

УДК 624.01:623.454.2:351.86

**РАЦІОНАЛЬНІ КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ
ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ У СИСТЕМІ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ
ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ВІД ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Кандидати технічних наук В. С. Буравченко, О. О. Овчинніков,
асп. М. О. Орленко

**RATIONAL STRUCTURAL SOLUTIONS FOR GLAZED BUILDING ENVELOPE
STRUCTURES WITHIN THE ENGINEERING PROTECTION SYSTEM OF CRITICAL
INFRASTRUCTURE OBJECTS AGAINST EXPLOSIVE LOADS**

PhD (Tech) V. S. Buravchenko, PhD (Tech) O. O. Ovchinnikov,
PhD Student M. O. Orlenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.371910>



***Анотація.** У статті узагальнено результати натурних полігонних випробувань одинадцяти зразків віконних конструкцій за ДСТУ EN 13123-2 / ДСТУ EN 13124-2. Віконний блок з армованим ПВХ-профіль забезпечує клас EXR1; для EXR2 потрібен алюмінієвий профіль або ПВХ з алюмінієвою накладкою. На цій основі сформульовано раціональні конструктивні рішення обох класів, запропоновано алгоритм призначення класу за сценарієм загрози та планувальними обмеженнями і визначено місце світлопрозорих конструкцій у системі інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури.*

***Ключові слова:** світлопрозорі огороджувальні конструкції, об'єкти критичної інфраструктури, інженерний захист, вибух, ударна хвиля, фактори ураження, будівельні конструкції, засоби повітряного нападу, раціональне конструктивне рішення, стійкість.*

Abstract. Engineering protection of critical infrastructure objects traditionally focuses on perimeter measures — fortification structures, protective screens, underground placement of equipment. Windows, however, remain an element that can be neither screened nor removed, and it is the glazed envelope structures that fail first, with glass fragment scatter causing most injuries indoors. The paper proposes to treat this vulnerable element as a separate level of the engineering protection system — with its own resistance classes, field-proven structural solutions and a rule for their assignment. The basis is a full-scale arena test programme carried out in four series during 2022–2024: eleven window specimens of 1780×1460 mm, differing in glazing, profile, hardware and installation joint, were tested to DSTU EN 13123-2 / DSTU EN 13124-2 with a 3 kg TNT charge; part of the tests were instrumented with DYTRAN 2300V5 piezoelectric pressure sensors, and for the rest the parameters were calculated with the Kingery–Bulmash model. It turned out that a steel-reinforced PVC profile with burglar-resistant hardware reliably provides class EXR1 (NS), whereas at the EXR2 level PVC systems fail in the corner joint zone. Class EXR2 (NS) is achievable in two ways: with an aluminium profile (confirmed at pressures up to 576 kPa) or with a PVC profile fitted with an external aluminium cover. The established failure sequence — glazing, locking hardware, corner joints or mullion connection, anchor fastenings — showed that the class is provided by the system as a whole: the failure of a single joint cancels the class even with a resistant profile. Among

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Буравченко В. С., Овчинніков О. О., Орленко М. О., 2026.

glazing types, only P4A laminated glass behaved predictably. Based on the results, rational structural solutions for classes EXR1 and EXR2 were formulated, an algorithm for class assignment according to the threat scenario and the minimum achievable stand-off distance was built, and the place of glazed structures in the engineering protection system of critical infrastructure objects was defined. The operability of the EXR2 solutions has been confirmed by service on a real object under shock-wave loading.

Keywords: glazed building envelope structures, critical infrastructure objects, engineering protection, explosion, shock wave, damage factors, building structures, air attack means, rational structural solution, stability.

Вступ. Систематичні удари засобів повітряного нападу по об'єктах енергетики та інших об'єктах критичної інфраструктури України зробили інженерний захист цих об'єктів окремим напрямом будівельної науки. Основну увагу дослідники закономірно приділяють контурним заходам – фортифікаційним спорудам, захисним екранам, підземному розташуванню обладнання. Але в кожній будівлі залишається елемент, який неможливо ані екранувати, ані прибрати: вікна. Світлопрозорі огорожувальні конструкції (СОК) руйнуються першими, і саме розліт уламків скла завдає більшості травм людям усередині приміщень.

