 | 0,68 |
| 0,76 | 94,0 | 3,36 | 28,1 | 0,92 |
| 0,78 | 108,2 | 4,57 | 52,7 | 3,71 |
| 0,78 | 147,5 | 8,48 | 41,2 | 2,21 |
| 0,81 | 187,0 | 14,16 | 69,8 | 6,91 |
| 0,78 | 202,2 | 15,95 | 62,9 | 4,72 |
| 0,74 | 251,4 | 23,38 | 71,0 | 8,71 |
| 0,78 | 308,4 | 37,09 | 87,2 | 13,40 |

Завершення табл. 1

| Маса, г | Контактна швидкість, м/с | Контактна кінетична енергія, Дж | Довжина каналу пошкодження, мм | Об'єм каналу пошкодження, см ³ |
|---------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| 0,78 | 349,1 | 47,53 | 101,1 | 19,40 |
| 0,75 | 432,1 | 70,02 | 118,2 | 43,31 |
| 0,75 | 572,2 | 122,78 | 124,0 | 85,21 |
| 0,75 | 595,9 | 133,16 | 112,0 | 91,30 |
| 0,75 | 608,9 | 139,03 | 131,0 | 96,51 |
| 0,75 | 648,3 | 157,61 | 129,0 | 88,30 |
| 0,76 | 712,3 | 192,80 | 145,0 | 138,0 |
| 0,75 | 887,3 | 295,24 | 140,0 | 167,0 |
| 0,77 | 963,2 | 357,19 | 140,0 | 228,0 |
| 0,80 | 975,6 | 380,72 | 142,0 | 262,0 |
| 0,79 | 1082,0 | 462,44 | 171,0 | 464,0 |

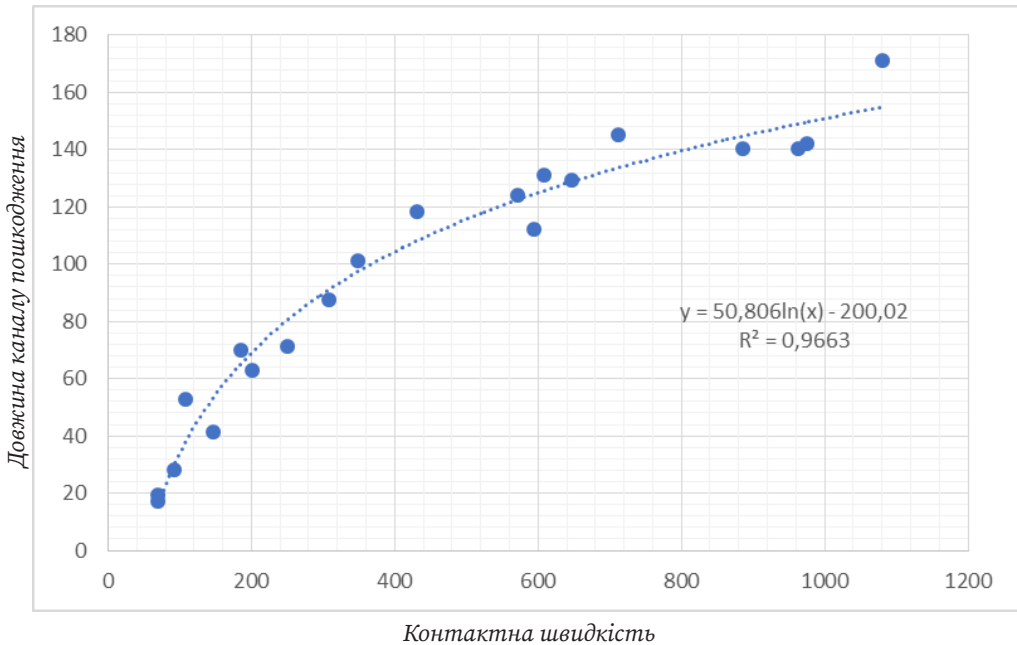


Рис. 27. Залежність довжини каналу пошкодження у в'язко-пружному середовищі від контактної швидкості уражаючого елемента

Апроксимація результатів експериментальних досліджень дає змогу прогнозувати характер завданого ушкодження та його параметри (об'єм пошкодження і глибину ранового каналу).

Окрім того, на основі емпіричної залежності (4) можна визначити граничну швидкість досліджуваного уражаючого елемента V_{gr} , за якої він зупиняється у в'язко-пружному середовищі⁷:

7 Коломійцев О., Сапелкін В., Гіверц П., Герман О. Особливості визначення уражаючих властивостей малокаліберних куль після рикошету. *Теорія та практика судової експертизи*

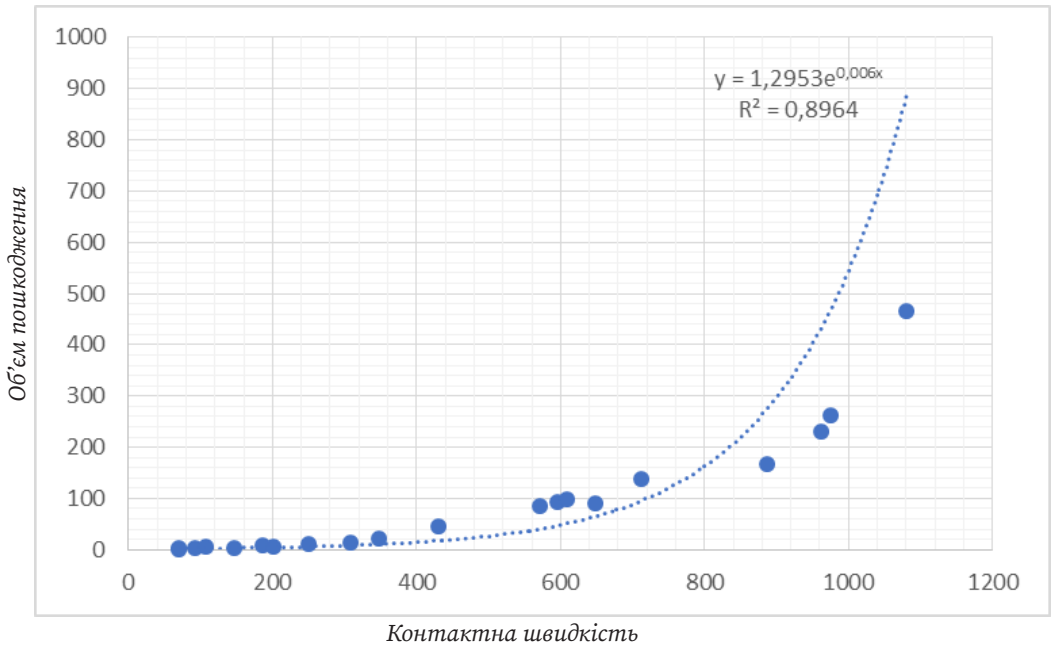


Рис. 28. Залежність об'єму пошкодження у в'язко-пружному середовищі від контактної швидкості уражаючого елемента

$$x = 50,806 \cdot \ln(V_k) - 200,02, \quad (4)$$

де:

x — довжина каналу пошкодження, мм;

V_k — швидкість уражаючого елемента в момент улучання, м/с.

Граничну швидкість V_{gr} можна визначити, якщо припустити, що уражаючий елемент проникає вглиб в'язко-пружного середовища на величину його повздовжнього розміру (залежно від положення в момент улучання) і зупиняється.

Для досліджуваного уражаючого елемента циліндричної форми діаметром 5,0 мм і середньою довжиною 5,15 мм характерно улучання в ціль:

- торцевою поверхнею ($x = 5,15$ мм, контактна площа (площа поперечного перетину) $S_1 = 0,2$ см²);
- під кутом 45° ($x = 7,18$ мм, контактна площа (площа поперечного перетину) $S_2 = 0,282$ см²);
- під кутом 90° ($x = 5,0$ мм, контактна площа (площа поперечного перетину) $S_3 = 0,26$ см²).

і криміналістики. 2022. Вип. 2 (27). С. 60–76. DOI: [10.32353/khrife.2.2022.05](https://doi.org/10.32353/khrife.2.2022.05) (дата звернення: 18.09.2025); Коломийцев А. В., Сапелкин В. В. Определение баллистических характеристик и поражающих свойств патронов самодельного снаряжения калибра 7,62×39. *Там само*. 2017. Вип. 17. С. 227–236. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tpsek_2017_17_33 (дата звернення: 18.09.2025).

Якщо припустити, що контактна швидкість дорівнюватиме граничній, то $\ln V_k = \ln V_{gr}$. Підставляючи зазначені

дані у формулу (4) можна отримати значення V_{gr} . Результати досліджень представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Значення граничної швидкості V_{gr} для досліджуваного уражаючого елемента з урахуванням його положення в момент улучання

| Параметри | Улучання в ціль | | |
|----------------|--|---|--|
| | торцевою поверхнею, $S_1 = 0,2 \text{ см}^2$ | під кутом 45° , $S_2 = 0,282 \text{ см}^2$ | під кутом 90° , $S_3 = 0,26 \text{ см}^2$ |
| x, мм | 5,15 | 7,18 | 5,0 |
| V_{gr} , м/с | 56,73 | 59,04 | 56,56 |

Ураховуючи, що графік залежності довжини каналу пошкодження від величини контактної швидкості (див. рис. 27) відображає значення для всіх положень уражаючого елемента в момент улучання, можна опосередкувати значення V_{gr} , яке становитиме 57,44 м/с. Отримані розрахункові дані щодо V_{gr} дають змогу стверджувати, що вони корелюють із даними експериментальних досліджень.

Аналіз отриманих результатів досліджень свідчить, що навіть за високих контактних швидкостей уражаючі елементи циліндричної форми зі ступенем подовження в діапазоні 1,0–1,1 (відношенням довжини до діаметра поперечного перетину) у товщі в'язко-пружного середовища поведуться доволі стабільно із завданням прямолінійних каналів.

Здобуті результати досліджень дають змогу визначити показники коефіцієнта сили опору в'язко-пружного середовища за влучання в нього циліндричного уражаючого елемента в обумовленому діапазоні контактних швидкостей (70,5–1082,0 м/с).

Коефіцієнт опору середовища C_1 можна розрахувати за формулою (5) ⁸:

$$C_1 = \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot S_i \cdot x} \ln \frac{V_c}{V_{gr}}, \quad (5)$$

де:

V_c — контактна швидкість уражаючого елемента в момент улучання, м/с;

V_{gr} — гранична швидкість уражаючого елемента, 57,44 м/с;

m — маса уражаючого елемента, г;

ρ — густина середовища, г/см³ ($\rho = 1,74 \text{ г/см}^3$);

S_i — площа поперечного перетину уражаючого елемента в момент улучання, см²;

x — довжина каналу пошкодження, см.

Результати досліджень представлено в табл. 3. Аналіз результатів досліджень і розрахунків свідчить про вплив на силу опору маси й положення уражаючого елемента. Якщо застосувати опосередковані значення маси уражаючого елемента, то за допомогою формули (4) можна розрахувати значення довжини каналу пошкодження, а за допомогою формули (5) установити відповідні значення коефіцієнта сили опору в'язко-пружного середовища. Результати розрахунків представлено в табл. 4 і на рис. 29.

8 Коломійцев О., Сапелкін В., Гіверц П., Герман О. Зазнач. твір. DOI: 10.32353/khrife.2.2022.05 (дата звернення: 18.09.2025).

Таблиця 3

**Значення коефіцієнта сили опору
 в'язко-пружного середовища C_1
 залежно від контактної швидкості й положення
 уражаючого елемента
 в момент улучання**

| Маса, г | Контактна швидкість, м/с | Довжина каналу, мм | Коефіцієнт опору середовища, C_1 | | |
|---------|--------------------------|--------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | | $S_1 = 0,2 \text{ см}^2$ | $S_2 = 0,282 \text{ см}^2$ | $S_3 = 0,26 \text{ см}^2$ |
| 0,77 | 70,5 | 19,3 | 0,470 | 0,333 | 0,361 |
| 0,75 | 71,2 | 17,1 | 0,541 | 0,384 | 0,416 |
| 0,76 | 94,0 | 28,1 | 0,766 | 0,543 | 0,589 |
| 0,78 | 108,2 | 52,7 | 0,539 | 0,382 | 0,414 |
| 0,78 | 147,5 | 41,2 | 1,026 | 0,728 | 0,789 |
| 0,81 | 187,0 | 69,8 | 0,787 | 0,558 | 0,606 |
| 0,78 | 202,2 | 62,9 | 0,897 | 0,636 | 0,690 |
| 0,74 | 251,4 | 71,0 | 0,884 | 0,627 | 0,680 |
| 0,78 | 308,4 | 87,2 | 0,864 | 0,613 | 0,665 |
| 0,78 | 349,1 | 101,1 | 0,800 | 0,567 | 0,616 |
| 0,75 | 432,1 | 118,2 | 0,736 | 0,522 | 0,566 |
| 0,75 | 572,2 | 124,0 | 0,799 | 0,567 | 0,615 |
| 0,75 | 595,9 | 112,0 | 0,900 | 0,639 | 0,693 |
| 0,75 | 608,9 | 131,0 | 0,777 | 0,551 | 0,598 |
| 0,75 | 648,3 | 129,0 | 0,810 | 0,574 | 0,623 |
| 0,76 | 712,3 | 145,0 | 0,758 | 0,538 | 0,583 |
| 0,75 | 887,3 | 140,0 | 0,843 | 0,598 | 0,648 |
| 0,77 | 963,2 | 140,0 | 0,891 | 0,632 | 0,686 |
| 0,80 | 975,6 | 142,0 | 0,917 | 0,650 | 0,705 |
| 0,79 | 1082,0 | 171,0 | 0,779 | 0,553 | 0,600 |

Аналіз графіка залежності коефіцієнта опору в'язко-пружного середовища C_1 від контактної швидкості в момент улучання свідчить, що в разі влучання уражаючого елемента міни ОЗМ-72 в тіло людини він передає значну частину своєї кінетичної енергії на ділянці першої чверті (третини) ранового каналу, що призводить до значних за об'ємом ушкоджень біологічних тканин у зонах, прилеглих до місця влучання. У міру заглиблення уражаючого елемента всередину біологічних тканин, ступінь їх ушкодження в радіальних напрямках (бокова дія) зменшується.

Це суттєво відрізняється від характеру вогнепальних поранень, завданих кулями патронів до стрілецької зброї, де, навпаки, найбільших ушкоджень біологічні тканини зазнають на серединній ділянці ранового каналу або на прикінцевій чверті (третині) ранового каналу внаслідок втрати кулею своєї гіроскопічної стійкості в результаті її нутаційних коливань.

Проте на підставі проведених досліджень можна виявити схожість характеру й параметрів пошкоджень, завданих досліджуваними уражаючими елементами, із вогнепальними пошкодженнями

Таблиця 4

Розрахункові значення довжини каналу пошкодження й коефіцієнта сили опору в'язко-пружного середовища залежно від контактних швидкостей за опосередкованого значення маси уражаючого елемента 0,77 г

| Контактна швидкість, м/с | Розрахункове значення каналу пошкодження, мм | Розрахункове значення коефіцієнта опору середовища C_1 |
|--------------------------|--|--|
| 70,5 | 16,2 | 0,560 |
| 71,2 | 16,7 | 0,569 |
| 94,0 | 30,8 | 0,708 |
| 108,2 | 38,0 | 0,737 |
| 147,5 | 53,7 | 0,777 |
| 187,0 | 65,8 | 0,794 |
| 202,2 | 69,7 | 0,799 |
| 251,4 | 80,8 | 0,809 |
| 308,4 | 91,1 | 0,816 |
| 349,1 | 97,5 | 0,819 |
| 432,1 | 108,3 | 0,825 |
| 572,2 | 122,6 | 0,830 |
| 595,9 | 124,6 | 0,831 |
| 608,9 | 125,7 | 0,831 |
| 648,3 | 128,9 | 0,832 |
| 712,3 | 133,7 | 0,833 |
| 887,3 | 144,9 | 0,836 |
| 963,2 | 149,1 | 0,837 |
| 975,6 | 149,7 | 0,837 |
| 1082,0 | 154,9 | 0,839 |

ми, завданими людині внаслідок улучань різних видів експансивних куль⁹.

Аналіз даних табл. 4 і графіка (див. рис. 29) виявив, що залежність коефіцієнта сили опору в'язко-пружного середовища C_1 від контактної швидкості уражаючого елемента V_c має формулу гіперболічної регресії:

$$C_1 = a + \frac{b}{v_c}, \quad (6)$$

де:

a, b — коефіцієнти;

C_1 — коефіцієнт сили опору в'язко-пружного середовища;

V_c — контактна швидкість уражаючого елемента в момент улучання, м/с.

9 Лурін І. А., Цема Є. В., Гуменюк К. В., Сусак Я. М., Дубенко Д. Є., Цема Є. Є. Експериментальне моделювання залишкової ранової порожнини на балістичному пластиліні з використанням стандартних та експансивних куль. *Медична наука України*. Т. 17. № 4. С. 10–17. DOI: 10.32345/2664-4738.4.2021.02 (дата звернення: 18.09.2025) ; Gumeniuk K., Lurin I., Tsema Ye., Susak Ya., Mukhaylenko O., Nehoduiko V. et al. Woundary ballistics of biological tissue's plastic deformation on the model of ballistic plastiline using hollow point and shape-stable bullets. *Journal of Education, Health and Sport*. 2021. Vol. 11. No. 11. Pp. 37–57. DOI: 10.12775/JEHS.2021.11.11.003 (дата звернення: 18.09.2025).

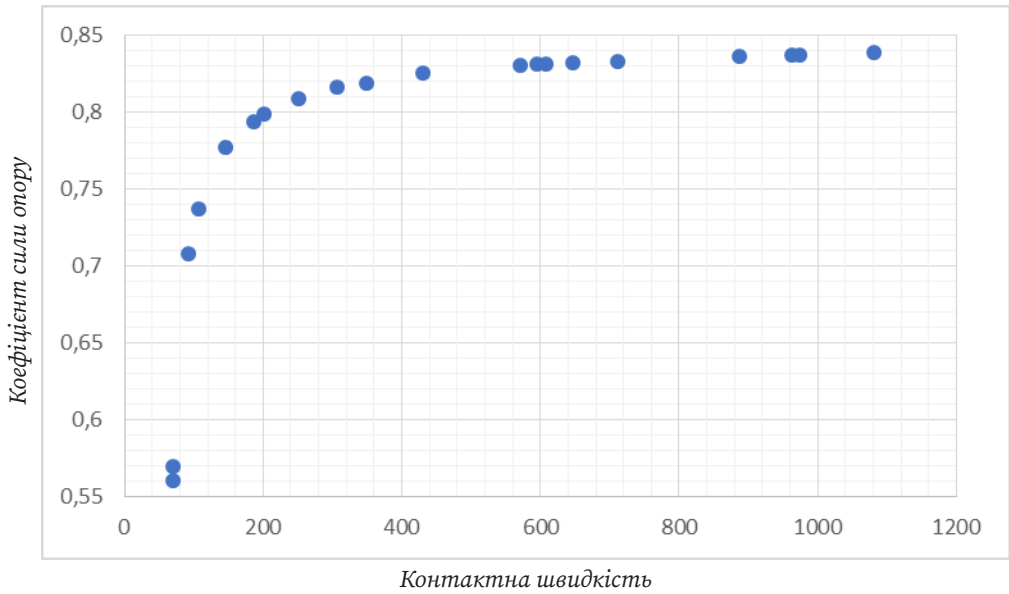


Рис. 29. Графік залежності коефіцієнта сили опору в'язко-пружного середовища C_1 від контактної швидкості уражаючого елемента V_c

За допомогою даних табл. 4 можна визначити значення коефіцієнтів зазначеної регресії (див. табл. 5).

Таблиця 5

Допоміжні величини значень C_1 і V_c

| i | $x_i (V_c)$ | $y_i (C_1)$ | $1/x_i$ | $1/x_i^2$ | y_i/x_i |
|-----|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| 1 | 70,5 | 0,560 | 0,0141844 | 0,01418440 | 0,0002012 |
| 2 | 71,2 | 0,569 | 0,01404494 | 0,01404494 | 0,00019726 |
| 3 | 94,0 | 0,708 | 0,0106383 | 0,01063830 | 0,00011317 |
| 4 | 108,2 | 0,737 | 0,00924214 | 0,00924214 | 8,5417E-05 |
| 5 | 147,5 | 0,777 | 0,00677966 | 0,00677966 | 4,5964E-05 |
| 6 | 187,0 | 0,794 | 0,00534759 | 0,00534759 | 2,8597E-05 |
| 7 | 202,2 | 0,799 | 0,0049456 | 0,00494560 | 2,4459E-05 |
| 8 | 251,4 | 0,809 | 0,00397772 | 0,00397772 | 1,5822E-05 |
| 9 | 308,4 | 0,816 | 0,00324254 | 0,00324254 | 1,0514E-05 |
| 10 | 349,1 | 0,819 | 0,00286451 | 0,00286451 | 8,2054E-06 |
| 11 | 432,1 | 0,825 | 0,00231428 | 0,00231428 | 5,3559E-06 |
| 12 | 572,2 | 0,830 | 0,00174764 | 0,00174764 | 3,0542E-06 |
| 13 | 595,9 | 0,831 | 0,00167813 | 0,00167813 | 2,8161E-06 |
| 14 | 608,9 | 0,831 | 0,00164231 | 0,00164231 | 2,6972E-06 |
| 15 | 648,3 | 0,832 | 0,0015425 | 0,00154250 | 2,3793E-06 |
| 16 | 712,3 | 0,833 | 0,0014039 | 0,00140390 | 1,9709E-06 |
| 17 | 887,3 | 0,836 | 0,00112701 | 0,00112701 | 1,2702E-06 |

Завершення табл. 5

| i | $x_i (V_c)$ | $y_i (C_1)$ | $1/x_i$ | $1/x_i^2$ | y_i/x_i |
|----------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| 18 | 963,2 | 0,837 | 0,00103821 | 0,00103821 | 1,0779E-06 |
| 19 | 975,6 | 0,837 | 0,00102501 | 0,00102501 | 1,0506E-06 |
| 20 | 1082,0 | 0,839 | 0,00092421 | 0,00092421 | 8,5417E-07 |
| Σ | 9267,3 | 15,719 | 0,08971061 | 0,08971061 | 0,00075314 |

За даними табл. 5 емпірична залежність коефіцієнта сили опору середовища C_1 від контактної швидкості V_c матиме такий вигляд:

$$C_1 = 0,8696 - \frac{18,6413}{V_c}, \quad (7)$$

де коефіцієнти a , b розраховано як:

$$b = \frac{n \sum \frac{y_i}{x_i} - \sum \frac{1}{x_i} \sum y_i}{n \sum \frac{1}{x_i^2} - (\sum \frac{1}{x_i})^2} = -18,6413;$$

$$a = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{b}{n} \sum \frac{1}{x_i} = 0,8696.$$

Для оцінювання значущості параметрів регресії та кореляції необхідно визначити середнє значення коефіцієн-

та сили опору $\overline{C_1}$, індекс кореляції, індекс детермінації та середню помилку апроксимації (див. табл. 6).