Виникає практичне запитання, якими мають бути самі СОК на об'єкті критичної інфраструктури – якого класу вибухостійкості, із якого профілю, із яким склінням і вузлами кріплення. Нормативна база для відповіді існує: ДСТУ EN 13123-2 і ДСТУ EN 13124-2 [11, 12] визначають класи EXR і методику полігонних випробувань. Лише бракує перевірених практикою конструктивних рішень під кожен клас і зрозумілого правила, який клас вимагати від конкретного об'єкта. Саме цим питанням присвячена стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика захисту людей від уламків скління за вибухів системно висвітлена в роботі [1]; засади державної політики щодо захисту критичної інфраструктури узагальнено в роботі [2]. Найпослідовніше питання інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від засобів повітряного нападу розробляє

наукова школа В. І. Коцюрubi: запропоновано методику розрахунків та обґрунтування вимог щодо інженерного захисту таких об'єктів від баражуючих боєприпасів [3]; захист від прямих влучань ракет за допомогою підземного розташування споруд [4]; обґрунтовано раціональні параметри захисних конструкцій типу частково-проникних екранів [5]; узагальнено підходи щодо розрахунку будівельних конструкцій під вибуховим навантаженням — від спрощених моделей до розширеного динамічного аналізу з урахуванням факторів ураження [6].

Методичний апарат оцінювання стійкості конструкцій за ударно-хвильового навантаження розвинено у працях школи НТУ «ХПІ»: виконано моделювання дії ударно-хвильового навантаження на корпусні елементи транспортних засобів із виходом на раціональні конструктивні рішення [7], досліджено вплив ударної хвилі на втрату стійкості тонкостінних конструкцій методом скінченних елементів [8]. Попередні результати автора щодо натурних випробувань віконних блоків різного складу та аналізу структурних факторів, які впливають на відповідність класам EXR, викладено в роботах [9, 10].

Якщо зробити проміжний підсумок огляду, вимальовується розрив. Контурні заходи інженерного захисту [3–6] опрацьовані і розрахунково, і конструктивно; методики оцінювання стійкості [7, 8] відпрацьовані на військовій техніці. А ось СОК у цій системі досі присутні радше як «слабке місце, яке всі

знають», ніж як формалізований рівень захисту з власними класами, перевіреними рішеннями та правилом їх призначення. Заповненню цієї прогалини і присвячено роботу.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи — сформулювати раціональні конструктивні рішення світлопрозорих огорожувальних конструкцій для класів вибухостійкості EXR1–EXR2 і визначити їхнє місце в системі інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури. Для цього потрібно було пройти чотири кроки: провести полігонні випробування зразків різного складу за ДСТУ EN 13123-2 / ДСТУ EN 13124-2 [11, 12], простежити, у якій послідовності відмовляють елементи конструкцій, звести результати за класами і матеріалами профілів і, нарешті, перетворити ці спостереження на робоче правило призначення класу.

Методика та програма натурних випробувань. Дослідження виконано за методикою польових випробувань ДСТУ EN 13123-2 [11]; із процедурною частиною за ДСТУ EN 13124-2 [12]; класифікація узгоджена з міжнародними аналогами [13–15]. Заряд — 3 кг ТНТ, зібраний зі стандартних пресованих шашок, як і передбачено протоколом. Його центр

виставляли на висоті 500 ± 5 мм над твердим майданчиком із відбивною залізобетонною поверхнею. Зразки при цьому стояли не у випробувальному стенді, а в наявних прорізах зовнішніх стін масивної залізобетонної будівлі — так відтворено реальні умови монтажу. За сценарієм це зовнішній вибух переносного вибухового пристрою: фронт тиску діє на лицьову поверхню конструкції.