Коефіцієнт сили опору дорівнює:

$$\overline{C_1} = \overline{y}_1 = \frac{1}{n} \sum y_i = 0,7859;$$

індекс кореляції:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \overline{y})^2}} = 0,9615;$$

індекс детермінації: $R^2 = 0,9246$;

середня помилка апроксимації:

$$\overline{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% = 2,4925 \%$$

Таблиця 6

Допоміжні величини

| i | $x_i (V_c)$ | $y_i (C_1)$ | \hat{y}_i | $y_i - \overline{y}_1$ | $(y_i - \overline{y}_1)^2$ | ϵ_i | ϵ_i^2 | A_i | $\Delta \epsilon_i$ | $(\Delta \epsilon_i)^2$ |
|----|-------------|-------------|-------------|------------------------|----------------------------|--------------|----------------|--------|---------------------|-------------------------|
| 1 | 70,5 | 0,560 | 0,6052 | -0,2259 | 0,0511 | -0,0452 | 0,002 | 0,0806 | — | — |
| 2 | 71,2 | 0,569 | 0,6078 | -0,2169 | 0,0471 | -0,0388 | 0,0015 | 0,0681 | 0,0064 | 0 |
| 3 | 94,0 | 0,708 | 0,6713 | -0,0779 | 0,0061 | 0,0367 | 0,0014 | 0,0519 | 0,0755 | 0,0057 |
| 4 | 108,2 | 0,737 | 0,6973 | -0,0489 | 0,0024 | 0,0397 | 0,0016 | 0,0539 | 0,0030 | 0 |
| 5 | 147,5 | 0,777 | 0,7432 | -0,0089 | 0,0001 | 0,0338 | 0,0011 | 0,0435 | -0,0059 | 0 |
| 6 | 187,0 | 0,794 | 0,7699 | 0,0081 | 0,0001 | 0,0241 | 0,0006 | 0,0304 | -0,0097 | 0,001 |
| 7 | 202,2 | 0,799 | 0,7774 | 0,0131 | 0,0002 | 0,0216 | 0,0005 | 0,0271 | -0,0025 | 0 |
| 8 | 251,4 | 0,809 | 0,7955 | 0,0231 | 0,0005 | 0,0135 | 0,0002 | 0,0168 | -0,0080 | 0,001 |
| 9 | 308,4 | 0,816 | 0,8092 | 0,0301 | 0,0009 | 0,0069 | 4,7E-05 | 0,0084 | -0,0067 | 0 |
| 10 | 349,1 | 0,819 | 0,8162 | 0,0331 | 0,0011 | 0,0028 | 7,8E-06 | 0,0035 | -0,0040 | 0 |
| 11 | 432,1 | 0,825 | 0,8265 | 0,0391 | 0,0015 | -0,0014 | 2,1E-06 | 0,0017 | -0,0043 | 0 |
| 12 | 572,2 | 0,830 | 0,837 | 0,0441 | 0,0019 | -0,0070 | 4,9E-05 | 0,0084 | -0,0056 | 0 |

Завершення табл. 6

| i | $x_i (V_c)$ | $y_i (C_1)$ | \widehat{y}_i | $y_i - \widehat{y}_i$ | $(y_i - \widehat{y}_i)^2$ | ε_i | ε_i^2 | A_i | $\Delta\varepsilon_i$ | $(\Delta\varepsilon_i)^2$ |
|----------|-------------|-------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|-------------------|--------|-----------------------|---------------------------|
| 13 | 595,9 | 0,831 | 0,8383 | 0,0451 | 0,0020 | -0,0073 | 5,4E-05 | 0,0088 | -0,0003 | 0 |
| 14 | 608,9 | 0,831 | 0,839 | 0,0451 | 0,0020 | -0,0080 | 6,4E-05 | 0,0096 | -0,0007 | 0 |
| 15 | 648,3 | 0,832 | 0,8408 | 0,0461 | 0,0021 | -0,0088 | 7,8E-05 | 0,0106 | -0,0009 | 0 |
| 16 | 712,3 | 0,833 | 0,8434 | 0,0471 | 0,0022 | -0,0104 | 0,0001 | 0,0125 | -0,0016 | 0 |
| 17 | 887,3 | 0,836 | 0,8486 | 0,0501 | 0,0025 | -0,0126 | 0,0002 | 0,0150 | -0,0022 | 0 |
| 18 | 963,2 | 0,837 | 0,8502 | 0,0511 | 0,0026 | -0,0132 | 0,0002 | 0,0158 | -0,0007 | 0 |
| 19 | 975,6 | 0,837 | 0,8505 | 0,0511 | 0,0026 | -0,0135 | 0,0002 | 0,0161 | -0,0002 | 0 |
| 20 | 1082,0 | 0,839 | 0,8524 | 0,0531 | 0,0028 | -0,0134 | 0,0002 | 0,0159 | 0,0001 | 0 |
| Σ | — | — | — | — | 0,1318 | — | 0,0099 | 0,4985 | — | 0,0061 |

F — критерій Фішера:

- критичний (табличний): $F_{\text{tabl}} = F(\alpha, k_1, k_2) = F(0,05; 1; 18) = 4,4139$;
- фактичний:

$$F_{\text{fakt}} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1} = 220,5979.$$

До того ж: $k_1 = m = 1$; $k_2 = n - m - 1 = 18$; $\alpha = 0,05$; де m — число параметрів за змінних рівнянь регресії.

Критерій Дарбіна-Вотсона фактичний: $d = \frac{\Sigma(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\Sigma\varepsilon_i^2} = 0,6102$.

Аналіз здобутих результатів свідчить про високу достовірність апроксимації експериментальних даних. Дані експериментів доволі добре корелюються із розрахунковими, що дає змогу здійснювати обчислення глибини проникнення досліджуваного уражаючого елемента

з доволі високим ступенем достовірності.

Наступний етап досліджень полягав у визначенні особливостей формування наскрізного пошкодження у блоці балістичного пластиліну, що дало змогу встановити якісні показники процесу формування осколкового поранення кінцівок людини.

Під час експериментальних досліджень отримано дані щодо контактних швидкостей улучання, швидкостей уражаючих елементів після подолання перешкоди, а також дані щодо витрат кінетичної енергії на пробиття блока балістичного пластиліну певної товщини та значення коефіцієнтів сили опору середовища. Результати досліджень представлено в табл. 7, 8 і на рис. 30–33.

Таблиця 7

Характеристики наскрізних пошкоджень, завданих готовими уражаючими елементами міни ОЗМ-72

| Маса, г | Контактна швидкість, м/с | Контактна кінетична енергія, Дж | Довжина каналу пошкодження, мм | Об'єм каналу пошкодження, см ³ |
|---------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| 0,75 | 770,4 | 222,57 | 145 | 130,9 |
| 0,77 | 856,0 | 282,10 | 140 | 224,8 |
| 0,75 | 1027,0 | 395,52 | 148 | 297,6 |
| 0,75 | 1066,0 | 426,13 | 90 | 352,4 |

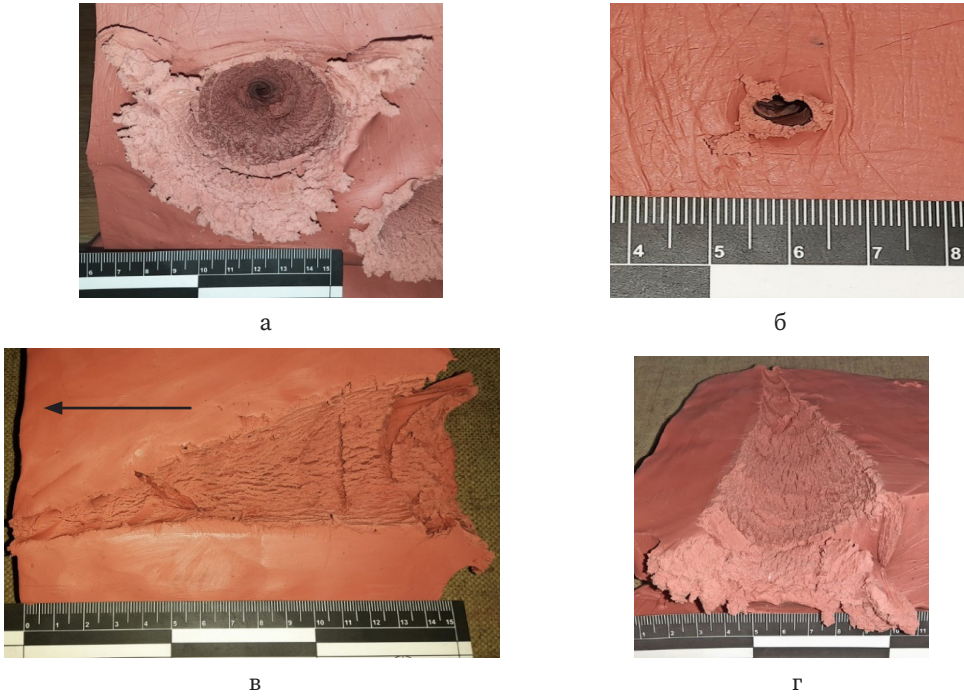


Рис. 30. Загальний вигляд вхідного отвору (а), вихідного отвору (б) і каналу пошкодження (в, г), завданого влучанням уражаючого елемента за контактної швидкості 770,4 м/с (напрямок руху уражаючого елемента позначено стрілкою)