Загалом за 2022–2024 роки відбулося чотири серії тестів — одинадцять зразків, із однаковими габаритами 1780×1460 мм ($2,6 \text{ м}^2$), що відрізнялися складом склопакетів, профілів, фурнітури та монтажних швів. Частина тестів супроводжували інструментальні вимірювання двома п'єзоелектричними датчиками тиску DYTRAN 2300V5: перший встановлювали врівень із жорсткою пластиною в зоні монтажного стику і реєстрували відбитий тиск для оцінювання локальних навантажень на вузли; другий — на окремій стійці паралельно фронту хвилі, він фіксував інцидентний тиск P_{so} у вільному полі (тут і далі позначення P_{so}). Для тестів без вимірювань параметри розраховували за моделлю Kingery–Bulmash [16]. Нормативні умови досліджених класів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Класи вибухостійкості, за ДСТУ EN 13123-2, і мінімальні параметри детонації, за ДСТУ EN 13124-2 (дод. А, табл. А.1 [12])

Клас	Заряд ТНТ, кг	Відстань, м	P_{so} , кПа	I_{so} , кПа·мс
EXR1	3	5	75	105
EXR2	3	3	230	165
EXR3	12	5,5	170	225
EXR4	12	4	360	300
EXR5	20	4	630	420

Маса заряду і відстань підриву задають клас за роботою [11], а піковий тиск P_{so} і позитивний імпульс I_{so} , наведені в табл. 1 дод. А [12], слугують мінімальними

параметрами підтвердження повного детонування: виміряні значення мають перевищувати табличні. У всіх інструментованих тестах цю умову

виконано, тому зафіксовані навантаження відповідають повній детонації заряду.

Оцінювали за критеріями відповідності цільовому класу EXR із вимогою відсутності уламків у захищеному просторі (критерій NS) і рівнем небезпеки уламків PC1 (No Hazard) [13]. Після кожного тесту проводили фрактографічний і конструктивний аналіз із фотофіксацією до

та після впливу. Результати кожного тесту оформлено протоколами випробувань уповноважених установ [17–19].

Результати випробувань та їх аналіз. Зведені умови та підсумки випробувань для зразків, за якими наявні верифіковані дані, наведено в табл. 2; розподіл результатів за класами і матеріалом профілю — у табл. 3.

Таблиця 2

Зведені результати натурних випробувань зразків СОК (заряд 3 кг ТНТ)

Номер	Код зразка (ID)	Відстань R, м	Метод	P _{so} , кПа	I _{so} , кПа·мс	Цільовий клас	Результат
1	S1-01_2022	5	С	86	118	EXR1 (NS)	пройшов
2	S1-02_2022	3	С	259	187	EXR2 (NS)	не пройшов
4	S2-02_2023	5	С	86	118	EXR1 (NS)	пройшов
5	S3-01_2023	3	М	576,3	264,5*	EXR2 (NS)	пройшов
6	S3-02_2023	3	М	415,5	232,6*	EXR2 (NS)	пройшов
7	S3-03_2023	3	М	564,6	273,3*	EXR2 (NS)	не пройшов
9	S4-02_2024	3	М	324,0	162,6*	EXR2 (NS)	не пройшов
10	S4-03_2024	3	М	302,9	45,7*	EXR2 (NS)	пройшов
11	S4-04_2024	5	С	86	118	EXR1 (NS)	пройшов

Примітки: М — інструментальні вимірювання DYTRAN 2300V5; С — розрахунок за Kingery–Bulmash [16]; * — імпульс за аналітичною формою Фрідлендера; протоколи випробувань [17–19]. Результати показано на рис. 1-6.

Таблиця 3

Розподіл результатів випробувань за класами та матеріалом профілю (номери зразків)

Підсумок	ПВХ 70–82 мм	ПВХ 82 мм + Al накладка	Al 77 мм	Разом
Зруйновані (без цільового класу)	3, 8	—	—	2
EXR1 — пройшли	1, 4	—	11	3
EXR2 — не пройшли	2, 7	—	9	3
EXR2 — пройшли	—	10	5, 6	3



Рис. 1. Віконна конструкція зразка № S2-02_2023:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [19]



Рис. 2. Віконна конструкція зразка № S3-01_2023:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [17]

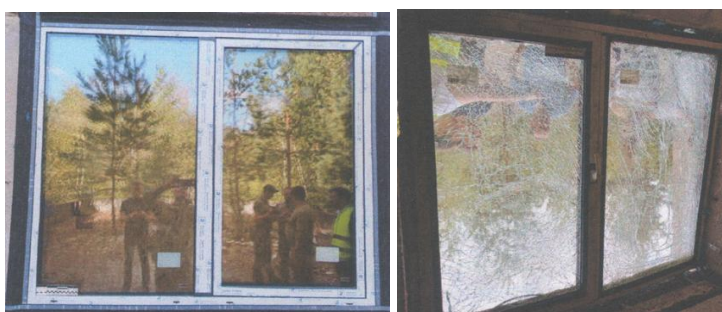


Рис. 3. Віконна конструкція зразка № S3-02_2023:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [17]