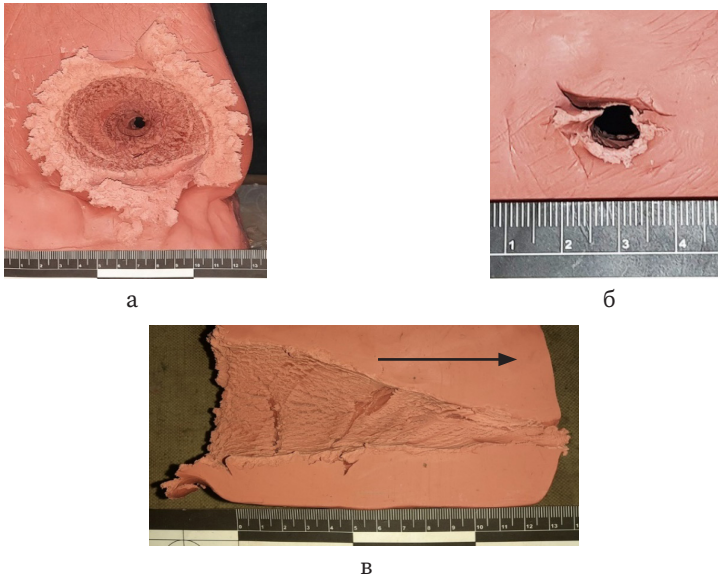


Рис. 31. Загальний вигляд вхідного отвору (а), вихідного отвору (б) і каналу пошкодження (в), завданого влучанням уражаючого елемента за контактної швидкості 856,0 м/с (напрямок руху уражаючого елемента позначено стрілкою)

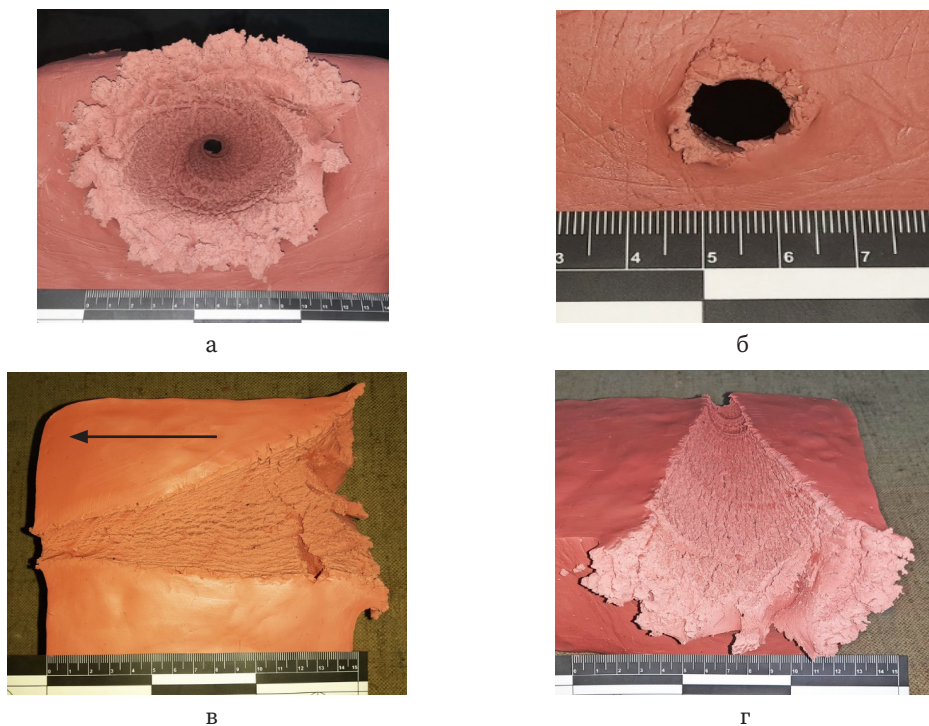


Рис. 32. Загальний вигляд вхідного отвору (а), вихідного отвору (б) і каналу пошкодження (в, г), завданого влучанням уражаючого елемента за контактної швидкості 1027,0 м/с (напрямок руху уражаючого елемента позначено стрілкою)

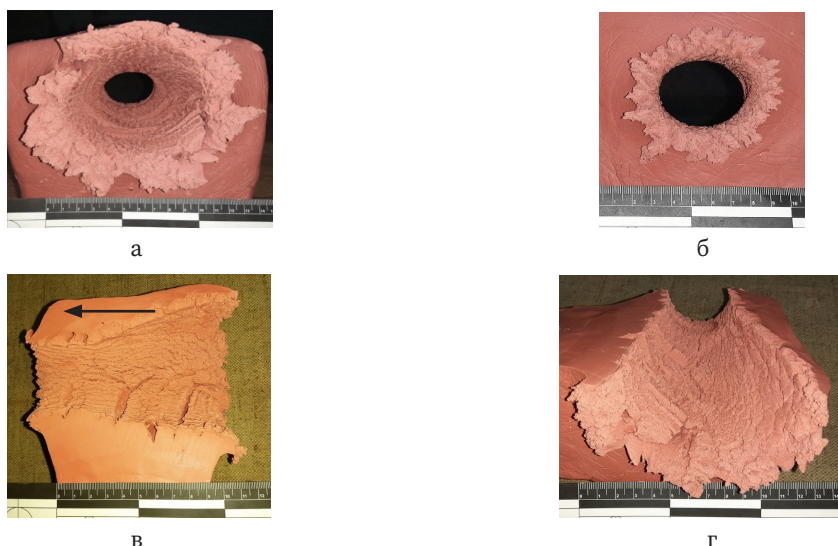


Рис. 33. Загальний вигляд вхідного отвору (а), вихідного отвору (б) і каналу пошкодження (в, г), завданого влучанням уражаючого елемента за контактної швидкості 1066,0 м/с (напрямок руху уражаючого елемента позначено стрілкою)

Таблиця 8

Утрати кінетичної енергії уражаючих елементів міни ОЗМ-72 в момент пробиття блока балістичного пластиліну

| Маса, г | Контактна швидкість, м/с | Довжина каналу, мм | Швидкість після пробиття, м/с | Контактна кінетична енергія, Дж | Кінетична енергія після пробиття, Дж | Утрати кінетичної енергії, Дж |
|---------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 0,75 | 770,4 | 145 | 24,2 | 222,57 | 0,22 | 222,35 |
| 0,77 | 856,0 | 140 | 44,8 | 282,10 | 0,77 | 281,33 |
| 0,75 | 1027,0 | 148 | 86,5 | 395,52 | 2,81 | 392,71 |
| 0,75 | 1066,0 | 90 | 190,6 | 426,13 | 13,62 | 412,51 |

Застосовуючи формулу (5) із заміною граничного значення швидкості V_{gr} на значення швидкості уражаючого елемента після подолання (пробиття) перешкоди (кінцеве) V_p , на основі даних табл. 4 можна отримати значення ко-

ефіцієнта сили опору в'язко-пружного середовища C_1 для діапазону контактних швидкостей 770,4–1066 м/с і залежно від положення уражаючого елемента в момент улучання. Результати розрахунків представлено в табл. 9.

Таблиця 9

Значення коефіцієнта опору середовища C_1 в діапазоні контактних швидкостей уражаючих елементів 770,4–1066,0 м/с

| Маса, г | Контактна швидкість, м/с | Довжина каналу, мм | Швидкість після пробиття, м/с | Коефіцієнт опору середовища C_1 за площі поперечного перетину | | |
|---------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|---|----------------------------|---------------------------|
| | | | | $S_1 = 0,2 \text{ см}^2$ | $S_2 = 0,282 \text{ см}^2$ | $S_3 = 0,26 \text{ см}^2$ |
| 0,75 | 770,4 | 145 | 24,2 | 0,775 | 0,542 | 0,597 |
| 0,77 | 856,0 | 140 | 44,8 | 0,858 | 0,599 | 0,661 |
| 0,75 | 1027,0 | 148 | 86,5 | 0,843 | 0,589 | 0,649 |
| 0,75 | 1066,0 | 90 | 190,6 | 1,405 | 0,982 | 1,081 |

Аналіз даних щодо питомого значення втрат кінетичної енергії на одиницю довжини ранового каналу доволі неоднозначний. За контактної швидкості 770,4 м/с втрати кінетичної енергії на 1 см каналу пошкодження становлять 15,33 Дж/см, за швидкості 856,0 м/с — 20,01 Дж/см, за швидкості 1027,0 м/с — 26,53 Дж/см (за сумірної товщини пробитої наскрізь перешкоди 14,5 см, 14,0 см і 14,8 см відповідно). Так само менша товщина перешкоди (9,0 см) призводить до значного зростання втрат кінетичної енергії на одиницю довжини каналу пошкодження (45,83 Дж/см), хоча за сумірних зна-

чень контактних швидкостей (1027 м/с та 1066 м/с) втрати за меншої товщини перешкоди в 1,73 рази перевищують втрати кінетичної енергії за більшої товщини перешкоди.

Це може бути обумовлено таким: під час проведення експериментальних досліджень встановлено, що за швидкостей понад 700 м/с і в разі контакту уражаючого елемента торцевою поверхнею із блоком балістичного пластиліну наявні суттєві пластичні деформації уражаючого елемента в осьовому напрямку (див. рис. 21, 23, 25).

Водночас навіть за максимальної швидкості 1082 м/с і в разі влучання

уражаючого елемента боковою поверхнею таких деформацій не виявлено.

Отже, різке збільшення питомих утрат кінетичної енергії можна пояснити значними деформаціями торцевої частини уражаючого елемента, якою він улучив у перешкоду. Це призвело до збільшення контактної поверхні й, відповідно, до значного зростання сил опору в'язко-пружного середовища, про що свідчить характер вхідного та вихідного отворів пошкодження (див. рис. 33).

На підставі результатів проведених досліджень ми отримали емпіричні залежності для визначення параметрів поранень, завданих улучаннями в біологічні тканини готових уражаючих елементів циліндричної форми діаметром 5,0 мм. На їх основі можна прогнозувати об'єм остаточної порожнини ушкодження, що дає змогу визначити максимальні зони руйнації шарів біологічних тканин, які прилягають до ранового каналу, а також довжину ранового каналу, який може утворитися внаслідок улучання означеного уражаючого елемента залежно від його швидкості в момент улучання. Окрім того, можна визначити характеристики наскрізних ушкоджень і швидкість уражаючого елемента після подолання перешкоди. Продемонструємо це на прикладі.

Необхідно визначити уражаючі показники готового уражаючого елемента міни ОЗМ-72, швидкість якого в момент улучання становила 800 м/с.

Із урахуванням середніх значень маси уражаючого елемента 0,77 г, його діаметра 5,0 мм і довжини 5,15 мм ці показники становитимуть:

- довжина ранового каналу — 13,96 см;
- об'єм завданих ушкоджень — 157,4 см³;
- значення кінетичної енергії в момент улучання — 246,4 Дж;

- значення питомої кінетичної енергії — 12,32 Дж/мм² (торцевою поверхнею: $S_1 = 0,2$ см²); 8,74 Дж/мм² (під кутом 45°: $S_2 = 0,282$ см²); 9,48 Дж/мм² (під кутом 90°: $S_3 = 0,26$ см²);
- значення коефіцієнта сили опору в'язко-пружного середовища C_1 — 0,846.