Рис. 4. Віконна конструкція зразка № S4-02_2024:
до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [18]



Рис. 5. Віконна конструкція зразка № S4-03_2024: до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [18]



Рис. 6. Віконна конструкція зразка № S4-04_2024: до (ліворуч) і після (праворуч) випробування [18]

Тепер переходимо до аналізу отриманих результатів. Межа можливостей ПВХ-систем окреслена чітко. Армований ПВХ-профіль із протизламною фурнітурою впевнено забезпечує рівень EXR1: обидва зразки (№ 1, 4) пройшли випробування без викиду уламків у захищений простір. На рівні EXR2 картина інша — зразки № 2 і 7 втратили цілісність, причому руйнування щоразу починалося в зоні кутових з'єднань, де відшаровувалося армування і розкривався профіль.

До класу EXR2 вдалося дійти двома шляхами. Перший очевидний — алюмінієвий профіль: зразки № 5 і 6 підтвердили клас за виміряних тисків 576 і 416 кПа, що більш ніж удвічі перевищують мінімальний рівень 230 кПа (табл. 1). Другий шлях цікавіший з економічного погляду. Зразок № 10 — це звичайна ПВХ-система, підсилена зовнішньою алюмінієвою накладкою, і вона теж пройшла випробування на клас EXR2. Не

обійшлося без несподіванки: зразок № 9, двостулковий алюмінієвий з імпостом, клас не підтвердив — профіль вистояв, але зруйнувався вузол кріплення імпоста. Висновок простий: матеріал профілю — умова необхідна, але не достатня; вплив ударної хвилі сприймає вся система «профіль + вузли + кріплення».

Зі склінням орієнтири вийшли однозначні. Флоат-скло руйнувалося з розльотом уламків — це було очікуваним результатом. Менш очевидно, що так само поводитися і загартоване скло, утворюючи небезпечні дрібні фрагменти. Захисна плівка в нормативних умовах ситуацію не рятувала. Надійним щодо вимог лише ламіноване скло класу P4A — зруйноване, воно трималося на полімерній основі, поки зберігалася фіксація в рамі.

Що ж до конструкції в цілому, відмови щоразу йшли за одним сценарієм: спершу скління, потім запірні фурнітура і цапфи, далі кутові з'єднання або вузол імпоста,

останніми — анкери монтажного шва. Кожна наступна ланка цього ланцюга наочно підказує, де потрібно вдосконалювати конструктивні рішення.

Рціональні конструктивні рішення та їх місце в системі інженерного захисту. Із цього випливають практично два конструктивні рішення. Перше, для класу EXR1: ПВХ-профіль зі сталевим армуванням, ламіноване скло Р4А, протизламна фурнітура із запірними планками, закріпленими у сталеве армування. Друге, для класу EXR2: алюмінієвий профіль або ПВХ з алюмінієвою накладкою, те саме скло Р4А, підсилені кутові з'єднання і вузол імпоста, анкерування монтажного шва з розрахунку на відривні зусилля. За кожним рішенням стоять конкретні пройдені зразки з табл. 2, а

рішення другого класу, встановлене на одному з об'єктів критичної інфраструктури, уже витримало реальне ударно-хвильове навантаження без втрати захисної функції [10].

Місце цих рішень у загальній системі захисту об'єкта показано на рис. 7. Логіка тут така. Фортифікаційні споруди, частково-проникні екрани, підземне розташування [3–6] знижують і ймовірність ураження, і параметри вибухового впливу, але не зводять до нуля. А віконний проріз неможливо повністю екранувати: він для того існує, щоб пропускати світло. Отже, СОК — це третій контур захисту, який зменшує загрозу там, де перші два фізично не працюють. І призначати його потрібно не за залишковим принципом, а під розрахунковий сценарій.



Рис. 7. Місце світлопрозорих огорожувальних конструкцій у системі інженерного захисту об'єкта критичної інфраструктури

Однак необхідно зробити застереження щодо рівня вимог. Заряд 3 кг у класах EXR — це стандартизована основа для співставлення конструкцій між собою, і не більше. Реальні загрози є значно різноманітнішими: бойове спорядження сучасних засобів повітряного нападу, зокрема баражуючих боеприпасів, може

багатократно перевищувати нормативний заряд. Тож EXR2 для об'єктів критичної інфраструктури — не гарантія, а нижня межа. Для найвідповідальніших об'єктів вона працює лише в парі з контурними заходами, які збивають параметри вибухового впливу до рівня, посилюючого для скління.

Тепер розглянемо вибухові загрози воєнного часу в аспекті впливу ударної хвилі на власне світлопрозорі конструкції (табл. 4). Пряме влучання ракети чи ударного БпЛА у будівлю — випадок, у якому скління не врятувати нічим; тут може бути ефективним тільки поле контурних заходів: перехоплення, екранування, підземне розташування [4, 5]. Але масова статистика пошкоджень складається з іншого — із вибухів на різних відстанях. Влучання в сусідню споруду, підрив

перехопленого засобу в повітрі, падіння збитих уламків із детонацією залишків заряду — усе це навантаження від десятків до сотень кілопаскалів, і саме тут буде вирішено головне: втримає конструкція уламки скла у прорізі (критерій NS) чи сама стане джерелом вторинного ураження людей.

Терористичні сценарії з переносними та автомобільними пристроями стоять окремо — під них свого часу і писали нормативну базу EXR.

Таблиця 4

Типові вибухові загрози воєнного часу та застосовні рівні захисту СОК

Сценарій	Характер впливу на СОК	Застосовний рівень захисту
Пряме влучання ракети або ударного БпЛА у будівлю	руйнування прорізу разом із конструкцією	контурні заходи (рівні I–II, рис. 7)
Вибух на відстані: влучання поруч, підрив перехопленого засобу	повітряна ударна хвиля; тиск від десятків до сотень кілопаскалів	класи EXR1–EXR2 (рівень III)
Падіння уламків збитих засобів повітряного нападу	локальний удар у поєднанні з ослабленою ударною хвилею	EXR1 і ламіноване скління P4A
Терористичні сценарії: переносні і автомобільні вибухові пристрої	ударна хвиля за нормативними сценаріями випробувань	класи EXR за алгоритмом (рис. 8)

Правило призначення цільового класу зведено в алгоритм на рис. 8. Точка входу — категорія об'єкта і сценарій загрози. Далі все вирішує очікувана масштабована відстань, яку визначають за формулою

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}, \quad (1)$$

де R — відстань від центра заряду, м;

W — маса заряду в тротиловому еквіваленті, кг.

Розглянемо, скільки метрів до фасаду реально гарантує периметр: п'ять і більше — вистачить EXR1; лише три — потрібен EXR2 з відповідним конструктивним рішенням. Фінальний блок алгоритму — обов'язкове полігонне випробування за роботами [11, 12], і це не формальність: зразок № 9 наочно показав, що розрахункова стійкість окремих елементів ще не гарантує стійкості системи.



Рис. 8. Алгоритм вибору раціонального конструктивного рішення СОК за класом вибухостійкості

Висновки та перспективи подальших досліджень:

1. Програма з чотирьох серій натурних полігонних випробувань одинадцяти зразків віконних конструкцій за ДСТУ EN 13123-2 / ДСТУ EN 13124-2 на реальних прорізах масивної будівлі підтвердила придатність аренної методики для оцінювання вибухостійкості СОК і дала верифіковану базу для конструктивних узагальнень.

2. Армований ПВХ-профіль із протизламною фурнітурою забезпечує клас EXR1 (NS); на рівні EXR2 ПВХ-системи відмовляють у зоні кутових з'єднань. Класу EXR2 (NS) досягають алюмінієвим профілем або ПВХ-профілем з алюмінієвою накладкою за виміряних тисків до 576 кПа.