У разі влучання готового уражаючого елемента в кінцівку людини за сумірної довжини ранового каналу 10 см швидкість уражаючого елемента після пробиття можна розрахувати за формулою з урахуванням припущення щодо відсутності пластичних деформацій уражаючого елемента внаслідок його ударно-контактної взаємодії із перешкодою:

$$V_i = V_c \cdot e^{-\frac{C_1 \rho \cdot S_i}{2m} \cdot x}. \quad (8)$$

Після підстановки відповідних значень V_{10} отримаємо:

- 257,5 м/с (торцевою поверхнею: $S_1 = 0,2$ см²);
- 161,8 м/с (під кутом 45°: $S_2 = 0,282$ см²);
- 183,3 м/с (під кутом 90°: $S_3 = 0,26$ см²).

Порівнянням значень табл. 9 з розрахунковими значеннями (без урахування пластичних деформацій уражаючого елемента) визначено суттєві розбіжності (див. табл. 10). Аналіз табличних даних свідчить про неоднозначність виконаних розрахунків. Розбіжності можна пояснити тим, що під час ударно-контактної взаємодії уражаючий елемент суттєво деформується, що призводить до значного збільшення контактної площі й, відповідно, до збільшення сил опору та зниження швидкості після подолання перешкоди. Ураховувати це, виконуючи розрахунки, доволі складно.

Порівняння розрахункових значень швидкості уражаючого елемента після подолання перешкоди з результатами експериментальних досліджень і відповідні розрахункові значення контактної площі й еквівалентного діаметра уражаючого елемента

| V_c , м/с | V_p , м/с | $V_{i\text{роз.}}$, м/с | x , см | $S_{i\text{роз.}}$, см ² | $d_{i\text{роз.}}$, см |
|-------------|-------------|--------------------------|----------|--------------------------------------|-------------------------|
| 770,4 | 24,2 | 155,7 | 14,5 | 0,432 | 0,74 |
| 856,0 | 44,8 | 90,9 | 14,0 | 0,371 | 0,69 |
| 1027,0 | 86,5 | 121,2 | 14,8 | 0,301 | 0,62 |
| 1066,0 | 190,6 | 391,9 | 9,0 | 0,344 | 0,66 |

Примітка. $S_{i\text{роз.}}$ — еквівалентна площа поперечного перетину уражаючого елемента; $d_{i\text{роз.}}$ — еквівалентний діаметр циліндричного уражаючого елемента.

Отриманий масив даних щодо параметрів процесу формування осколкового поранення дає змогу створити математичну модель ударно-контактної взаємодії досліджуваного зразка уражаючого елемента із в'язко-пружним середовищем, яке імітує біологічні тканини тіла людини¹⁰.

Створити таку модель можна за допомогою комп'ютерної симуляції із застосуванням методу скінченних елементів з явною схемою інтегрування у часі та технології «смерті елементів» для моделювання процесу руйнування матеріалу (проникнення уражаючого елемента в блок імітатора м'яких тканин тіла людини; див. рис. 34)¹¹.

10 Tsybaliuk V. et al. Op. cit. DOI: 10.26641/2307-0404.2023.1.275866 (дата звернення: 18.09.2025); Коломійцев О., Гіверц П., Нікітюк В., Герман О. Застосування комп'ютерних технологій для розв'язання завдань термінальної балістики. *Діджиталізація судово-експертної науки в умовах воєнного стану* : мат-ли Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 08.11.2024). Харків. 2024. С. 169—173. URL: <https://drive.google.com/file/d/1cDRJ14KDOGIXe5Y6HdNVBzqAS7gbR-ML/view> (дата звернення: 19.09.2025); Susu L., Cheng X., Yaoke W., Xiao Yun Zh. A new motion model of rifle bullet penetration into ballistic gelatin. *International Journal of Impact Engineering*. 2016. Vol. 93. Pp. 1—10. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.02.003 (дата звернення: 19.09.2025); Gilson L., Rabet L., Imad A., Kakogiannis D., Coghe F. Development of a numerical model for the ballistic penetration of Fackler gelatine by small calibre projectiles. *The European Physical Journal Special Topics*. 2016. Vol. 225 (2). Pp. 375—384. DOI: 10.1140/epjst/e2016-02640-9 (дата звернення: 19.09.2025); Wang Y., Shi X., Chen A., Xu Ch. The experimental and numerical investigation of pistol bullet penetrating soft tissue simulant. *Forensic Science International*. 2015. Vol. 249. Pp. 271—279. DOI: 10.1016/j.forsciint.2015.02.013 (дата звернення: 19.09.2025); Gilson L., Rabet L., Imad A., Coghe F. Experimental and numerical characterisation of rheological properties of a drop test response of a ballistic plastilina. *Ibid.* 2020. Vol. 310. Art. 110238. DOI: 10.1016/j.forsciint.2020.110238 (дата звернення: 19.09.2025).

11 Larin O., Tomashevskiy R., Lurin I., Gumeniuk K., Nehoduiko V. Computational Modeling and Analysis of Wound Formation in Gunshot Injuries. *6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering* : Conference proceedings (Chisinau, Moldova, 20—23 Sept 2023). Chisinau, 2023. Vol. 2 : Biomedical Engineering and New Technologies for Diagnosis, Treatment, and Rehabilitation. Pp. 218—227. DOI: 10.1007/978-3-031-42782-4_24 (дата звернення: 19.09.2025); 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. *Ibid.* Pp. 160—169. DOI: 10.1007/978-3-031-42782-4_18 (дата звернення: 19.09.2025); Моделювання

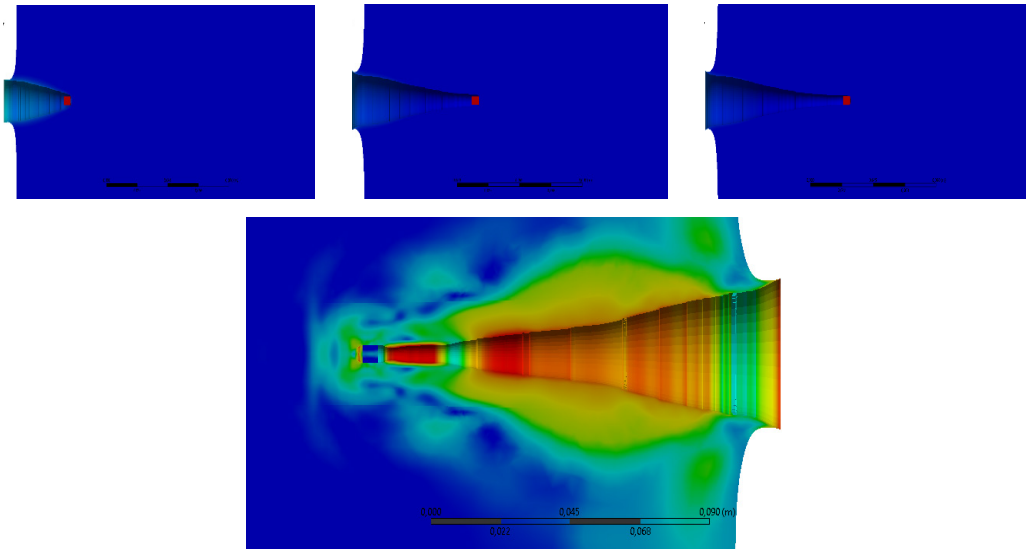


Рис. 34. Результати комп'ютерної симуляції процесу формування каналу пошкодження, завданого циліндричним уражаючим елементом, отримані проф. О. Ларіним під час досліджень¹²

Здобуті результати експериментальних досліджень дають змогу на основі методів математичного моделювання створити комп'ютерну модель термінальної балістики готових уражаючих елементів циліндричної форми діаметром 5,0 мм, яка матиме суттєве практичне значення для медицини й суміжних спеціалізованих галузей. Отже, стає можливим поєднання в єдиний комплекс термінальної та зовнішньої баліс-

тики різних типів готових уражаючих елементів.

Для визначення аеробалістичних характеристик досліджуваних уражаючих елементів в умовах балістичної траси із застосуванням двох оптикоелектронних вимірювальних комплексів ИБХ-731.4 проведено експериментальні стрільби із 5,45 мм автомата АК-74М спеціальними патронами¹³. Під час експерименту досягнуто початкові швидкості польоту

вогнепальних поранень : монографія / упорядники: І. А. Лурін, В. В. Негодуйко, Р. М. Михайлусов, К. В. Гуменюк ; під заг. ред. В. І. Цимбалука. Харків, 2022. 322 с. URI: <https://repo.knmu.edu.ua/handle/123456789/32575> (дата звернення: 19.09.2025).

- 12 Larin O., Grabovskiy A., Kolomiitsev O., Larkov S., Nehoduiko V. Numerical and Experimental Investigation of Cylindrical Shrapnel Penetration into Non-biological Soft Tissue Simulant (Ballistic Plasticine). *7th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering: Conference proceedings* (Chisinau, Moldova, 7–10 Oct 2025). Chisinau, 2025. Vol. 2 : Biomedical Engineering and New Technologies for Diagnosis, Treatment, and Rehabilitation. 2025. Pp. 534–542. DOI: [10.1007/978-3-032-06497-4_53](https://doi.org/10.1007/978-3-032-06497-4_53) (дата звернення: 19.09.2025).
- 13 Коломійцев О. В. Патрони для експериментальної стрільби готовими уражаючими елементами та осколками. *Актуальні проблеми забезпечення державної безпеки* : мат-ли II Всеукр. наук.-практ. конф. (Київ, 25.10.2024). Київ, 2024. С. 136–139. URI: <https://elar.kyiv.ua/handle/123456789/329> (дата звернення: 19.09.2025) ; Його ж. Патрони для експериментальної стрільби високошвидкісними готовими уражаючими елементами та осколками. *Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України*

547,2–1096,0 м/с. На основі падіння швидкості польоту досліджуваних кінетичних снарядів на траєкторії визначено значення балістичного коефіцієнта. Результати досліджень і розрахунків представлено в табл. 11.

Таблиця 11

Результати експериментальної стрільби готовими уражаючими елементами циліндричної форми діаметром 5,0 мм

| № пострілу | M_p , г | V_{i0} , м/с | V_{ik} , м/с | L, м | C_i |
|------------|-----------|----------------|----------------|------|----------|
| 1 | 0,79 | 956,6 | 326,1 | 20 | 175,86 * |
| 2 | 0,77 | 615,9 | 455,0 | 15 | 67,67 |
| 3 | 0,79 | 534,6 | 389,3 | | 70,89 |
| 4 | 0,76 | 584,3 | 422,9 | | 72,25 |
| 5 | 0,79 | 681,7 | 515,3 | | 62,54 |
| 6 | 0,76 | 691,9 | 494,1 | | 75,25 |
| 7 | 0,76 | 658,7 | 480,3 | | 70,59 |
| 8 | 0,79 | 657,6 | 496,2 | | 62,94 |
| 9 | 0,79 | 547,2 | 408,9 | | 65,11 |
| 10 | 0,77 | 797,0 | 566,9 | | 76,14 |
| 11 | 0,75 | 939,8 | 690,7 | | 68,83 |
| 12 | 0,75 | 592,7 | 424,9 | | 74,39 |
| 13 | 0,75 | 851,4 | 602,1 | | 77,43 |
| 14 | 0,75 | 759,7 | 553,6 | | 70,73 |
| 15 | 0,78 | 1025,0 | 736,0 | | 74,03 |
| 16 | 0,78 | 1096,0 | 816,7 | | 65,74 |
| 17 | 0,78 | 1050,0 | 786,6 | | 64,55 |

Примітка. M_i — маса окремого уражаючого елемента; V_{i0} — початкова швидкість окремого уражаючого елемента (швидкість, зареєстрована першим вимірвальним комплексом);

V_{ik} — швидкість окремого уражаючого елемента, зареєстрована другим вимірвальним комплексом; L — дистанція стрільби (для 20 м відстань між вимірвальними комплексами становила 18,6 м; для 15 м — 13,6 м); C_i — значення балістичного коефіцієнта для окремого уражаючого елемента; * — рух дестабілізованого уражаючого елемента.