3. Відмови в усіх тестах ішли одним маршрутом: скління, запірні фурнітури, кутові з'єднання чи вузол імпоста, анкерні кріплення. Звідси головний конструктивний урок програми — клас вибухостійкості тримає система в цілому, і відмова одного

вузла (зразок № 9, кріплення імпоста) знімає клас навіть за стійкого профілю. Серед типів скління передбачувано відпрацювало лише ламіноване P4A.

4. Для обох класів сформульовано раціональні конструктивні рішення, а правило призначення класу за сценарієм загрози та мінімально досяжною відстанню підриву зведено в алгоритм. СОК при цьому розглядають як окремий рівень системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури — той, що доповнює контурні заходи всюди, де екранування прорізів неможливе.

5. Працездатність рішень класу EXR2 підтверджено досвідом експлуатації на об'єкті критичної інфраструктури в умовах реального ударно-хвильового навантаження. Напрямок подальших досліджень є вдосконалення вузла кріплення імпоста двостулкових конструкцій і поширення підходу на фасадні системи.

Список використаних джерел

1. Information Bulletin: Blast Protection for Windows / UN Department of Safety and Security, Division of Specialized Operational Support, Physical Security Unit. New York, 2021. 39 p.
2. Бірюков, Д. С., & Кондратов, С. І. (2016). *Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні*: зб. матеріалів міжнар. експерт. нарад; за заг. ред. О. М. Суходолі. Київ: НІСД, 176.
3. Коцюруба, В. І., Білик, А. С., Веретно, А. О. та ін. (2022). Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури від БпЛА типу баражуючий боєприпас. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 109, 164–183. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.164-183
4. Коцюруба, В. І. та ін. (2023). Захист об'єктів критичної інфраструктури України від прямих влучань ракет за допомогою підземного розташування. *Ядерна та радіаційна безпека*, 2 (98). DOI: 10.32918/nrs.2023.2(98).07
5. Коцюруба, В. І. та ін. (2025). Обґрунтування раціональних параметрів захисних конструкцій типу частково-проникних екранів під час інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 10. DOI: 10.37701/ts.10.2025.08
6. Коцюруба, В. І. та ін. (2026). Розрахунок конструкцій під вибуховим навантаженням: від спрощених моделей до розширеного динамічного аналізу. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 116, 243–250. DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.243-250
7. Грабовський, А. В. та ін. (2021). Моделювання дії ударно-хвильового навантаження на корпусні елементи транспортних засобів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Машинознавство та САПР, 1. DOI: 10.20998/2079-0775.2021.1.01
8. Ткачук, М. А., Васильєв, А. Ю., Грабовський, А. В. та ін. (2025). Вплив ударної хвилі на втрату стійкості бронекорпусів легкоброньованих машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Машинознавство та САПР, 1, 73–91. DOI: 10.20998/2079-0775.2025.1.08
9. Орленко, М. О., Буравченко, В. С., & Бісик, С. П. (2025). Досвід натурних випробувань віконних блоків різного конструктивного складу на ударно-хвильову стійкість. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 115, 383–395. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395
10. Орленко, М. О. (2026). Аналіз структурних факторів, що впливають на відповідність віконних блоків класам EXR1–EXR2 за результатами натурних випробувань на дію ударної хвилі. *The Scientific Heritage*, 185, 9–15. DOI: 10.5281/zenodo.20455933
11. ДСТУ EN 13123-2:2006 (EN 13123-2:2004, IDT). Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Класифікація та технічні вимоги. Ч. 2: Полігонне випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 2 с.
12. ДСТУ EN 13124-2:2006 (EN 13124-2:2004, IDT). Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Метод випробування. Ч. 2: Полігонне випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 11 с.
13. ISO 16933:2007. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification for arena air-blast loading. Geneva : International Organization for Standardization, 2007. 22 p.
14. ASTM F1642/F1642M-17. Standard Test Method for Glazing and Glazing Systems Subject to Airblast Loadings. West Conshohocken : ASTM International, 2017. 6 p. DOI: 10.1520/F1642_F1642M-17
15. GSA-TS01:2003. Standard Test Method for Glazing and Window Systems Subject to Dynamic Overpressure Loadings. Washington : US General Services Administration, 2003. 6 p.