У табл. 12 представлено результати вимірювання швидкостей польоту тільки залікових пострілів (із реєстрацією проходження уражаючими елементами крізь рамки обох вимірвальних комплексів) серією у 25 пострілів. Унаслідок значного розльоту уражаючих елементів на дистанції стрільби 20 м проходження вісьмох уражаючих елементів крізь рамку другого вимірвального комплексу не зафіксовано.

Для контролю положення досліджуваного уражаючого елемента на траєкторії за вимірвальними комплексами встановили паперові мішені. Тільки в одному випадку (постріл № 1, див. табл. 11) зафіксовано, що уражаючий елемент у польоті здійснив обертання (перша мішень мала округлий отвір, а друга — отвір прямокутної форми, що характерно для бокової проекції уражаючого елемента). В інших випадках рух уражаючих елементів був стабілізований (отвори в обох мішенях мали округлу форму). Такі особливості польоту досліджуваних уражаючих елементів вплинули на значення балістичного коефіцієнта C_i (екстремальне значення C_i в табл. 11 позначено «*»).

Таблиця 12

Параметри траєкторії та балістичні характеристики окремого уражаючого елемента міни ОЗМ-72 за початкової швидкості 1053 м/с й куті кидання 0°

| X, м | Y, м | Q, ° | V, м/с | t, с | E, Дж | Eud, Дж/мм ² |
|------|-------|--------|----------|-------|---------|-------------------------|
| 0 | 1,000 | 0,000 | 1053,000 | 0,000 | 426,891 | 21,747 |
| 10 | 1,000 | -0,006 | 896,084 | 0,010 | 309,142 | 15,748 |

(до 10-ї річн. створ. Нацгвардії України): тези Всеукр. наук.-практ. конф. (Харків, 24.10.2024). Харків, 2024. С. 352–355. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/24214/1/Zbirnsk_tez_konfer._24.10.2024%20%281%29.pdf (дата звернення: 19.09.2025).

Завершення табл. 12

| X, м | Y, м | Q, ° | V, м/с | t, с | E, Дж | Eud, Дж/мм ² |
|-----------|---------|----------|-----------|---------|---------|-------------------------|
| 20 | 0,998 | -0,015 | 724,988 | 0,023 | 202,359 | 10,309 |
| 30 | 0,994 | -0,030 | 574,594 | 0,039 | 127,111 | 6,475 |
| 40 | 0,987 | -0,053 | 451,160 | 0,059 | 78,365 | 3,992 |
| 50 | 0,975 | -0,090 | 362,118 | 0,085 | 50,485 | 2,572 |
| 60 | 0,954 | -0,144 | 307,224 | 0,116 | 36,339 | 1,851 |
| 70 | 0,924 | -0,213 | 280,198 | 0,151 | 30,227 | 1,540 |
| 80 | 0,879 | -0,300 | 244,581 | 0,190 | 23,031 | 1,173 |
| 90 | 0,818 | -0,407 | 227,602 | 0,234 | 19,944 | 1,016 |
| 100 | 0,736 | -0,532 | 208,332 | 0,281 | 16,708 | 0,851 |
| 110 | 0,631 | -0,680 | 192,916 | 0,332 | 14,328 | 0,730 |
| 120 | 0,497 | -0,854 | 176,792 | 0,388 | 12,033 | 0,613 |
| 130 | 0,331 | -1,060 | 162,691 | 0,448 | 10,190 | 0,519 |
| 140 | 0,125 | -1,305 | 149,369 | 0,514 | 8,590 | 0,438 |
| 145,172 * | 0,000 * | -1,449 * | 142,989 * | 0,551 * | 7,872 * | 0,401 * |

Примітка. X — дальність польоту; Y — висота траєкторії польоту; Q — кут нахилу траєкторії польоту; V — швидкість польоту; t — час польоту; E — кінетична енергія; Eud — питома кінетична енергія; * — значення параметрів траєкторії польоту в точці падіння.

Аналіз отриманих результатів експериментальних стрільб дає змогу визначити уражаючі властивості досліджуваних кінетичних снарядів на різних відстанях від центра вибуху: у зоні суцільного ураження, на відстанях ефективного ураження й максимального розльоту; а також визначити безпечну зону.

Це можна продемонструвати на прикладі розрахунку уражаючих властивостей досліджуваного зразка кінетичного снаряду міни ОЗМ-72 за таких початкових умов:

- початкова швидкість уражаючого елемента — 1053 м/с;
- середня маса уражаючого елемента — 0,77 г;
- положення уражаючого елемента в польоті — рух уперед торцевою поверхнею (кут атаки в потоці (обтікання) — 0°);

- площа поперечного перетину — 19,63 мм²;
- опосередковане значення балістичного коефіцієнта уражаючого елемента на основі даних табл. 12 — 69,94 м²/кг;
- кут кидання окремого уражаючого елемента від центра вибуху — 0°;
- граничне значення питомої кінетичної енергії уражаючого елемента, якої достатньо для завдання тілу людини проникного поранення в одну із порожнин (черевну, грудну, череп) ¹⁴, — 0,5 Дж/мм²;
- висота підриву міни — 1,0 м.

Результати розрахунків за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення *ExtBallistic* за нормальних умов зовнішнього середовища представлено в табл. 12. Аналіз цих результатів свідчить, що за горизонтального польоту досліджуваного уражаючого

¹⁴ Гамов Д. Ю. Встановлення належності об'єкта до бойових припасів вогнепальної стрілецької зброї та його придатності до стрільби : методика. Київ, 2006. 29 с.

елемента (кут кидання — 0°) його максимальна дальність — майже 142 м.

До того ж на відстані до 130 м включено окремих уражаючий елемент міни ОЗМ-72 за найбільш оптимальних умов польоту (торцевою поверхнею уперед) може завдати людині проникного поранення.

Якщо враховувати, що для гарантованого ураження людини осколок повинен мати кінетичну енергію не менше 80 Дж, то за зазначених вище умов ефективна дистанція дії по живій цілі може сягати 40 м.

Якщо кут кидання окремого уражаючого елемента збільшується, зокрема до 45° , то зони ураження суттєво змінюються, оскільки уражаючі елементи доволі швидко виходять за межі розмірів цілі. Якщо враховувати висоту ростової мішені ЗСУ № 8 (1,65 м), а також зріст середньостатистичного чоловіка в Україні

(1,753 м), то зони ураження матимуть зовсім інші значення. Так, під кутом кидання 5° на відстані майже 10 м (висота траєкторії — 1,874 м) від центра вибуху уражаючий елемент виходить за межі зросту людини, що виключає будь-яку ймовірність його влучання в ціль. Отже, можна стверджувати, що більшість готових уражаючих елементів міни ОЗМ-72, розташованих у верхній частині корпусу, можуть поцілити винятково за умови її доволі близького розташування до центра вибуху.

Більш цікавими є результати досліджень дестабілізованих уражаючих елементів. Відповідно до табл. 11 такий уражаючий елемент має значення балістичного коефіцієнта $C_1 = 175,86 \text{ м}^2/\text{кг}$. Результати розрахунків за означених вище початкових умов уведення уражаючого елемента у вільний політ представлено в табл. 13.

Таблиця 13

Параметри траєкторії й балістичні характеристики дестабілізованого окремого уражаючого елемента міни ОЗМ-72 за початкової швидкості 1053 м/с та кута кидання 0°

| X, м | Y, м | Q, ° | V, м/с | t, с | E, Дж | Eud, Дж/мм ² |
|----------|---------|----------|----------|---------|---------|-------------------------|
| 0 | 1,000 | 0,000 | 1053,000 | 0,000 | 426,891 | 21,747 |
| 10 | 1,000 | -0,008 | 638,871 | 0,012 | 157,140 | 8,005 |
| 20 | 0,996 | -0,037 | 354,735 | 0,034 | 48,447 | 2,468 |
| 30 | 0,984 | -0,107 | 247,111 | 0,070 | 23,510 | 1,198 |
| 40 | 0,952 | -0,282 | 147,246 | 0,124 | 8,347 | 0,425 |
| 50 | 0,862 | -0,808 | 100,603 | 0,218 | 3,897 | 0,199 |
| 60 | 0,656 | -1,591 | 83,863 | 0,336 | 2,708 | 0,138 |
| 70 | 0,304 | -2,450 | 67,708 | 0,458 | 1,765 | 0,090 |
| 76,107 * | 0,000 * | -3,189 * | 65,738 * | 0,547 * | 1,664 * | 0,085 * |

Примітка. * — значення параметрів траєкторії польоту окремого уражаючого елемента в точці падіння.

Як свідчать результати розрахунків, уражаючі властивості дестабілізованого досліджуваного зразка кінетичного снаряда суттєво нижчі, аніж у стабілізованого. Так, зона гарантованого ураження не перевищує 10–20 м від центра вибу-

ху, а зона завдання людині проникного поранення — 40 м.

Наведені в табл. 12 і 13 значення швидкостей уражаючих елементів на траєкторії дають змогу прогнозувати глибину завданого ранового каналу за

допомогою емпіричної залежності (4). Наприклад, за контактної швидкості 227,602 м/с, що відповідає відстані 90 м від центра вибуху (див. табл. 12), глибина ранового каналу могла б становити 75,7 мм.

Результати експериментальних досліджень свідчать, що визначити аеробалістичні характеристики готових уражаючих елементів з урахуванням їхнього положення в польоті є доволі трудомістким процесом і потребує проведення значної кількості пострілів для отримання статистичного матеріалу. Проте визначити ці параметри допоможуть сучасні математичні методи й комп'ютерна симуляція газодинамічних процесів обтікання тіл різної форми в повітрі в широкому діапазоні швидко-

стей і за різних значень кута обтікання (кута атаки).