16. Swisdak M. M. Simplified Kingery airblast calculations. Minutes of the 26th DoD Explosives Safety Seminar. Maryland, 1994. 17 p.
17. Протокол випробування № 345-B/2023 вікон вибухотривких від 27 вересня 2023 р. / Науково-випробувальний відділ науково-дослідного центру випробувань, експертизи та сертифікації персональних броньованих засобів Національного університету оборони України, 10 с.
18. Протокол випробування № 796-B/2024 вікон вибухотривких від 28 грудня 2024 р. / Науково-випробувальний відділ науково-дослідного центру випробувань, експертизи та сертифікації персональних броньованих засобів Національного університету оборони України, 9 с.
19. Протокол № 4317/2023 випробувань вікна, наданого ТОВ «Компанія Вікна-Стар», від 22 травня 2023 р. / Випробувальна лабораторія ТОВ «Науково-інженерний центр випробувань виробів та матеріалів захисту», 5 с.

References

1. UN Department of Safety and Security, Division of Specialized Operational Support, Physical Security Unit. Information bulletin: Blast protection for windows. New York, 2021. 39 p. [in English].
2. Biriukov, D. S., & Kondratov, S. I. (comps.); Sukhodolia, O. M. (ed.). (2016). Zelena knyha z pytan zakhystu krytychnoi infrastruktury v Ukraini [Green paper on critical infrastructure protection in Ukraine]. Kyiv : NISD, 176. [in Ukrainian].
3. Kotsiuruba, V. I., Bilyk, A. S., Veretnov, A. O., Haidarli, H. S., Borta, R. M., & Tertyshnyi, B. I. (2022). Metodyka rozrakhunkiv ta obgruntuvannya vymoh do inzhenerenoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury vid BpLA typu barazhuiuchy boieprypas [Method of calculation and substantiation of requirements for the engineering protection of critical infrastructure objects against loitering-munition UAVs]. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 109, 164–183. 10.32347/2410-2547.2022.109.164-183. [in Ukrainian].
4. Kotsiuruba, V. I. et al. (2023). Zakhyst ob'ektiv krytychnoi infrastruktury Ukrainy vid priamykh vluchan raket za dopomohoiu pidzemnogo roztashuvannya [Protection of critical infrastructure objects of Ukraine against direct missile hits using underground structures]. *Nuclear and Radiation Safety*, 2 (98). 10.32918/nrs.2023.2(98).07. [in Ukrainian].
5. Kotsiuruba, V. I. et al. (2025). Obgruntuvannya ratsionalnykh parametriv zakhysnykh konstruktsii typu chastkovo-pronyknykh ekraniv pid chas inzhenerenoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury [Substantiation of rational parameters of partially permeable screen protective structures for the engineering protection of critical infrastructure objects]. *Collection of Scientific Papers of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, 10. 10.37701/ts.10.2025.08. [in Ukrainian].
6. Kotsiuruba, V. I. et al. (2026). Rozrakhunok konstruktsiy pid vybukhovym navantazhenniam: vid sproshchenykh modeley do rozshyrenoho dynamichnogo analizu [Structural design under blast loading: from simplified models to advanced dynamic analysis]. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 116, 243–250. 10.32347/2410-2547.2026.116.243-250. [in Ukrainian].
7. Hrabovskyi, A. V. et al. (2021). Modeliuvannya dii udarno-khvylovoho navantazhennia na korpusni elementy transportnykh zasobiv (Modelling of the shock-wave loading action on hull elements of vehicles). *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical Engineering and CAD*, 1. 10.20998/2079-0775.2021.1.01. (in Ukrainian)