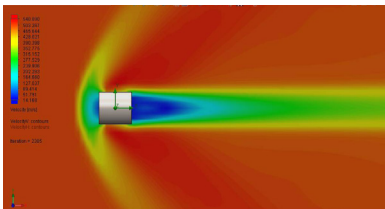
На основі спеціалізованого програмного забезпечення *SOLID WORKS (Flow Simulation)* можна отримати результати обтікання потоком повітря досліджуваних уражаючих елементів за встановлених під час експериментальних стрільб значеннях швидкостей і за їхніх різних положень, що дає змогу імітувати реальні умови польоту. Значення сили опору повітря, його коефіцієнта залежно від швидкості польоту дають змогу визначити як параметри його траєкторії, так і уражаючі властивості на різних відстанях від центра вибуху бойового припасу. Результати комп'ютерної симуляції обтікання уражаючих елементів представлені на рис. 35—37 і в табл. 14.

Таблиця 14

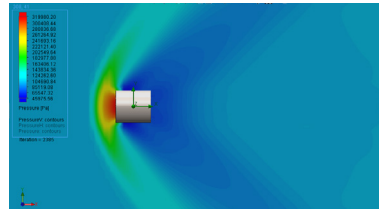
Результати розрахунків аеродинамічних характеристик готових уражаючих елементів циліндричної форми діаметром 5,0 мм

| Швидкість, м/с | 500 | | | 1082 | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Кут атаки, ° | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 |
| Сила супротиву, Н | 2,887 | 3,747 | 3,588 | 11,811 | 11,655 | 13,132 |
| Коефіцієнт сили супротиву | 0,96 | 1,25 | 1,19 | 0,79 | 0,83 | 0,93 |

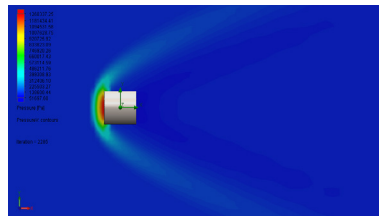
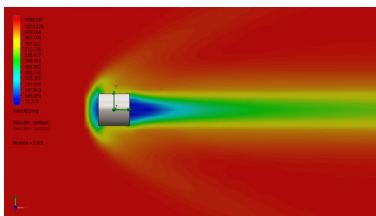
Розподіл швидкостей



Розподіл тиску



швидкість 500 м/с



швидкість 1082 м/с

Рис. 35. Характер обтікання уражаючого елемента (кут атаки — 0°)

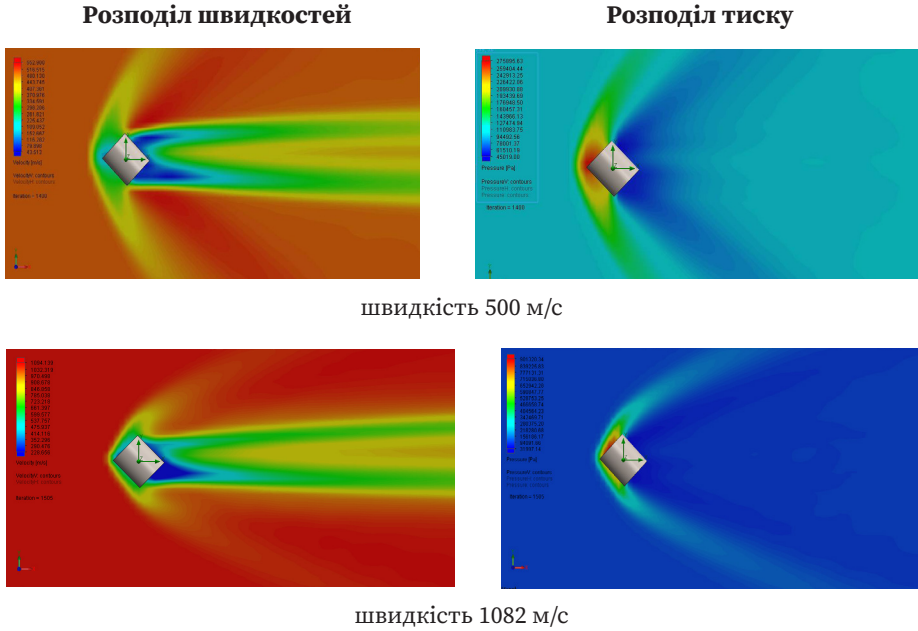


Рис. 36. Характер обтікання уражаючого елемента (кут атаки — 45°)

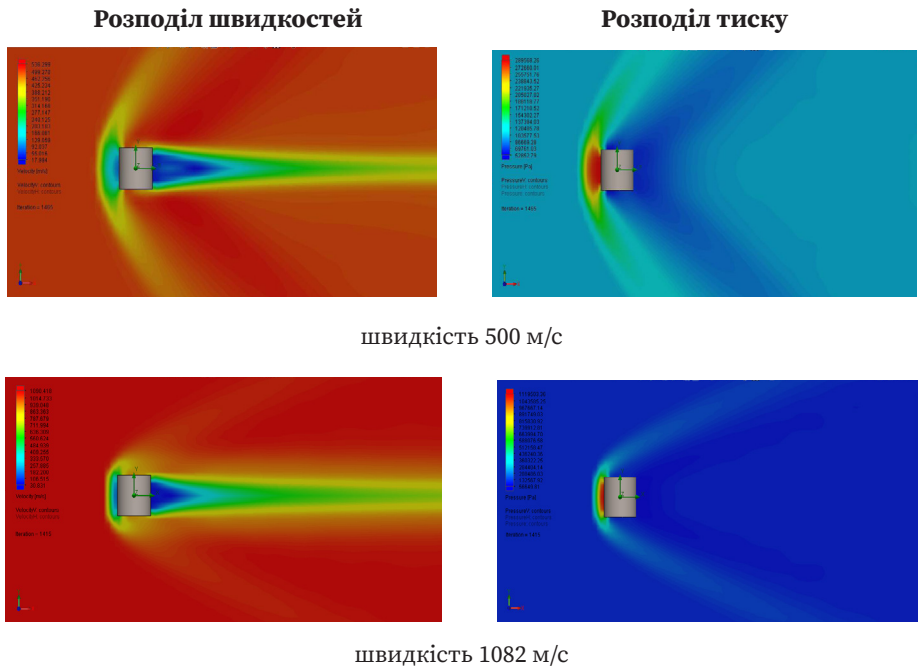


Рис. 37. Характер обтікання уражаючого елемента (кут атаки — 90°)

Отже, за допомогою комп'ютерних симуляцій можна визначити параметри руху як стабілізованих, так і дестабілізованих готових уражаючих елементів циліндричної форми без проведення широкомасштабних натурних випробувань. Визначення аеробалістичних характеристик таких уражаючих елементів у повному обсязі потребує проведення окремих досліджень.

Висновки

Уведення у вільний політ окремих готових уражаючих елементів або осколків вільного дроблення в діапазоні швидкостей до 1000 м/с й більше та дослідження наслідків їх улучання в імітатори біологічних тканин можна здійснити за допомогою спеціалізованого обладнання, яке застосовують під час проведення експериментальних досліджень у галузі судової балістики. Це відкриває доволі широкі перспективи для досліджень особливостей ранової (термінальної) балістики різних видів готових уражаючих елементів і осколків природного дроблення бойових припасів та саморобних вибухових пристроїв.

Готові уражаючі елементи циліндричної форми й малого ступеня подовження поводяться стабільно в товщі в'язко-пружного середовища. У разі улучання вони утворюють порожнини конічної форми. Найбільшої шкоди досліджувані уражаючі елементи завдають на ділянці першої чверті (третини) каналу пошкодження. Це обумовлено практично повною передачею ними своєї кінетичної енергії шарам середовища, що межують у цій зоні із центральним каналом пошкодження. Розміри зони пошкодження на означеній ділянці каналу максимальні. Із утратою кінетичної енергії уражаючі елементи продовжують рух у товщі перешкоди та завдають міні-

мальної шкоди прилеглим шарам середовища.

Улучання готових уражаючих елементів циліндричної форми в ціль характеризується варіабельністю їх положень щодо зовнішньої поверхні перешкоди, що суттєво впливає на визначення параметрів, необхідних для проведення розрахунків і прогнозування ступеня тяжкості й об'єму завданої шкоди. Проте це можна виправити суттєвим збільшенням статистичного матеріалу із подальшою диференціацією результатів, які відповідають конкретним положенням уражаючого елемента в момент улучання в ціль.

У разі улучання у в'язко-пружне середовище з контактними швидкостями понад 700 м/с і торцевою поверхнею, досліджувані готові уражаючі елементи можуть зазнати суттєвих пластичних деформацій у повздовжньому напрямку. Проте в разі улучання в ціль боковою проекцією під кутом 45° – 90° , суттєвих пластичних деформацій у досліджуваних уражаючих елементах не спостерігалось.

Результати проведених експериментів свідчать про доцільність застосування методів експериментальної (судової) балістики не тільки для досліджень особливостей ранової (термінальної) балістики готових уражаючих елементів та осколків бойових припасів і вибухових пристроїв, а й для досліджень їхньої зовнішньої балістики та визначення аеробалістичних характеристик. Це так само дає змогу визначити розміри зон ураження осколками (готовими уражаючими елементами), а також безпечні відстані у разі підривів конкретних бойових припасів або саморобних вибухових пристроїв.

Застосування математичних моделей і комп'ютерних технологій для симуляції фізичних процесів, що супроводжують улучання готових уражаючих елемен-

тів у біологічні тканини, у поєднанні із сучасними технологіями визначення їхніх аеробалістичних характеристик дає змогу створити комплексний метод прогнозування уражаючих властивостей осколків з визначенням ступеня тяжкості завданих ними тілесних ушкоджень у широкому діапазоні початкових умов ударно-контактної взаємодії.

Experimental Researches on Specifics of Terminal and External Ballistics of Damaging Elements of Cylindrical Shape with Diameter of 5.0 Mm

Igor Lurin, Oleksiy Larin, Eduard Khoroshun, Volodymyr Nehoduyko, Oleksandr Kolomyitsev, Serhii Larkov, Oleh Kokorin, Dmytro Klymchuk, Vitalii Tyshchenko, Vitalii Shcherbak, Viktor Sapielkin

This article purpose is to investigate specifics of damage formation mechanism in a viscoelastic medium that arose as a result of high-speed impact-contact interaction with ready-made cylindrical striking elements. For achieving the goal, general scientific and special methods were used. The main attention was paid to the study of striking elements with a diameter of 5.0 mm, since they are equipped with a significant number of fragmentation munitions (in particular, anti-personnel mines, ammunition for dropping from drones, as well as improvised explosive devices). Experimental researches were carried out in conditions of a ballistic route using optoelectronic measuring complexes, a biological tissue simulator (ballistic plasticine) and special cartridges. Introduction of ready-made striking elements into free flight was carried out using a neuroballistic handheld throwing device, as well as rifled firearms of 5.6 mm and 5.45 mm caliber. It made possible to conduct full-scale experiments in a fairly wide range of contact velocities from 70 m/s to 1082 m/s during research on striking properties and in the range from 547 m/s to 1096 m/s

during research on aeroballistic characteristics. As experimental shells, ready-made striking elements of cylindrical shape with a diameter of 5.0 mm and an elongation of 0.96-1.1, that are equipped with OZM-72 fragmentation barrage mines, were used. During research, it was determined that after hitting the specified ready-made striking elements in the thickness of the biological tissue simulator behave stably and form conical cavities. They cause the greatest damage in the area of the first quarter (third) of the damage channel. This is due to the almost complete transfer of their kinetic energy by the striking elements to the layers of environment adjacent to the central damage channel in this area. Dimensions of the damage zone in this area of the channel are maximum. Based on obtained results, specifics of influence of the contact velocity and the position of striking element at the moment of impact on the parameters of the damage channel were determined. Empirical dependences of resistance coefficient of viscoelastic medium, the volume and length of the damage channel on the contact velocity were determined. The results of performed researches make possible to predict the severity of shrapnel wounds inflicted on a person and to solve a number of situational tasks related to the investigation of criminal crimes and terrorist acts, while which commission of fragmentation munitions or improvised explosive devices were used. Separate stage is the research on aeroballistic characteristics of kinetic projectile samples that makes possible to determine their striking properties depending on distance to the explosion center.

Keywords: ballistic plasticine; ammunition; coefficient of medium resistance; contact velocity; fragmentation-barrier mine OZM-72; fragmentation damage; cartridge; improvised explosive device; terminal ballistics; striking element of cylindrical shape.

Фінансування

Це дослідження не отримало жодного спеціального гранту від фінансових

установ у державному, комерційному або некомерційному секторах.

Відмова від відповідальності

Засновники не грали жодної ролі у розробленні дослідження, добиранні й аналізуванні даних, рішенні про публікацію або підготовку рукопису.

Учасники

Автори зробили свій внесок винятково в інтелектуальну дискусію, що є основою цього документа, дослідження судової практики, написання та редагування, і беруть на себе відповідальність за її зміст і тлумачення.

Декларація щодо конфлікту інтересів

Автори заявляють, що у них відсутній конфлікт інтересів.

References

- Coupland, R. M., Rothschild, M. A., Thali, M. J. (2014). *Wound ballistics: basics and applications* / В. Р. Кнеубюхл (Ed.). Berlin. DOI: [10.1007/978-3-642-20356-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20356-5).
- Gilson, L., Rabet, L., Imad, A., Coghe, F. (2020). Experimental and numerical characterisation of rheological properties of a drop test response of a ballistic plastilina. *Forensic Science International*. Vol. 310. Art. 110238. DOI: [10.1016/j.forsciint.2020.110238](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110238).
- Gilson, L., Rabet, L., Imad, A., Kakogiannis, D., Coghe, F. (2016). Development of a numerical model for the ballistic penetration of Fackler gelatine by small calibre projectiles. *The European Physical Journal Special Topics*. Vol. 225 (2). DOI: [10.1140/epjst/e2016-02640-9](https://doi.org/10.1140/epjst/e2016-02640-9).
- Gumeniuk, K., Lurin, I., Tsema, Ie., Susak, Ya., Mykhaylenko, O., Nehoduiko, V. et al. (2021). Wound ballistics of biological tissue's plastic deformation on the model of ballistic plastiline using hollow point and shape-stable bullets. *Journal of Education, Health and Sport*. Vol. 11. No. 11. DOI: [10.12775/JEHS.2021.11.11.003](https://doi.org/10.12775/JEHS.2021.11.11.003).
- Hamov, D. Yu. (2006). *Vstanovlennia nalezhnosti ob'ekta do boiovykh prypraviv vohnepalnoi striletskoi zbroi ta yoho prydatnosti do strilby* [Determining whether an object is classified as ammunition for firearms and whether it is suitable for firing] : metodyka. Kyiv [in Ukrainian].
- Kolisnyk, K., Sokol, Y., Shchapov, P., Nehoduiko, V. (2023). Mathematical Modelling of the Multifactorial Influence of Striking Fragments on the Dynamics of the Rehabilitation Processes of the Wounded. *6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering* : Conference proceedings (Chisinau, Moldova, 20–23 Sept 2023). Chisinau. Vol. 2 : Biomedical Engineering and New Technologies for Diagnosis, Treatment, and Rehabilitation. DOI: [10.1007/978-3-031-42782-4_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42782-4_18).
- Kolomiitsev, A. V., Sapelkin, V. V. (2017). Opredelenie ballisticheskikh kharakteristik i porazhaiushchikh svoystv patronov samodelnogo snariazheniia kalibra 7,62×39 [Determination of the Ballistic Characteristics and the Damaging Properties of Self-Made Loading Cartridges of 7.62×39 Caliber]. *Teoriia ta praktyka sudovoi ekspertyzy i kryminalistyky*. Vyp. 17. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tpsek_2017_17_33 [in Russian].
- Kolomiitsev, O. V. (2024). Patrony dlia eksperymentalnoi strilby hotovymy urazhaiuchymy elementamy ta oskolkamy [Cartridges for experimental firing with ready-made striking elements and fragments]. *Aktualni problemy zabezpechennia derzhavnoi bezpeky : mat-ly II Vseukr. nauk.-prakt. konf.* (Kyiv, 25.10.2024). Kyiv. URI: <https://elar-kingu.kyiv.ua/handle/123456789/329> [in Ukrainian].
- Kolomiitsev, O. V. (2024). Patrony dlia eksperymentalnoi strilby vysokoshydkisnymy hotovymy urazhaiuchymy elementamy ta oskolkamy [Cartridges for experimental firing of high-velocity ready-made striking elements and fragments]. *Aktualni problemy diialnosti skladovykh sektoru bezpeky i oborony Ukrainy (do 10-i richnytsi stvorennia Natsionalnoi hvardii Ukrainy)* : tezy Vseukr. nauk.-prakt. konf. (Kharkiv, 24.10.2024). Kharkiv. URL: http://repositc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/24214/1/Zbirnsk_tez_konfer._24.10.2024%20%281%29.pdf [in Ukrainian].
- Kolomiitsev, O., Giverts, P., Nikitiuk, V., Herman, O. (2024). Zastosuvannia kompiuternykh tekhnolohii dlia rozv'iazannia zavdan terminalnoi balistyky [Application of Computer Technologies for Resolving Terminal Ballistics Issues]. *Didzhytalizatsiia*

- sudovo-ekspertnoi nauky v umovakh voienno-ho stanu* : mat-ly Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (Kharkiv, 08.11.2024). Kharkiv. URL: <https://drive.google.com/file/d/1cDRJ14KDOGIXe5Y-6HdNVBzqAS7gbr-ML/view> [in Ukrainian].
- Kolomiitsev, O., Sapielkin, V., Giverts, P., & Herman, O. (2022). Peculiarities of Determining Affecting Properties of Small-bore Bullets After Ricochet. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*. Vol. 27. No. 2. DOI: 10.32353/khrife.2.2022.05.
- Larin, O., Grabovskiy, A., Kolomiitsev, O., Larikov, S., Nehoduiko, V. (2025). Numerical and Experimental Investigation of Cylindrical Shrapnel Penetration into Non-biological Soft Tissue Simulant (Ballistic Plasticine). *7th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering* : Conference proceedings (Chisinau, Moldova, 7–10 Oct 2025). Chisinau. Vol. 2 : Biomedical Engineering and New Technologies for Diagnosis, Treatment, and Rehabilitation. 2025. DOI: 10.1007/978-3-032-06497-4_53.
- Larin, O., Tomashevskiy, R., Lurin, I., Gumeniuk, K., Nehoduiko, V. (2023). Computational Modeling and Analysis of Wound Formation in Gunshot Injuries. *6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering* : Conference proceedings (Chisinau, Moldova, 20–23 Sept 2023). Chisinau. Vol. 2 : Biomedical Engineering and New Technologies for Diagnosis, Treatment, and Rehabilitation. DOI: 10.1007/978-3-031-42782-4_24.
- Lurin, I. A., Tsema, Ie. V., Gumeniuk, K. V., Susak, Ya. V., Dubenko, D. Ye., Tsema, Ye. Ie. (2021). Experimental modeling of a residual wound cavity on a ballistic plasticine using conventional and hollow point bullets. *Medical Science of Ukraine*. Vol. 17. No. 4. DOI: 10.32345/2664-4738.4.2021.02.
- Modeliuvannia vohnepalnykh poranen* [Gunshot wound simulation] (2022) : monohrafiia / uporiadnyky: I. A. Lurin, V. V. Nehoduiko, R. M. Mykhailusov, K. V. Humeniuk ; pid zah. red. V. I. Tsymbaliuka. Kharkiv. URI: <https://repo.knmu.edu.ua/handle/123456789/32575> [in Ukrainian].
- Polenytsia, P., Naumenko, I., Litsman, A., Nesterov, D. (2024). *Metodyka otsiniuvannia efektyvnosti dii oskolkovo-fuhasnoho snariada po nazemnykh tsiliakh* [Methodology for assessing the effectiveness of high-explosive fragmentation shells against ground targets]. Kyiv. Rieistr. kod VP 7-07(01).010.1.12 [in Ukrainian].
- Prokhorov-Lukin, H. V., Pashchenko, V. I., Bykov, V. I. ta in. (2011). *Metodyka kompleksnoho doslidzhennia vybukhovyykh prystroiv, vybukhovyykh rechovyn i slidiv vybukhu* [Methodology for a comprehensive study of explosive devices, explosives and traces of an explosion]. № DR 0103U002003. Kyiv. URL: https://arm.navs.edu.ua/arm/arm_bmb_exp/idb/metod_wte.html [in Ukrainian].
- Rozen, N., Dudkiewicz, I. (2011). Wound ballistics and tissue damage / *Armed Conflict Injuries to the Extremities*. Berlin. DOI: 10.1007/978-3-642-16155-1_2.
- Susu, L., Cheng, X., Yaoke, W., Xiaoyun, Zh. (2016). A new motion model of rifle bullet penetration into ballistic gelatin. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 93. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.02.003.
- Terefe, T. O., Chawla, A., Datla, N. V. (2025). Damage mechanisms from low-velocity penetrating shrapnel in ballistic gelatin. *Defence Technology*. 18 July. DOI: 10.1016/j.dt.2025.07.008.
- Tsymbaliuk, V., Lurin, I., Gumeniuk, K., Herasymenko, O., Furkalo, S., Oklei, D., Nегодуйко, V., Gorobeiko, M., Dinets, A. (2023). Modeling of wound ballistics in biological tissues simulators. *Medicni perspektivi*. Vol. 28. No. 1. DOI: 10.26641/2307-0404.2023.1.275866.
- Wang, Y., Shi, X., Chen, A., Xu, Ch. (2014). The experimental and numerical investigation of pistol bullet penetrating soft tissue simulant. *Forensic Science International*. Vol. 249. DOI: 10.1016/j.forsciint.2015.02.013.

Лурін, І., Ларін, О., Хорошун, Е., Негодуйко, В., Коломійцев, О., Ларьков, С., Кокорін, О., Климчук, Д., Тищенко, В., Щербак, В., Сапелкін, В. (2025). Експериментальні дослідження особливостей термінальної та зовнішньої балістики уражаючих елементів циліндричної форми діаметром 5,0 мм. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики*. Вип. 4 (41). С. 81–119. DOI: 10.32353/khrife.4.2025.06.