8. Tkachuk, M. A., Vasyliiev, A. Yu., Hrabovskyi, A. V. et al. (2025). Vplyv udarnoi khvyli na vtratu stiikosti bronekorpusiv lehkobronovanykh mashyn (Influence of a shock wave on the buckling of armored hulls of light armored vehicles). *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical Engineering and CAD*, 1, 73–91. 10.20998/2079-0775.2025.1.08. [in Ukrainian].
9. Orlenko, M. O., Buravchenko, V. S., & Bisyk, S. P. (2025). Dosvid naturnykh vyprobuvan vikonnykh blokiv riznoho konstruktyvnoho skladu na udarno-khvylovu stiikist (Experience of full-scale tests of window units of different compositions for shock-wave resistance). *Strength of Materials and Theory of Structures*, 115, 383–395. 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395. [in Ukrainian].
10. Orlenko, M. O. (2026). Analysis of structural factors affecting the compliance of window units with EXR1–EXR2 classes based on field blast test results. *The Scientific Heritage*, 185, 9–15. 10.5281/zenodo.20455933. [in English].
11. DSTU EN 13123-2:2006 (EN 13123-2:2004, IDT). Vikna, dveri ta zhaliuzi. Stiikist do vybukhu. Klasyfikatsiia ta tekhnichni vymohy. Chastyna 2: Polihonne vyprobuвання (Windows, doors and shutters. Explosion resistance. Classification and requirements. Part 2: Range test). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 2 p. [in Ukrainian].
12. DSTU EN 13124-2:2006 (EN 13124-2:2004, IDT). Vikna, dveri ta zhaliuzi. Stiikist do vybukhu. Metod vyprobuвання. Chastyna 2: Polihonne vyprobuвання (Windows, doors and shutters. Explosion resistance. Test method. Part 2: Range test). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 11 p. [in Ukrainian].
13. ISO 16933:2007. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification for arena air-blast loading. Geneva: International Organization for Standardization, 2007. 22 p. [in English].
14. ASTM International. Standard test method for glazing and glazing systems subject to airblast loadings (ASTM F1642/F1642M-17). West Conshohocken, 2017. 6 p. 10.1520/F1642_F1642M-17. [in English].
15. U.S. General Services Administration. Standard test method for glazing and window systems subject to dynamic overpressure loadings (GSA-TS01:2003). Washington, 2003. 6 p. [in English].
16. Swisdak M. M. Simplified Kingery airblast calculations. Minutes of the 26th DoD Explosives Safety Seminar. Maryland, 1994. 17 p. [in English].
17. Protokol vyprobuвання No. 345-V/2023 vikon vybukhotryvkykh vid 27 veresnia 2023 r. (Test report No. 345-V/2023 on blast-resistant windows dated 27 September 2023) / Scientific Testing Department of the Research Centre for Testing, Expertise and Certification of Personal Armoured Means, National Defence University of Ukraine. 10 p. [in Ukrainian].
18. Protokol vyprobuвання No. 796-V/2024 vikon vybukhotryvkykh vid 28 hrudnia 2024 r. (Test report No. 796-V/2024 on blast-resistant windows dated 28 December 2024) / Scientific Testing Department of the Research Centre for Testing, Expertise and Certification of Personal Armoured Means, National Defence University of Ukraine. 9 p. [in Ukrainian].
19. Protokol No. 4317/2023 vyprobuvan vikna, nadanoho TOV «Kompaniia Vikna-Star», vid 22 travnia 2023 r. (Test report No. 4317/2023 on the window provided by Vikna-Star LLC dated 22 May 2023) / Testing Laboratory of the Scientific and Engineering Centre for Testing of Protection Products and Materials LLC. 5 p. [in Ukrainian].

Буравченко Всеволод Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектурних конструкцій, Київський національний університет будівництва і архітектури (КНУБА), 03680, Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31. ORCID ID: orcid.org/0000-0003-0907-3014. E-mail: buravchenko.vs@knuba.edu.ua.
Овчинніков Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту.
ORCID ID: 0000-0002-1194-4387. E-mail ovchynnikov7784@gmail.com.

Орленко М. О., аспірант кафедри архітектурних конструкцій, Київський національний університет будівництва і архітектури, 03680, Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9890-4520>. E-mail: orlenko_mo-2022@knuba.edu.ua.

Buravchenko Vsevolod, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Architectural Structures, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. ORCID ID: orcid.org/0000-0003-0907-3014. E-mail: buravchenko.vs@knuba.edu.ua.

Ovchynnikov Oleksandr Oleksandrovych, PhD (Tech), Associate Professor, department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-1194-4387. E-mail: ovchynnikov7784@gmail.com.

Orlenko M. O., Postgraduate Student at the Department of Architectural Structures, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9890-4520>. E-mail: orlenko_mo-2022@knuba.edu.ua.

Дата надходження статті: 06.08.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 18.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY