**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

**ОРЛЕНКО МИХАЙЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 692.82:699.8:534.222.2

**ДИСЕРТАЦІЯ**

# УДОСКОНАЛЕННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ У ЧАСТИНІ СТІЙКОСТІ ДО УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Спеціальність 192 — Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань: 19 — Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів має посилання на відповідне джерело.

_____ М. О. Орленко

Наукові керівники: Бісик Сергій Петрович, д.т.н, професор

Буравченко Всеволод Сергійович, к.т.н., доцент

КИЇВ — 2026

# АНОТАЦІЯ

Орленко М. О. **«Удосконалення світлопрозорих огороджувальних конструкцій у частині стійкості до ударних навантажень».** - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 - Архітектура та будівництво). — Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено підвищенню стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій до повітряної ударної хвилі. Віконний блок досліджено як систему взаємопов’язаних склопакета, профілів, армування, з’єднань, фурнітури й монтажного вузла. Нормативний аналіз, аналітичні розрахунки, чисельне моделювання та натурні випробування покладено в основу рекомендацій і визначення меж їх застосування.

**Актуальність дослідження** зумовлена необхідністю підвищення безпеки будівель цивільного призначення та об’єктів критичної інфраструктури в умовах вибухових впливів. Руйнування світлопрозорих елементів супроводжується не лише втратою огороджувальної функції, а й утворенням небезпечних вторинних уламків. Тому оцінювання стійкості має враховувати утримання скління в рамі, цілісність несучого контуру та передавання динамічних зусиль на опорну основу будівлі.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, проаналізовано стан її наукового опрацювання та окреслено зв’язок дослідження з науковими напрямами КНУБА. Сформульовано мету й завдання, визначено об’єкт, предмет і методи дослідження; викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію, публікації та структуру дисертації.

Використано аналіз і узагальнення публікацій та нормативних документів, аналітичні моделі параметрів повітряної ударної хвилі, метод

скінченних елементів у постановці 2D ALE в ANSYS LS-DYNA, полігонні випробування з реєстрацією тиску та порівняльний аналіз. Виміряні, розрахункові й отримані апроксимацією параметри розмежовано за походженням і доказовим значенням.

У **першому розділі** систематизовано теоретичні та нормативні основи забезпечення ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Розглянуто контактний удар, дію повітряної ударної хвилі, первинних і вторинних уламків. Розмежовано характеристики матеріалу скління, комплектного віконного блока та конструкції, встановленої в будівлі. Показано, що відповідність одному виду випробування не підтверджує автоматично іншої захисної властивості; зокрема клас P4A за EN 356 не є класом вибухостійкості вікна. Обґрунтовано необхідність спільного оцінювання пікового тиску й позитивного питомого імпульсу та розрізнення падаючих і відбитих параметрів навантаження.

У **другому розділі** порівняно п’ять аналітичних моделей параметрів повітряної ударної хвилі: Садовського, Kingery–Bulmash, Kinney–Graham, Newmark–Hansen і Henrych. Відношення найбільшого до найменшого падаючого піка становить 2,91 на відстані 0,5 м та 1,58 на відстані 3,0 м. Це міжмодельна розбіжність, а не похибка відносно експериментальних вимірювань. Зіставлення аналітичних і чисельних результатів уточнює умови використання розрахункових оцінок.

Побудовано чисельну модель поширення повітряної ударної хвилі та її взаємодії з вертикальною перепоною. Встановлено вплив кроку скінченно-елементної сітки на розраховані піки тиску. За кроку 5 мм відбитий пік для сферичного заряду в контрольній точці на стінці становить 998 кПа порівняно з аналітичним орієнтиром 951 кПа за Kingery–Bulmash; відносне відхилення дорівнює 4,9 %. Для циліндричного заряду в тій самій точці отримано 971 кПа, а відмінність між двома формами становить близько 2,7 %. Наведені оцінки є локальними: вони не визначають універсальної похибки моделі, тотожності

форм заряду на всій трасі або достатності такого кроку для розрахунку руйнування тонкостінних елементів вікна.

У **третьому розділі** систематизовано результати одинадцяти натурних дослідів із віконними конструкціями різної комплектації. Виокремлено пошукову частину програми, спрямовану на виявлення критичних зон і перевірку конструктивних припущень, та кваліфікаційну частину з протокольним оформленням результатів. За опублікованими протокольними даними п’ять із семи кваліфікаційних зразків відповідають цільовим класам: два — EXR1 (NS), три — EXR2 (NS); два зразки не підтвердили цільовий клас EXR2 (NS). Цей розподіл описує виконану програму й не є статистичною оцінкою надійності серійної продукції.

Для дослідженої конструкції на основі армованого ПВХ-профілю встановлено механічний зв’язок між втратою цілісності неармованої кутової зони зварного з’єднання та подальшим порушенням роботи прилеглого кріплення. Позитивний результат зразка із зовнішньою алюмінієвою накладкою підтвердив доцільність підсилення цього контуру для досягнення EXR2 (NS). Водночас відмова двостулкового алюмінієвого зразка у вузлі імпосту показала, що матеріал профілю та збільшена товщина зовнішнього скла самі по собі не визначають результату. Висновки стосуються випробуваних конфігурацій.

Визначено роль внутрішнього ламінованого скла 44.4 VSG в утриманні фрагментів за умови збереження крайового закріплення. Пошукові досліди не підтвердили можливості розглядати загартоване скло або нанесену захисну плівку без належного утримання у рамі як самодостатні засоби вибухозахисту. Роздільна реєстрація падаючого та відбитого тисків підвищує інформативність інструментального супроводу. Розрахунковий та апроксимаційний імпульси відокремлено від результату безпосереднього інтегрування виміряної часової залежності.

Проаналізовано використання результатів при переході від EN 13123-2:2004 до EN 13123-2:2025. Формального зіставлення класів або перевищення лише порогу пікового тиску недостатньо: необхідно спільно перевіряти відбитий тиск, відбитий позитивний імпульс, критерії небезпеки й умови випробування. Цей аналіз не є новим присвоєнням класів PXR або VXR дослідженим виробам.

У **четвертому розділі** розроблено рекомендації щодо вибору та відтворення випробуваних конструктивних рішень. Системний підхід поширено на монтажний вузол і стіновий проріз як ланки передавання динамічних зусиль на несучу основу. Обґрунтовано, що протокол випробування віконного блока не замінює перевірки здатності конкретного прорізу сприймати ці зусилля. Запропоновано паспорт випробуваного конструктивного рішення, порядок узгодження проєктування, виготовлення й монтажу, контролю змін комплектації та документування приймання встановленої конструкції.

Сформульовано пропозиції щодо використання європейських редакцій стандартів 2025 року та розвитку національних підходів до задання навантажень. Для сценаріїв, не охоплених фіксованими класами, розглянуто застосування передбачених EN класів користувача PXRU/VXRU через узгоджену пару «тиск — імпульс». Запропоновано процедуру опису й підтвердження національних сценаріїв, зокрема у діапазоні 20–100 кг, із розрахунковим визначенням навантаження за моделлю Кінгері–Балмаша. Експериментальна база стосується конфігурації із зарядом 3 кг і не поширюється автоматично на весь зазначений діапазон.

У загальних висновках узагальнено теоретичні, чисельні й експериментальні результати та умови їх застосування. Визначено напрями подальших досліджень: повторні контрольовані випробування, накопичення часових записів, перевірка змінених конфігурацій і спільної хвильової та уламкової дії.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні механізму послідовної відмови дослідженого захисного контуру та обґрунтуванні його підсилення; визначенні локальних умов застосування кроку чисельної дискретизації; удосконаленні інструментального супроводу та інтерпретації натурних випробувань; обґрунтуванні умов використання архівних даних при зміні нормативної класифікації. Подальшого розвитку набули порівняльна оцінка аналітичних моделей, урахування монтажного вузла й опорної основи та підхід до опису навантажень для сценаріїв користувача.

Практичне значення роботи полягає в обґрунтованому виборі комплектної конструкції, плануванні випробувань і відтворенні перевірених рішень у будівництві. Виробниче впровадження підтверджено довідками ТОВ «Компанія Вікна-Стар» від 14.10.2026 № 14, ТОВ «Глас Трьош Київ» від 13.10.2026 № 35 та ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» від 13.10.2026 № 110. Воно охоплює виготовлення й монтаж комплектних конструкцій, проєктування склопакетів і технічний супровід фурнітурних рішень. Матеріали також викладено в колективній монографії «Сучасні аспекти проєктування та технології монтажу світлопрозорих конструкцій».

**Ключові слова:** світлопрозорі огороджувальні конструкції, віконний блок, вибухостійкість, ударне навантаження, повітряна ударна хвиля, відбитий тиск, позитивний імпульс, натурні випробування, чисельне моделювання, ANSYS LS-DYNA, ламіноване скло, ПВХ-профіль, монтажний вузол, захисний контур, критична інфраструктура.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Список публікацій здобувача, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Орленко М. О. Випробування світлопрозорих конструкцій на стійкість до ударної хвилі: аналіз міжнародних стандартів та перспективи їх

застосування в Україні. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2025. Вип. 71. С. 658–669. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.71.658-669.

2. Орленко М. О., Буравченко В. С., Бісик С. П. Досвід натурних випробувань на стійкість до ударної хвилі віконних блоків різного складу. Опір матеріалів і теорія споруд. 2025. № 115. С. 383–395. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395.

*Особистий внесок здобувача: розроблення програми натурних випробувань, виготовлення та монтаж дослідних зразків, участь у проведенні випробувань, оброблення та інтерпретація результатів.*

3. Orlenko M. Analysis of structural factors affecting the compliance of window units with EXR1-EXR2 classes based on field blast test results. The Scientific Heritage. 2026. No. 185 (185). P. 9–15. DOI: 10.5281/zenodo.20455933.

4. Бісик С. П., Орленко М. О. Порівняльний аналіз математичних моделей параметрів повітряної ударної хвилі та збіжність чисельного моделювання при оцінці вибухостійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2026. № 5 (369). С. 137–143. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-369-17.

*Особистий внесок здобувача: постановка задачі порівняння аналітичних моделей повітряної ударної хвилі, участь в обробленні результатів чисельного моделювання.*

5. Буравченко В. С., Овчинніков О. О., Орленко М. О. Раціональні конструктивні рішення світлопрозорих огороджувальних конструкцій у системі інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури від вибухових навантажень. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2026. Вип. 217. С. 168–180. DOI: 10.18664/1994-7852.217.2026.371910.

*Особистий внесок здобувача: систематизація випробуваних конструктивних рішень та обґрунтування рекомендацій щодо їх застосування на об’єктах критичної інфраструктури.*

*Колективна монографія*

6. Бондаренко М. М., Орленко М. О., Фірсов Д. В. Сучасні аспекти проєктування та технології монтажу світлопрозорих конструкцій : монографія. Київ : Ліра-К, 2026. 117 с. ISBN 978-617-9002-20-5.

*Особистий внесок здобувача: розділ, присвячений уламкостійкості світлопрозорих конструкцій та розмежуванню хвильової й уламкової дії.*

*Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

7. Орленко М. О. Методи оцінки ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Scientific Collection «InterConf» : Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference «Challenges in Science of Nowadays» (Washington, USA, September 26–28, 2025). Washington : EnDeavours Publisher, 2025. № 265. С. 99–102. DOI збірника: 10.51582/interconf.2025.265.

8. Орленко М. О. Удосконалення світлопрозорих огороджувальних конструкцій у частині стійкості до ударних навантажень. Current Issues in the Design of Structures. CIDS 2025 : матеріали Міжнар. наук.-техн. симпозіуму (м. Київ, 30–31 жовтня 2025 р.). Київ, 2025. С. 70–73.
URL: https://scadsoft.com/Seminar/CIDS_Kyiv_2025.pdf.

9. Орленко М. О. Світлопрозорі конструкції для критичної інфраструктури: натурні випробування вікон на стійкість до ударної хвилі та практичні рішення для відновлення. Архітектура, Будівництво, Дизайн: Виробництво, Інформатизація, Менеджмент : програма та тези доп. Міжнар. наук.-техн. форуму (м. Київ, 24–25 листопада 2025 р.). Київ : Ліра-К, 2025. С. 170–171.

# ABSTRACT

**Orlenko M. O. Improvement of translucent building envelope structures with regard to resistance to impact loads.** – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 "Construction and Civil Engineering". — Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation addresses the improvement of the resistance of glazed building envelope structures to air-blast loading. The window unit is investigated as a multicomponent system whose protective performance depends on the combined behaviour of the insulating glass unit, framing system, reinforcement, connections, hardware and installation joint. An integrated analysis of standards, analytical calculations, numerical simulation and full-scale testing provides the basis for structural and technical recommendations and defines the limits of applicability of the findings.

The relevance of the research arises from the need to improve the safety of civil buildings and critical infrastructure facilities exposed to blast effects. Failure of glazed elements causes not only the loss of the enclosing function but also the formation of hazardous secondary fragments. Resistance assessment must therefore consider glazing retention within the frame, the integrity of the load-bearing perimeter and the transfer of dynamic forces to the building’s supporting structure.

The **Introduction** substantiates the relevance of the topic, reviews the state of research and outlines the relationship with the research areas of Kyiv National University of Construction and Architecture. It defines the aim, objectives, object, subject and methods of the study and presents the scientific novelty and practical significance of the findings. It also describes the candidate’s personal contribution, dissemination of the results, publications and the structure of the dissertation.

The methodological framework includes the analysis and synthesis of scientific publications and standards, analytical models of air-blast wave parameters, finite element modelling using a two-dimensional Arbitrary Lagrangian–Eulerian (2D ALE) formulation, full-scale field tests with pressure measurements, and comparative analysis. Numerical investigations were performed in ANSYS LS-DYNA. Measured, calculated and approximation-derived parameters are distinguished according to their origin and evidential value.

The **first chapter** of the dissertation systematizes the theoretical and regulatory foundations for ensuring the impact resistance of glazed building envelope structures. Contact impact, air-blast loading, and the effects of primary and secondary fragments are considered separately. The properties of the glazing material, the complete window unit and the system installed in a building are distinguished. Compliance with one type of test does not automatically establish another protective property; in particular, P4A under EN 356 is not a window blast-resistance class. The need to assess peak pressure together with positive specific impulse and to distinguish incident from reflected loading parameters is substantiated.

The **second chapter** of the dissertation compares five analytical models of air-blast wave parameters: Sadovsky, Kingery–Bulmash, Kinney–Graham, Newmark–Hansen and Henrych. The ratio of the highest to the lowest calculated incident pressure peak is 2.91 at a distance of 0.5 m and 1.58 at a distance of 3.0 m. These values describe inter-model discrepancies at the investigated locations rather than errors relative to experimental measurements. Comparison of analytical and numerical results clarifies the conditions governing the use of calculated estimates.

A numerical model of blast-wave propagation and interaction with a vertical barrier is developed. The influence of finite element mesh size on calculated pressure peaks is established. With a 5 mm mesh, the reflected peak for a spherical charge at the control point on the wall is 998 kPa, compared with the Kingery–Bulmash analytical reference of 951 kPa, giving a relative deviation of 4.9%. The cylindrical

charge gives 971 kPa at the same point, with a difference of approximately 2.7% between the two geometries. These estimates are local: they do not define a universal model error, demonstrate equivalence of charge geometries along the entire propagation path, or establish that this mesh size is adequate for modelling failure of thin-walled window components.

The **third chapter** of the dissertation systematizes eleven full-scale experiments involving window units with different component configurations. The programme distinguishes an exploratory stage, intended to identify critical zones and examine structural hypotheses, from a qualification stage with formally documented results. According to the published protocol-based data, five of the seven qualification specimens met their target classes: two met EXR1 (NS) and three met EXR2 (NS); two did not meet the target EXR2 (NS) class. This distribution describes the programme undertaken and is not a statistical estimate of the reliability of mass-produced products.

For the investigated reinforced PVC-profile structure, a mechanical connection is identified between the loss of integrity of the unreinforced welded corner zone and subsequent impairment of the adjacent fixing. The successful result of the specimen fitted with an external aluminium cover confirms the value of strengthening this perimeter to achieve EXR2 (NS). Conversely, failure of the mullion joint in a double-sash aluminium specimen shows that profile material and increased outer-pane thickness alone do not determine the outcome. The conclusions apply to the tested configurations.

The role of the internal 44.4 VSG laminated pane in retaining fragments while edge restraint remains effective is identified. Exploratory tests do not support treating tempered glass or an applied protective film without adequate frame retention as self-sufficient blast-protection measures. Separate recording of incident and reflected pressures provides more informative test instrumentation. Calculated and approximation-derived impulses are distinguished from results obtained by directly integrating measured pressure–time histories.

The potential use of previous test results when moving from EN 13123-2:2004 to EN 13123-2:2025 is examined. Formal comparison of class designations or exceedance of a peak-pressure threshold alone is insufficient: reflected pressure, positive reflected impulse, hazard criteria and test conditions must be assessed together. The analysis does not constitute the assignment of new PXR or VXR classes to the investigated products.

The **fourth chapter** of the dissertation develops recommendations for selecting and reproducing tested structural solutions. The systems approach is extended to the installation joint and wall opening as links transferring dynamic forces to the load-bearing substrate. A window-unit test report does not replace verification of the capacity of the particular opening to resist those forces. A tested-solution specification record is proposed, together with procedures for coordinating design, manufacture and installation, controlling configuration changes, and documenting acceptance of the installed structure.

Proposals concern the use of the 2025 editions of European standards and the development of national approaches to load specification. For scenarios not covered by fixed classes, the EN user-defined classes PXRU/VXRU are considered through a consistent pressure–impulse pair. A procedure is proposed for describing and confirming national scenarios, including the 20–100 kg range, with analytical load determination using the Kingery–Bulmash model. The experimental evidence concerns a 3 kg charge configuration and does not automatically extend to the entire stated range.

The General Conclusions summarise the theoretical, numerical and experimental findings and define the conditions for applying the proposed solutions. Further research concerns repeated controlled tests, additional pressure–time records, verification of modified configurations, and combined blast-wave and fragment effects.

The scientific novelty of the findings consists in identifying a sequential failure mechanism for the investigated protective load-bearing perimeter and

substantiating its reinforcement; defining local conditions for the application of the numerical mesh size; improving instrumentation and interpretation of full-scale tests; and establishing conditions for using archived data when the regulatory classification changes. Further developments concern the comparative assessment of analytical models, consideration of the installation joint and supporting substrate, and the description of loads for user-defined scenarios.

The practical significance lies in the substantiated selection of complete structures, test planning and reproduction of verified solutions in construction. Industrial implementation is documented by letters from “Kompaniia Vikna-Star” LLC dated 14 October 2026, No. 14; “Glas Troesch Kyiv” LLC dated 13 October 2026, No. 35; and “Winkhaus Ukraine” LLC dated 13 October 2026, No. 110. Implementation covers manufacture and installation of complete structures, insulating glass unit design, and technical support for hardware solutions. The material is also presented in the co-authored monograph “Modern Aspects of the Design and Installation Technology of Glazed Structures”.

**Keywords:** glazed building envelope structures, window unit, blast resistance, impact loading, air-blast wave, reflected pressure, positive impulse, full-scale testing, numerical simulation, ANSYS LS-DYNA, laminated glass, PVC profile, installation joint, protective load-bearing perimeter, critical infrastructure.

## LIST OF THE CANDIDATE'S PUBLICATIONS

*Publications presenting the principal scientific results of the dissertation*

1. Orlenko M. O. Testing translucent structures for shock wave resistance: analysis of international standards and prospects for their application in Ukraine. Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia [Modern Problems of Architecture and Urban Planning]. 2025. Issue 71. P. 658–669. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.71.658-669.

2. Orlenko M. O., Buravchenko V. S., Bisyk S. P. Experience of field tests of window units of various composition for shock wave resistance. Strength of Materials and Theory of Structures. 2025. No. 115. P. 383–395. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395.

*The candidate's personal contribution: development of the full-scale test programme; manufacture and installation of specimens; participation in testing; processing and interpretation of the results.*

3. Orlenko M. Analysis of structural factors affecting the compliance of window units with EXR1-EXR2 classes based on field blast test results. The Scientific Heritage. 2026. No. 185 (185). P. 9–15. DOI: 10.5281/zenodo.20455933.

4. Bisyk S. P., Orlenko M. O. Comparative analysis of mathematical models of air blast wave parameters and convergence of numerical simulation in assessing the blast resistance of glazed building envelope structures. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2026. No. 5 (369). P. 137–143. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-369-17.

*The candidate's personal contribution: formulation of the task of comparing analytical air-blast models; participation in processing numerical results and analysing convergence with respect to mesh size; formulation of the conclusions.*

5. Buravchenko V. S., Ovchynnikov O. O., Orlenko M. O. Rational structural solutions for glazed building envelope structures within the engineering protection system of critical infrastructure objects against explosive loads. Collection of

Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport. 2026. Issue 217. P. 168–180. DOI: 10.18664/1994-7852.217.2026.371910. [In Ukrainian].

*The candidate's personal contribution: systematisation of the tested structural solutions and substantiation of recommendations for their application at critical infrastructure facilities.*

*Co-authored monograph*

6. Bondarenko M. M., Orlenko M. O., Firsov D. V. Modern aspects of the design and installation technology of glazed structures: monograph. Kyiv: Lira-K, 2026. 117 p. ISBN 978-617-9002-20-5.

*The candidate's personal contribution: the chapter dealing with fragment resistance of glazed structures and the distinction between blast-wave and fragment effects.*

7. Orlenko M. O. Methods for assessing the impact resistance of glazed building envelope structures. Scientific Collection "InterConf": Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference "Challenges in Science of Nowadays" (Washington, USA, September 26–28, 2025). Washington: EnDeavours Publisher, 2025. No. 265. P. 99–102. Collection DOI: 10.51582/interconf.2025.265.

8. Orlenko M. O. Improvement of glazed building envelope structures in terms of resistance to impact loading. Current Issues in the Design of Structures. CIDS 2025: Proceedings of the International Scientific and Technical Symposium (Kyiv, October 30–31, 2025). Kyiv, 2025. P. 70–73. URL: https://scadsoft.com/Seminar/CIDS_Kyiv_2025.pdf.

9. Orlenko M. O. Glazed structures for critical infrastructure: full-scale blast-resistance testing of windows and practical solutions for recovery. Architecture, Construction, Design: Production, Informatisation, Management: Programme and Abstracts of the International Scientific and Technical Forum (Kyiv, November 24–25, 2025). Kyiv: Lira-K, 2025. P. 170–171.

## ЗМІСТ

**ВСТУП**…… 18

**РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ТА НОРМАТИВНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УДАРНОЇ СТІЙКОСТІ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ** …….. 28

1.1 Світлопрозорі огороджувальні конструкції в сучасному будівництві …….. 28

1.2 Класифікація ударних навантажень і характеристика загроз …… 34

1.3 Нормативні вимоги України, ЄС, США, NATO …… 42

1.4 Існуючі підходи до підвищення ударної стійкості …… 47

1.5 Аналіз науково-методичного апарату оцінки ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій …… 54

1.6 Методологічні межі оцінювання та обґрунтування напрямів дослідження ……. 59

Висновки до розділу 1 …… 65

**РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНИХ ПРОЦЕСІВ У СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ** ……. 66

2.1 Огляд математичних моделей оцінки параметрів ударної хвилі вибуху зарядів вибухової речовини …… 66

2.2. Організаційний інструментарій здійснення моделювання ударних процесів у світлопрозорих огороджувальних конструкціях …… 70

2.3 Методика та результати моделювання ударних процесів у світлопрозорих огороджувальних конструкціях …….. 78

2.4 Контроль достовірності розрахункових результатів і межі застосовності моделі …… 105

Висновки до розділу 2 …….. 110

**РОЗДІЛ 3. НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА СТІЙКІСТЬ ДО УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ** ……. 111

3.1 Обґрунтування вибору методики та критеріїв оцінки …….. 111

3.2 Програма експериментів ……. 117

3.3 Опис зразків і змінних факторів ……. 119

3.4 Результати випробувань базових конструкцій ……. 121

3.5 Класифікація результатів відповідно до міжнародних стандартів ..136

3.6 Поглиблена інтерпретація експериментальних результатів та межі їх узагальнення …….. 139

Висновки до розділу 3 ……... 144

**РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВИЩЕНОЇ УДАРНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ** …… 146

4.1 Конструктивно-технічні пропозиції для учасників будівництва … 146

4.2 Пропозиції щодо розвитку національної нормативної бази …… 155

4.3 Досвід запровадження результатів дослідження у будівництво….. 163

4.4 Запровадження результатів у методичну літературу та освітній процес …….. 167

4.5 Організаційно-технічне забезпечення відтворення захисних властивостей ……... 169

Висновки до розділу 4 ……... 174

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ……... 176

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …….. 180

ДОДАТОК А. 1 …….. 193

ДОДАТОК А. 2 …….. 195

ДОДАТОК А 3 ……197

ДОДАТОК Б ……..…… 199

# ВСТУП

**Актуальність теми.** Тенденції сучасного будівництва та архітектури характеризуються збільшенням функціональної та конструктивної ролі світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Сьогодні вони формують архітектурний образ будівлі, забезпечують природне освітлення та є важливою складовою забезпечення енергоефективності.

Разом із тим безпека будівель і споруд є одним із визначальних напрямів сучасного будівництва. У традиційній практиці вимоги до світлопрозорих огороджувальних конструкцій формувалися з огляду на їх функціональне призначення та відповідні загрози і передбачали критерії повітро- і водонепроникності, звукоізоляції, довговічності та стійкості до експлуатаційних навантажень. Однак реалії сьогодення вимагають розширення цього переліку.

Проблема безпеки світлопрозорих огороджувальних конструкцій набула для України принципово нового значення. Широкомасштабна збройна агресія Російської Федерації проти України спричинила безпрецедентні пошкодження житлової забудови, громадських будівель та об’єктів критичної інфраструктури.

В умовах воєнних дій ударне навантаження, спричинене вибухом, стало типовим сценарієм для будівель і споруд будь-якого призначення, тоді як раніше його розглядали лише для спеціалізованих захисних споруд. Сьогодні питання забезпечення належного рівня захисту стосується всіх видів будівель і споруд: закладів освіти, медичних установ, адміністративних будівель, об’єктів енергетики та житлової забудови.

Досвід експлуатації будівель і споруд в умовах систематичних ракетних та авіаційних ударів, застосування безпілотних літальних апаратів і пов’язаних із ними вибухових впливів засвідчує значні пошкодження будівель і споруд, втрату ними функціонального призначення, а також, на жаль, травмування та загибель людей.

Тож відповідно до поточної ситуації світлопрозорі огороджувальні конструкції, незалежно від об’єкта, на якому вони розташовуються, нині повинні виконувати й функцію захисту.

Водночас складність задачі посилюється тим, що світлопрозора огороджувальна конструкція є багатокомпонентною системою, і її поведінка під навантаженням від ударної хвилі визначається властивостями скла, структурою склопакета, жорсткістю рами та стулки, роботою армувальних елементів і фурнітури, а також монтажним вузлом і стіновим прорізом, через які динамічне навантаження передається на несучу основу будівлі. Саме тому необхідним є системний підхід до оцінювання всіх компонентів конструкції.

Нині існують різноманітні нормативні підходи, які передбачають різні методи оцінювання: натурні полігонні випробування, випробування із застосуванням ударної труби, чисельні розрахунки та математичне моделювання.

Разом із тим застосування цих методів в Україні станом на сьогодні потребує розвитку науково-методичної та технічної бази, оскільки метод випробування світлопрозорих огороджувальних конструкцій із застосуванням ударної труби в Україні недоступний через відсутність необхідного обладнання. Крім того, у період виконання роботи оприлюднено нові редакції європейських стандартів EN 13123-2:2025 та EN 13124-2:2025, які замінили методологію оцінювання: класи навантаження визначаються виміряними відбитим тиском та імпульсом замість номінальних маси заряду і відстані, а результат оцінюється класами небезпеки. Це зумовлює потребу в обґрунтуванні умов перенесення результатів випробувань між редакціями стандартів, а також у визначенні навантажень для сценаріїв, не охоплених фіксованими класами, зокрема для бойових частин ударних безпілотних літальних апаратів.

Окремим науковим викликом, що істотно посилює складність задачі, є різноманітність вибухового навантаження. Повітряна ударна хвиля є

швидкоплинним нестаціонарним процесом, що характеризується різким підвищенням тиску, позитивною та негативною фазами, тривалістю та імпульсом. Параметри хвилі значною мірою залежать від маси та властивостей вибухової речовини, геометрії заряду, відстані до об'єкта, умов детонації та інших чинників.

Існуючі математичні моделі визначення параметрів повітряної ударної хвилі ґрунтуються на різних теоретичних, емпіричних і напівемпіричних підходах, результати яких можуть відрізнятися. Така ситуація зумовила необхідність порівняльного аналізу моделей, чисельного відтворення детонації та поширення ударної хвилі з обґрунтуванням параметрів дискретизації розрахункової моделі, а також верифікації результатів за даними натурного експерименту.

**Аналіз наукових досліджень і ступінь розробленості проблеми.** Аналіз праць науковців і практиків із проєктування та влаштування світлопрозорих огороджувальних конструкцій, оцінювання їхніх експлуатаційних властивостей і стійкості до вибухових навантажень, таких як Б. І. Басок, О. М. Недбайло, Д. Б. Давиденко, Н. Г. Беспала, С. П. Бісик, Л. С. Давидовський, Г. С. Ратушняк, В. В. Панкевич, К. М. Нетеса та Є. Г. Фаренюк, дає підстави розглядати підвищення захисних властивостей таких конструкцій як міждисциплінарне завдання. Його розв'язання потребує узгодження будівельної механіки, матеріалознавства, методів визначення вибухового навантаження, організаційно-технологічних рішень улаштування огороджень та експериментального підтвердження їхніх характеристик [1; 2; 27; 30; 34; 45].

У працях Г. С. Ратушняка та В. В. Панкевича розглянуто фактори безпеки вікон за дії вибухової хвилі; у дисертаційному дослідженні В. В. Панкевича вибір віконних конструкцій пов'язано з комплексом експлуатаційних, економічних і безпекових критеріїв [30; 34]. Дослідження Є. Г. Фаренюка присвячене тепловому режиму світлопрозорих огороджень, а

робота К. М. Нетеси — раціональним організаційно-технологічним рішенням улаштування фасадних систем [27; 45]. Ці напрями формують контекст вибору та застосування огороджень у будівництві, проте оцінювання енергоефективності або технології виконання робіт не замінює окремого підтвердження стійкості комплектної конструкції до повітряної ударної хвилі.

Безпосередньо фізичним чинникам впливу вибуху на світлопрозорі огородження та огляду методів їх тестування присвячено працю Б. І. Басока, О. М. Недбайла, Д. Б. Давиденка та Н. Г. Беспалої [1]. Порівняння математичних моделей оцінки параметрів ударної хвилі розглянуто С. П. Бісиком, Л. С. Давидовським та співавторами [2]. Суміжний напрям становлять дослідження В. І. Коцюруби, А. С. Білика, А. О. Веретнова та співавторів щодо розрахунків і обґрунтування вимог до інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури [22]. Для цієї дисертації зазначені праці важливі як основа постановки задачі навантаження та розмежування захисту об’єкта загалом і захисних властивостей конкретного віконного блока.

Математичну основу розгляду повітряної ударної хвилі становлять також класичні моделі Садовського, Kingery–Bulmash, Kinney–Graham, Newmark–Hansen та Henrych [36; 73; 83; 84; 95]. Вони дають змогу одержувати аналітичні оцінки параметрів хвилі, які використовуються для постановки розрахункових задач і зіставлення з результатами чисельного моделювання. Водночас розбіжності таких оцінок потребують урахування виду вибуху, масштабованої відстані та фізичного змісту порівнюваного показника. Тому для обґрунтування навантаження на світлопрозору конструкцію необхідно розрізняти падаючий і відбитий тиск, пік та імпульс, а також відхилення між моделями й оцінку достовірності за експериментальними даними [2; 4].

Зв’язок конструктивного рішення з технологією встановлення у стіновий проріз розглянуто в колективній монографії М. М. Бондаренка, М. О. Орленка та Д. В. Фірсова [6], підготовленій за участі здобувача. У ній поєднано питання вибору світлопрозорих конструкцій, організаційної підготовки

монтажу, передавання навантажень через кріплення та розмежування хвильової й уламкової дії. Для практичного застосування результатів дисертації це визначає необхідність забезпечувати відповідність між випробуваною комплектацією, проєктною специфікацією та фактично виконаним монтажним вузлом, а не обмежуватися перевіркою окремого матеріалу або виробу.

Узагальнення розглянутих напрямів досліджень дає підстави визначити коло завдань, на яких зосереджено цю дисертацію: узгодити аналітичні й чисельні оцінки навантаження з даними натурних випробувань; встановити критичні зони досліджених конструкцій і механізми їх відмови; обґрунтувати способи підсилення та умови відтворення перевірених рішень у будівництві. Принциповим є спільне оцінювання склопакета, профільної системи, фурнітури, монтажного вузла й опорної основи. При цьому розрахункове уточнення параметрів хвилі не підмінює випробування комплектного віконного блока, а позитивний результат окремого зразка не поширюється без додаткового обґрунтування на інші розміри, конфігурації та умови закріплення [4; 6; 28; 96].

Тож актуальним науково-практичним завданням дисертаційної роботи є розвиток методів оцінювання поведінки світлопрозорих огороджувальних конструкцій під дією ударних навантажень на основі поєднання теоретичного аналізу, математичного та чисельного моделювання і натурних випробувань, а також підготовка рекомендацій щодо ефективних конструктивних рішень для підвищення їх захисних властивостей.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Тематика дисертаційного дослідження за своєю спрямованістю узгоджується з пріоритетами забезпечення безпечних умов життєдіяльності людини, розвитку цивільного захисту та підвищення стійкості критичної інфраструктури, визначеними Стратегією національної безпеки України, затвердженою Указом Президента України від 14.09.2020 № 392/2020.

Дослідження також тематично відповідає напряму захисту критичної інфраструктури, передбаченому Національним планом захисту та забезпечення безпеки та стійкості критичної інфраструктури, затвердженим розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19.09.2023 № 825-р. У дисертаційній роботі зазначені напрями розглянуто в частині підвищення стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій до повітряної ударної хвилі, зменшення небезпеки вторинного уламкоутворення та обґрунтування конструктивних і монтажних рішень для будівель цивільного призначення й об’єктів критичної інфраструктури.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є наукове обґрунтування підходів до підвищення ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій на основі встановлення закономірностей взаємодії їх конструктивних елементів під дією повітряної ударної хвилі шляхом комплексного застосування аналітичних (математичних) розрахунків, чисельного моделювання та натурних випробувань із подальшим обґрунтуванням конструктивних рішень і розробленням практичних рекомендацій щодо їх застосування.

Для досягнення мети передбачено такі **завдання**:

– проаналізувати теоретичні основи, актуальні наукові дослідження та нормативні вимоги щодо забезпечення ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій, зокрема зміни, запроваджені редакціями EN 13123-2:2025 та EN 13124-2:2025, і встановити умови перенесення результатів випробувань між редакціями стандартів;

– виконати порівняльне дослідження існуючих математичних моделей визначення параметрів повітряної ударної хвилі та встановити межі їх застосовності за масштабованою відстанню;

– розробити чисельну модель поширення повітряної ударної хвилі та її взаємодії з вертикальною перепоною і встановити залежність точності моделювання від кроку дискретизації скінченно-елементної сітки;

– розробити методику інструментального супроводу натурних полігонних випробувань з одночасною реєстрацією падаючого та відбитого тиску і провести серію натурних випробувань світлопрозорих огороджувальних конструкцій різної комплектації;

– визначити фактичні параметри повітряної ударної хвилі, утвореної підривом зарядів вибухової речовини під час натурних випробувань, та обґрунтувати оцінювання результатів випробувань за виміряним відбитим тиском;

– встановити вплив конструктивних елементів світлопрозорих огороджувальних конструкцій – склопакета, профільної системи, армування, фурнітури та монтажного вузла – на відповідність вимогам ударної стійкості та механізм їх відмови;

– розробити рекомендації щодо конструктивного вдосконалення світлопрозорих огороджувальних конструкцій у частині підвищення їх захисних властивостей під дією ударної хвилі, а також пропозиції щодо класифікації вибухових навантажень для сценаріїв, не охоплених чинними класами стандартів.

**Об’єктом дослідження** є світлопрозорі огороджувальні конструкції, які використовуються при будівництві як будівель цивільного призначення, так і об’єктів критичної інфраструктури.

**Предметом дослідження** є параметри та закономірності деформування і руйнування світлопрозорих огороджувальних конструкцій під дією ударних навантажень.

**Методи дослідження.** Аналіз і узагальнення наукових публікацій та нормативних документів; аналітичні (математичні) моделі визначення параметрів повітряної ударної хвилі; чисельне моделювання методом скінченних елементів у постановці 2D ALE з використанням програмного комплексу ANSYS LS-DYNA; натурні полігонні випробування за ДСТУ EN

13124-2:2006 з інструментальною реєстрацією тиску; порівняльний аналіз результатів аналітичного, чисельного та експериментального досліджень.

**Наукова новизна** роботи полягає в розвитку розрахунково-експериментального підходу до оцінювання та підвищення ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій.

*Уперше* встановлено механізм послідовної відмови дослідженої ПВХ-конструкції через руйнування неармованої кутової зони та підтверджено ефективність підсилення алюмінієвою накладкою для досягнення EXR2 (NS); обґрунтовано умови використання результатів випробувань між редакціями EN 13123-2:2004 і EN 13123-2:2025 з урахуванням відбитих тиску й імпульсу та критеріїв небезпеки; визначено залежність розрахованих піків тиску від кроку сітки у постановці 2D ALE і локальні межі застосування дискретизації.

*Удосконалено* методику інструментального супроводу натурних випробувань шляхом одночасної роздільної реєстрації падаючого й відбитого тисків та підхід до інтерпретації результатів через доповнення якісної оцінки аналізом виміряного навантаження й пошкоджень.

*Набули подальшого розвитку* системне оцінювання вибухостійкості з урахуванням монтажного вузла та стінового прорізу; порівняльна оцінка аналітичних моделей за міжмодельними розбіжностями та зіставленням із чисельними результатами; підхід до задання навантажень класів користувача PXRU/VXRU парою «тиск — імпульс».

**Практичне значення отриманих результатів дослідження:**

– розроблено рекомендації щодо вибору й підсилення світлопрозорих огороджувальних конструкцій класів EXR1 (NS) і EXR2 (NS) для випробуваних конфігурацій, зокрема ПВХ-системи із зовнішньою алюмінієвою накладкою;

– сформовано рекомендації щодо інструментального супроводу натурних випробувань, перевірки монтажного вузла та стінового прорізу, документування й відтворення випробуваних рішень;

– результати дисертаційного дослідження впроваджено у виробничу діяльність підприємств:

а) ТОВ «Компанія Вікна-Стар» — під час проєктування, виготовлення та монтажу комплектних світлопрозорих конструкцій (довідка № 14 від 14.10.2026);

б) ТОВ «Глас Трьош Київ» — під час проєктування та виготовлення склопакетів для конструкцій підвищеної стійкості до повітряної ударної хвилі (довідка № 35 від 13.10.2026);

в) ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» — у технічному супроводі застосування віконної фурнітури у світлопрозорих конструкціях підвищеної ударної стійкості (довідка № 110 від 13.10.2026). Довідки про впровадження наведено в додатках А–В.

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі науково-технічної літератури та нормативних вимог, опрацюванні експериментальних даних і розробленні рекомендацій щодо підвищення ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій.

Дисертаційне дослідження виконано під науковим керівництвом доктора технічних наук, професора Бісика Сергія Петровича та кандидата технічних наук, доцента Буравченка Всеволода Сергійовича.

У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в розробленні програми випробувань, виготовленні й монтажі дослідних зразків, участі у випробуваннях та аналізі результатів; постановці задачі порівняння аналітичних моделей, участі в обробленні результатів чисельного моделювання й аналізі збіжності та формулюванні висновків; систематизації конструктивних рішень і розробленні рекомендацій щодо їх застосування на об’єктах критичної інфраструктури. У колективній монографії здобувачеві належить розділ, присвячений уламкостійкості світлопрозорих конструкцій і розмежуванню хвильової та уламкової дії.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи оприлюднено на чотирьох наукових заходах, з яких три міжнародні: VIII науково-практичній конференції «Теорія і практика формування і розвитку дизайну архітектурного середовища: проблеми відновлення архітектурного і міського середовища в Україні» (м. Київ, КНУБА, 18 квітня 2023 р.; усна доповідь онлайн); XV Міжнародній науково-практичній конференції «Challenges in Science of Nowadays» (м. Вашингтон, США, 26–28 вересня 2025 р.; заочна участь); Міжнародному науково-технічному симпозіумі «Current Issues in the Design of Structures» (CIDS 2025) (м. Київ, 30–31 жовтня 2025 р.); Міжнародному науково-технічному форумі «Архітектура, Будівництво, Дизайн: Виробництво, Інформатизація, Менеджмент» (м. Київ, КНУБА, 24–25 листопада 2025 р.; доповідь онлайн).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано дев’ять наукових праць: п’ять статей (чотири — у наукових виданнях України, одна — у закордонному виданні), одну колективну монографію та три публікації тез доповідей. Дві статті виконано одноосібно.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з титульного аркуша, анотацій українською та англійською мовами зі списками публікацій здобувача, змісту, вступу, чотирьох розділів із висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 200 сторінок, із них основний текст 162 сторінки. Дисертація містить 44 рисунки та 16 таблиць. Список використаних джерел налічує 109 найменувань. Наявні 4 додатки загальним обсягом 8 сторінок.

# РОЗДІЛ 1
# ТЕОРЕТИЧНІ ТА НОРМАТИВНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УДАРНОЇ СТІЙКОСТІ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

## 1.1 Світлопрозорі огороджувальні конструкції в сучасному будівництві

Світлопрозорі огороджувальні конструкції (СОК) є ключовим елементом сучасного будівництва, оскільки поєднують естетичні, функціональні та енергозберігаючі властивості. В умовах зростання техногенних і природних загроз ударна стійкість таких конструкцій набуває особливої важливості. Будівлі з великими площами засклення піддаються значним ризикам механічних пошкоджень під час терористичних актів, вибухів, стихійних лих, аварій, а також унаслідок нещасних випадків або актів вандалізму. Тому впровадження інноваційних технологій і підходів до забезпечення надійності та безпечності світлопрозорих елементів є необхідним [21; 38].

Ударна стійкість конструкцій визначає їхню здатність протистояти зовнішнім динамічним навантаженням без втрати основних функцій. Для СОК це означає не лише запобігання руйнуванню, а й забезпечення захисту від уламків скла, які можуть завдати шкоди людям. Відповідно до сучасних нормативів ЄС, США та України, до світлопрозорих конструкцій висуваються суворі вимоги щодо безпеки, що зумовлює необхідність удосконалення матеріалів, форм, технологій монтажу та методів оцінки стійкості [6; 25].

Проблематика ударної стійкості СОК набуває особливої актуальності в умовах воєнного стану, оскільки численні об’єкти цивільної та критичної інфраструктури в Україні зазнають обстрілів. Питання підвищення ударної

стійкості СОК є не лише технічним, а й гуманітарним, оскільки безпека людей у громадських будівлях, освітніх установах і медичних закладах безпосередньо залежить від ефективності таких систем. Розробка та впровадження ударостійких світлопрозорих конструкцій сприяє зниженню кількості травм і жертв у надзвичайних ситуаціях, а також мінімізації матеріальних збитків.

Наукові дослідження, спрямовані на підвищення ударної стійкості, охоплюють широкий спектр питань: від аналізу типів ударних навантажень до вибору матеріалів, технологій ламінування, композитних структур, а також методів випробувань і стандартизації. Дослідження цієї теми має не лише наукову новизну, а й значну практичну цінність, оскільки сприяє підвищенню рівня безпеки в будівництві, забезпеченню стійкості критичної інфраструктури та гармонізації українських норм із міжнародними стандартами [22; 24; 35; 39].

Проблематика ударної стійкості СОК є міждисциплінарною та охоплює будівельну механіку, матеріалознавство, безпекові технології й архітектуру. Актуальність дослідження підтверджується як на державному, так і на міжнародному рівні. Це сприятиме створенню більш безпечного, комфортного та енергоефективного середовища для проживання і роботи населення.

Огляд суміжних досліджень допомагає відокремити питання енергоефективності, організації фасадних робіт і спеціальної стійкості до динамічних впливів. Праці з цих тем створюють спільний контекст використання світлопрозорих конструкцій, але не дають доказів, які можна напряму використати для оцінки вибухостійкості.

У дисертації Панкевича В. В. розв’язано науково-практичну задачу багатокритеріального вибору віконних конструкцій для житлових будівель. У роботі враховано енергоефективність, архітектурну привабливість, функціональність, ринкову ціну, рівень захищеності конструкції та безпекову

ситуацію на відповідній території. Автор запропонував інтегральну модель і алгоритм для вибору оптимальних варіантів віконних конструкцій, у яких новим є врахування стійкості до ударної хвилі та пов'язаних ризиків залежно від безпекової ситуації. Вибір віконної конструкції розглядають як частину фундаментальних рішень на етапі проєктування [30].

У дослідженні Мустафи Махмуда Абдулгані Мустафи йдеться про архітектурне і планувальне вирішення об'єктів громадського обслуговування у транспортно-пересадочних вузлах. Для цієї роботи це приклад архітектурного використання огороджень, а не джерело експериментальних даних про їх вибухостійкість [26].

Дисертація Нетеса К.М. заслуговує уваги, оскільки в ній розглянуто проблеми впровадження ресурсозберігаючих технологій під час улаштування фасадних систем багатоповерхових житлових і громадських будівель та запропоновано шляхи їх вирішення [27].

І. І. Венгрин досліджує енергоефективні геліосистеми, які вбудовують у світлопрозорі конструкції будівель. Автор описує, що треба поєднувати функції огородження з роботою інженерних систем. Висновки про монтаж під час вибухового навантаження треба перевірити за окремими джерелами [8].

У дисертації Фаренюка Є. Г. виконано аналітичне і експериментальне дослідження теплового режиму світлопрозорих огороджувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель. Автор удосконалив методику розрахунку енергетичних характеристик цих конструкцій, а також вивчив, як ступінь чорноти скла, кількість шарів скла та температура навколишнього середовища впливають на опір теплопередачі і довговічність газонаповнених склопакетів. Визначено економічну доцільність застосування конструкцій з високим опором теплопередачі [45].

Також важливо зазначити, що дослідження стосується основних натурних методів визначення параметрів ударної хвилі у реальному часі та чинників, які впливають на її руйнівну дію на елементи огороджувальних

конструкцій будівель [1].

Отже, багато наукових праць стосуються цих питань, але це питання досі не вирішили повністю.

В контексті даної дисертаційної роботи доцільно перш за все уточнити сутність поняття «світлопрозорі огороджувальні конструкції» та обґрунтувати, що саме розуміється під такими конструкціями. Узагальнення існуючих поглядів представлено в таблиці 1.1.

Аналіз визначень, наведених у таблиці 1.1, демонструє, що дослідники розглядають світлопрозорі огороджувальні конструкції (СОК) з різних підходів: матеріалознавчого, архітектурного, енергозберігаючого та інших. Спільною рисою є те, що СОК являють собою прозорі елементи, які одночасно виконують функції освітлення, ізоляції та захисту. Це визначення використовується як базове у даній дисертаційній роботі. Водночас у наявних трактуваннях відсутня єдина класифікаційна ознака, спостерігається різний рівень технічної деталізації та акцентування на окремих функціях, таких як безпека, естетика, теплозбереження. Це підкреслює необхідність подальшої стандартизації поняття та гармонізації термінології.

У межах цієї роботи поняття конструкції конкретизується через три взаємопов’язані рівні: матеріал скління, комплектний віконний блок та блок, установлений у певний стіновий проріз. На першому рівні визначаються властивості скла та полімерного прошарку; на другому — спільна робота заповнення, рами, стулки і фурнітури; на третьому — умови передавання зусиль на будівлю. Такий поділ не формує трьох незалежних класів вибухостійкості, а уточнює, до якого об’єкта належить кожний отриманий результат. Зокрема, характеристику матеріалу не можна без додаткової перевірки приписувати виробу, а характеристику виробу — довільному монтажному рішенню [66; 96].

*Таблиця 1.1*

Погляди на сутність поняття «світлопрозорі огороджувальні конструкції» в сучасній літературі

| Джерело | Визначення поняття |
|---|---|
| 1 | 2 |
| ДБН В.2.6-31:2021 [10] | Світлопрозорі конструкції — ділянки теплоізоляційної оболонки будівлі (вікна, балконні та вхідні двері, вітражі, скляні фасадні системи, вітрини, ліхтарі тощо), що пропускають видиме світло |
| Злоба В. В. [20] | Світлопрозорі огороджувальні конструкції (СПОК) – це будівельні конструкції, які забезпечують природне освітлення та візуальний зв'язок з навколишнім середовищем, а також виконують функції теплоізоляції та захисту. |
| Мартинов В. Л. [25] | Конструкції, що складаються з прозорих або напівпрозорих матеріалів, таких як скло, полікарбонат, або акрил, закріплених на каркасі. |

Джерело: узагальнено за [10; 20; 25].

Відповідно, збереження захисної функції та експлуатаційної придатності слід описувати окремо. Розтріскане ламіноване заповнення може залишатися в рамі та утримувати уламки, однак це не підтверджує його водонепроникності, можливості відкривання стулки або придатності до подальшої експлуатації. У подальшому аналізі доцільно розрізняти стан скління, стан несучого контуру та наслідки для захищеного простору. Таке розмежування забезпечує змістовнішу характеристику результату, ніж узагальнене визначення «вікно збереглося», і сприяє узгодженню дослідницьких висновків із потребами відновлення будівлі [28; 96].

Крім того доречно розглянути напрями використання світлопрозорих огороджувальних конструкцій, що узагальнено в таблиці 1.2.

*Таблиця 1.2*

Напрями використання світлопрозорих огороджувальних конструкцій

| Напрям | Характеристика |
|---|---|
| 1 | 2 |
| Житлове будівництво | Забезпечення природного освітлення, енергоефективність, естетика. |
| Громадські будівлі | Створення комфортного середовища в офісах, школах, лікарнях. |
| Торговельно-розважальні центри | Максимальне використання природного світла, привабливість фасадів. |
| Промислові об’єкти | Освітлення великих площ, зниження витрат на електроенергію. |
| Транспортна інфраструктура | Скління вокзалів, аеровокзалів, шумозахисні екрани. |
| 1 | 2 |
| Спортивні споруди | Покращення візуального комфорту глядачів та спортсменів. |
| Реставрація та реконструкція | Збереження історичної автентичності з використанням сучасних технологій. |
| Системи безпеки | Встановлення протиударних, протипожежних та кулестійких конструкцій. |

Проаналізовані в таблиці 1.2 напрями використання світлопрозорих огороджувальних конструкцій свідчать про їхню універсальність та значущість у сучасному будівництві. Вони забезпечують не лише функціональні властивості, такі як освітлення та енергозбереження, а й відіграють ключову роль у формуванні архітектурного вигляду будівель. Загалом застосування світлопрозорих огороджувальних конструкцій охоплює житловий, громадський, промисловий, транспортний і культурний сектори. Окрім цього, особливе значення надається конструкціям підвищеної безпеки, що можуть протидіяти різноманітним загрозам, включаючи ударні

навантаження.

## 1.2 Класифікація ударних навантажень і характеристика загроз

Сутність ударних навантажень на світлопрозорі огороджувальні конструкції полягає у впливі зовнішніх сил короткочасної, імпульсної або динамічної природи, які здатні спричинити механічне руйнування або втрату функціональності конструкції. Такі навантаження є особливо критичними для елементів зі скла, полікарбонату або інших прозорих матеріалів, механічні властивості яких суттєво різняться: для скла характерне крихке руйнування, тоді як полімерні матеріали демонструють інші механізми деформування.

Джерелами ударних навантажень можуть виступати людський фактор (вандалізм, випадкове зіткнення); природні явища (град, падіння гілок дерев, уламки під час буревіїв); аварійні ситуації (ударна хвиля, зіткнення транспорту, падіння важких предметів); військові дії (ураження куль, уламків, вибухів тощо).

Світлопрозорі огороджувальні конструкції використовуються не лише в житловому, а й у громадському, комерційному та військовому будівництві, зокрема — в аеропортах, вокзалах, ТРЦ, фасадах офісів, укриттях. У зв’язку з цим їхня здатність протистояти ударним впливам є вирішальною для забезпечення безпеки користувачів, цілісності будівлі та надійності її експлуатації.

Водночас, наслідки ударного навантаження:

- руйнування цілісності конструкції (тріщини, пробоїни, розбиття);
- втрата тепло- та звукоізоляційних властивостей;
- небезпека для людей через уламки та падіння елементів;
- порушення безперервності захисту від зовнішнього середовища (атмосферні опади, вітер, пил).

Специфіка ударних навантажень представлена на рисунку 1.1:

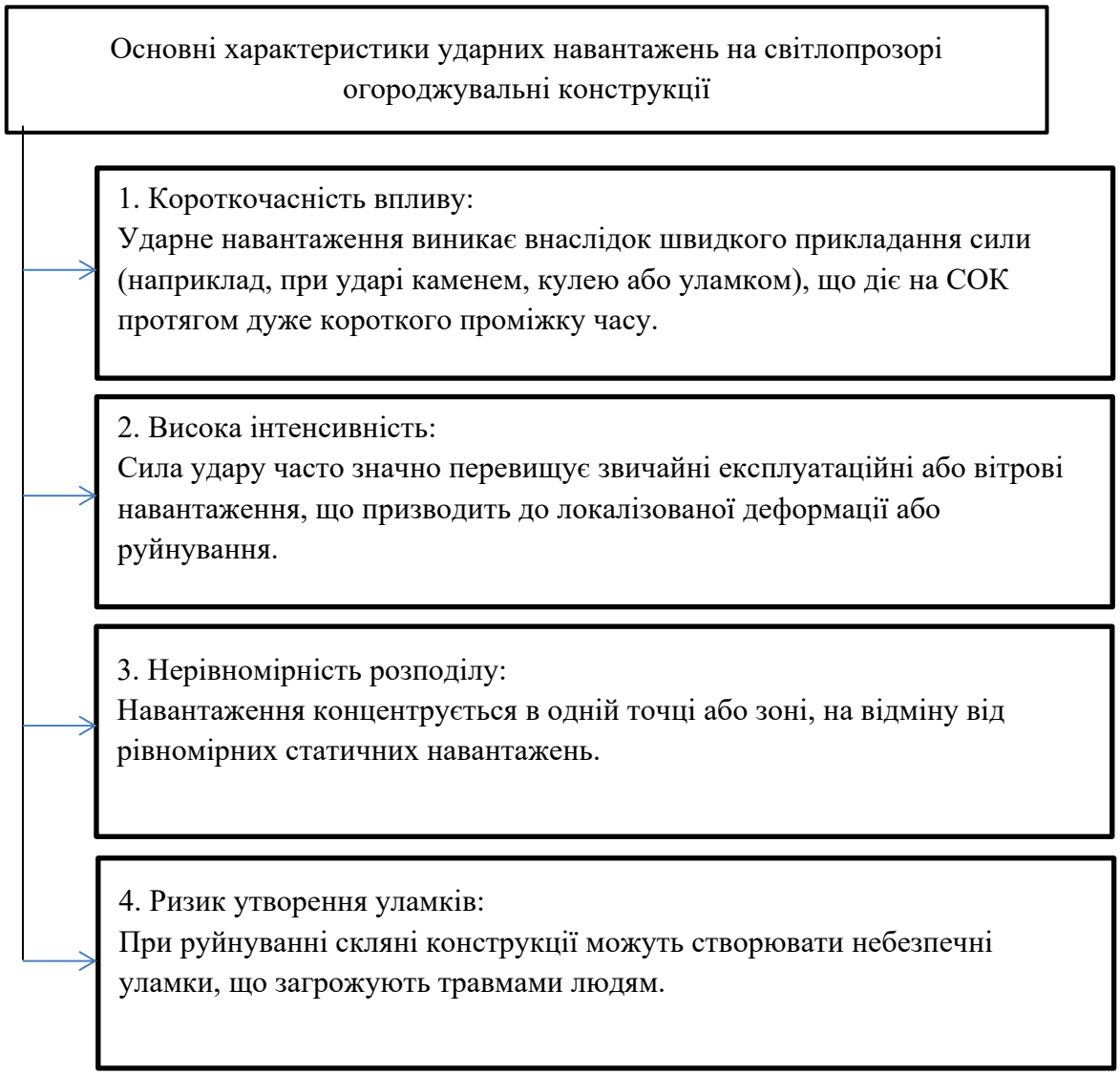



Рисунок 1.1 Основні характеристики ударних навантажень на світлопрозорі огороджувальні конструкції

*Джерело: розроблено автором.*

Ударні навантаження, що впливають на світлопрозорі огороджувальні конструкції (СОК), класифікуються за джерелом, характером дії, тривалістю та інтенсивністю.

Основні типи загроз:

**1.** Механічні: Випадкові удари предметами; Людський фактор (навмисне пошкодження).

Механічні ударні навантаження виникають у разі зіткнення предмета з конструкцією за відсутності значної початкової швидкості. До таких навантажень належать удари побутовими або робочими інструментами, падіння предметів з невеликої висоти, а також навмисні дії людини, зокрема натискання, штовхання чи кидання твердих предметів. Ця категорія охоплює пошкодження вітрин у магазинах, офісах і школах, спричинені неконтрольованою поведінкою людей або хуліганськими діями.

Механічні загрози характеризуються відносно низькою кінетичною енергією. Локалізований вплив може спричинити утворення мікротріщин, відколів і втрату герметичності склопакетів. Зазвичай це призводить до часткового руйнування, пошкодження шарів ламінування або виходу з ладу ущільнювальних елементів.

Великі вікна, балконні двері та фасадні елементи без додаткового армування є вразливими до пошкоджень. Удар гострим або вузьким предметом навіть із незначною силою може призвести до тріщин через високий тиск у місці контакту. Механічні загрози часто залишаються поза увагою, хоча становлять серйозну небезпеку для житлових і комерційних приміщень.

Для захисту від механічних загроз застосовують загартоване або ламіноване скло, а також спеціальні плівки, що утримують уламки разом. Такі заходи дозволяють запобігти порізам і травмам під час руйнування скла, а також зменшити витрати на його заміну. Важливо враховувати спосіб монтажу: надто жорстке закріплення скла може спричинити утворення додаткових тріщин у разі удару.

Механічні загрози часто виникають на об’єктах з великим потоком людей, як-от торговельні центри, лікарні, школи та транспортні вузли. Для таких об'єктів розробляють системи скління, які витримують побутові навантаження і удари м’якими предметами. Оцінювання ризиків механічного впливу має бути обов’язковою частиною проєктування систем скління.

**2. Динамічні, у тому числі вибухи** (воєнні або побутові).

Динамічні ударні навантаження виникають внаслідок дії високошвидкісних імпульсів або вибухових явищ, які передають значну енергію за короткий проміжок часу. До таких навантажень належать вибухи (військові, побутові, промислові), падіння важких предметів із великої висоти, ударні хвилі та високочастотні вібрації. Ці загрози є особливо небезпечними через раптовість та здатність спричиняти повне руйнування скляних елементів.

Газові вибухи, спричинені витоками або несправністю обладнання, є ще одним суттєвим фактором ризику. Вибух призводить до миттєвого поширення тиску всередині приміщення, що може призвести до виштовхування вікон та дверей назовні. У таких випадках тиск перевищує розрахункові конструктивні навантаження у 5–10 разів, тому навіть якісно змонтовані елементи можуть не витримати. Ефективний захист забезпечується використанням армованих склопакетів та спеціальних кріплень із гнучкими вузлами, які частково поглинають навантаження.

Динамічний вплив характеризується нелінійністю: конструкція зазнає миттєвого перенавантаження, яке у десятки або сотні разів перевищує її стандартну несучу здатність. Світлопрозорі огороджувальні конструкції не встигають розсіювати енергію через інерційність, що призводить до миттєвого руйнування всієї площі скління.

Ударна хвиля має складну структуру: фронтальна частина створює максимальний тиск, а після проходження хвилі виникає зона розрідження. Це спричиняє явище «всмоктування», що призводить до подвійного руйнування: спочатку внаслідок тиску, а потім унаслідок розриву. Найбільш вразливими залишаються великі фасадні елементи без сегментування або жорсткої рами.

Для протидії динамічним загрозам застосовують триплексовані системи з багатошаровим ламінуванням, армоване або загартоване скло з полімерними вставками. Додатково використовують рамні профілі з демпфуючими

елементами для поглинання імпульсу. Необхідно забезпечити достатню гнучкість та еластичність конструкції для ефективного розсіювання енергії.

Оцінювання динамічної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій (СОК) здійснюється шляхом випробувань на вибухових полігонах або за допомогою чисельного моделювання. Цей тип загроз є особливо актуальним у сучасних умовах, зокрема в Україні, де об'єкти інфраструктури часто піддаються ракетним обстрілам. Підвищення динамічної стійкості скління визначається як пріоритет у проєктуванні захищених об'єктів.

Різницю між інтенсивністю і тривалістю впливу можна показати без прив’язки до певного вибухового випадку. На рисунку 1.2 показано три умовних трикутні графіки позитивного надлишкового тиску з однаковим піком $p_0$, але різною тривалістю $t_+$. Позначення $p_0$ і $t_0$ тут — це довільні базові значення для нормування; $p_0$ не дорівнює атмосферному тиску. Для заданої форми $p(t) = p_0(1 - t/t_+)$ у межах $0 \le t \le t_+$ позитивний питомий імпульс дорівнює площі трикутника: $I_+ = p_0 t_+ / 2$. Зв’язок форми часової функції з її інтегральними параметрами лежить в основі опису короткочасного навантаження [87].

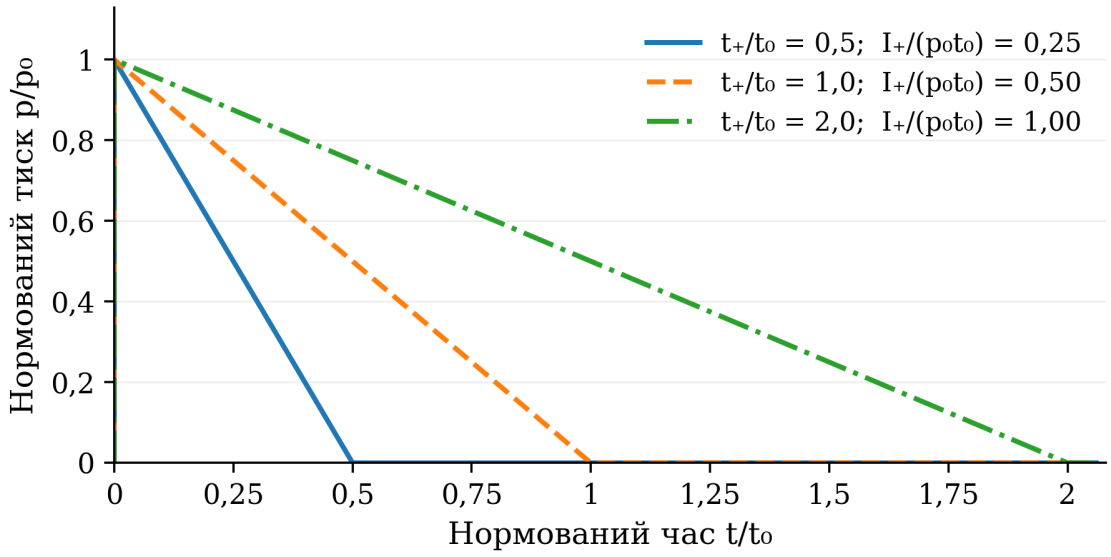



Рисунок 1.2 Умовні залежності позитивного надлишкового тиску з однаковим піком та різним імпульсом

*Джерело: розроблено автором.*

За тривалостей $t_+/t_0 = 0,5$; 1,0 та 2,0 нормовані імпульси дорівнюють 0,25; 0,50 та 1,00. У крайніх випадках максимальний тиск однаковий, а імпульс відрізняється в чотири рази. Це показує, що якщо упорядковувати впливи лише за максимальним тиском, частина інформації губиться навіть у простій часовій моделі. Проте цей приклад не означає, що прогини чи пошкодження теж відрізнятимуться в чотири рази, бо на відповідь конструкції впливають також її маса, жорсткість, демпфування і стан зв’язків.

Коли використовують таку ідеалізацію, потрібно зберігати фізичний зміст параметрів. Падаючий тиск і його імпульс описують хвилю в певній точці середовища, а відбиті значення показують, як хвиля взаємодіє з поверхнею. Якщо об'єднати пік одного сигналу з тривалістю іншого, це не дає узгодженого опису навантаження. У реальних експериментах форму позитивної фази, повторні піки та негативну фазу фіксують за часовими записами. Трикутна залежність — це тільки пояснювальна модель і не може замінити реєстрацію [28; 87].

**3.** Природні: Буревії, град, об’єкти, знесені вітром.

Природні загрози формують окрему категорію ударних навантажень, що виникають унаслідок стихійних явищ, таких як сильний вітер, буревії, град, підтоплення та землетруси. Ці явища характеризуються непередбачуваністю та здатністю охоплювати значні території, впливаючи на фасадні поверхні у багатьох точках одночасно. Світлопрозорі конструкції є особливо вразливими до впливу природних факторів через відкриту геометрію та фізичні властивості матеріалів, зокрема скла і полікарбонату.

Град великого діаметра є типовим джерелом локалізованих ударних впливів. Частинки льоду можуть досягати швидкості понад 30 м/с і маси понад 100 г. Удар такого об’єкта концентрується на невеликій площі, що призводить до вм’ятин, тріщин або пробиття скла. Пластикові та полікарбонатні панелі

мають вищу стійкість до граду, однак при тривалому впливі втрачають прозорість і форму.

Буревії супроводжуються сильним натиском вітру та принесеними уламками, що призводить до багаторазових ударів твердими предметами. У таких умовах важливу роль відіграють не лише скло, а й кріплення, ущільнювачі та монтажні шви. Найчастіше пошкодження виникає внаслідок відриву частини конструкції або її деформації після першого сильного удару.

Додатковими природними джерелами ударного навантаження є хвилі під час шторму в прибережних зонах, удари льоду під час замерзання дахів, а також землетруси. Під час землетрусу, хоча скло не є основним елементом несучої системи, воно зазнає вторинних ударів від деформованих рам або падіння предметів з висоти.

Для захисту від природних загроз застосовують багатошарові скла з полімерними плівками, гнучкі полімерні вставки між модулями та армовані системи профілів. Необхідно регулярно оглядати елементи кріплення і герметизації, а також використовувати захисні жалюзі або зовнішні ролети для тимчасового укриття. У регіонах з частими погодними катаклізмами ці заходи мають бути обов’язковими під час проєктування.

4. Аварійні ситуації: Падіння елементів конструкцій;

ДТП з проникненням у скляну зону.

Аварійні загрози виникають через техногенні ситуації, які пов’язані з несправністю обладнання, порушенням правил експлуатації або зовнішнім втручанням. До них відносяться падіння будівельних елементів, транспортні аварії та вторинні ураження після пожеж або обвалів. Світлопрозорі огороджувальні конструкції у таких випадках стають зоною ризику. Їх руйнування може призвести не лише до матеріальних збитків, а й до людських жертв.

Одне з найпоширеніших джерел аварійної загрози — це падіння важких предметів: будівельних інструментів, частин фасаду, елементів покрівлі чи

обшивки. Такі предмети падають з висоти або зсередини приміщення. Вони мають різну форму й масу, тому важко передбачити, куди вони вдарять. Для великих вітрин чи фасадів це означає, що одне руйнування може викликати ланцюгову реакцію, коли за першим пошкодженням ідуть інші.

Ще одним джерелом є дорожньо-транспортні пригоди. Автомобілі, що врізаються у скляні вітрини магазинів чи громадських будівель, завдають удару з великою кінетичною енергією. У таких випадках потрібно спеціально зміцнювати нижні частини світлопрозорих огороджувальних конструкцій; для цього використовують броньоване скло, металеві сітки, антивандальні плівки. Додаткові ризики з’являються, коли погана видимість або слизька дорога, особливо у міських кварталах з активною пішохідною інфраструктурою.

Після пожеж або місцевих обвалів світлопрозорі конструкції залишаються вразливими навіть без прямого удару. Це викликають температурна деформація, порушення герметичності, втрата несучих властивостей ущільнювачів. Аварійні ситуації треба враховувати на всіх етапах життєвого циклу конструкції: під час проєктування та обслуговування. Особливо це стосується об’єктів із великим скупченням людей, де наслідки аварій можуть бути значними.

Зараз під час бойових дій найчастіше трапляються ушкодження від динамічних загроз.

За оцінкою Insulate Ukraine та Київської школи економіки, з початку повномасштабної війни через бойові дії, обстріли та авіаудари по всій країні пошкоджено близько 10 мільйонів вікон [76].

Понад 222 000 приватних житлових будинків отримали пошкодження, здебільшого постраждало скління внаслідок атак [11; 97].

Станом на 22 липня 2025 року в Харкові вибили близько 220 000 вікон. Більше 100 000 з них досі не замінили [40].

Ліквідація наслідків фронтових атак триває. Щомісяця доводиться вставляти десятки тисяч вікон. Через нові удари вони можуть знову бути

зруйновані.

Отже, щоб вибрати матеріали і конструкції для потрібного захисту й безпеки будівель, потрібно розуміти, як діє ударне навантаження.

## 1.3 Нормативні вимоги України, ЄС, США, NATO

Світлопрозорі огороджувальні конструкції важливі для сучасних будівель. Вони мають і зовнішній вигляд, і корисні властивості. До таких конструкцій входять скляні фасади, вікна, зенітні ліхтарі, прозорі дахи, вітражі, перегородки та інші подібні елементи. Через те, що їх часто використовують, правила встановлюють вимоги до безпеки, енергоефективності, звукоізоляції, стійкості до клімату й механічних навантажень.

У провідних країнах є докладні правила, які визначають вимоги до вибухостійких систем скління і способи перевірки їх властивостей. Серед них національні стандарти, міжурядові стандарти і стандарти добровільної сертифікації, які затвердили асоціації виробників.

Найчастіше для таких випробувань застосовують європейські стандарти EN, американські стандарти ASTM і міжнародні стандарти ISO.

Європейські стандарти (EN):

Стандарти ДСТУ EN 13124-1:2019 і ДСТУ EN 13124-2:2006 описують різні способи випробувань: ударна труба і полігонне випробування. Для класифікації використовують документи ДСТУ EN 13123-1:2019 та ДСТУ EN 13123-2:2006. Треба вказувати метод випробування, об’єкт оцінювання і класифікаційний документ разом, бо сама назва серії EN 13123/13124 не дає повного переліку умов [15–18].

Полігонний метод дає змогу оцінити готовий виріб, тобто раму, заповнення та кріплення. У редакціях EN 13123-2:2025 та EN 13124-2:2025 елементи навісних фасадів прямо згадують у назві та сфері застосування. Але

результати цього випробування не підтверджують несучу здатність навколишньої стіни чи всієї будівлі [62; 64].

ДСТУ EN 13541:2014 описує випробування склопакетів на стійкість до вибухового навантаження з використанням аеродинамічної труби (ударної труби). Стандарт визначає розмір зразка 1100 мм × 900 мм. Це потрібно для підтримки контрольованих умов під час моделювання ударної хвилі. Метод випробування дає такі обмеження, бо ударна труба має фіксовані розміри та конфігурацію. Стандарт розглядає головним чином ламіноване скло, дає його властивості та критерії класифікації стійкості до вибуху [19; 96].

Міжнародні стандарти (ISO):

ISO 16933:2007 встановлює випробування і класифікацію вибухостійкого захисного скління за навантаженням на відкритому полігоні. Щоб порівнювати результати, треба перевіряти не тільки рівень навантаження, а також спосіб закріплення зразка, його розміри, які параметри вимірюють і які критерії небезпеки застосовують [78].

ISO 16934:2007 стосується випробувань і класифікації за навантаженням у ударній трубі. Цей метод обирають, якщо можна відтворити потрібну часову історію тиску і розмістити відповідний зразок. Результати лабораторних і полігонних методів порівнюють за фактичним впливом і однаковими критеріями, а не тільки за назвою класу [79].

Стандарти США (ASTM):

Стандарт ASTM F1642/F1642M-17 описує спосіб випробування скління та систем скління під дією повітряної ударної хвилі. Важливі умови закріплення, параметри навантаження та поведінка уламків з боку, що захищається. Цей документ є одним із міжнародних орієнтирів для порівняння результатів експериментальних досліджень [28; 52].

Стандарт ASTM F2912-17 встановлює вимоги до скління та скляних систем, які мають витримувати повітряне вибухове навантаження. Його потрібно не плутати зі стандартом процедури ASTM F1642/F1642M, бо вимоги

до виробу, спосіб випробування і критерії оцінки тут пов’язані, але є окремими частинами процесу оцінювання [52; 54].

Стандарт ASTM F2248-19 описує, як призначати еквівалентне трисекундне розрахункове навантаження для вибухостійкого скління з ламінованого скла. Цей підхід використовують для конкретних задач розрахунку. Він не означає, що вибухова хвиля триває три секунди, і не замінює перевірку готового виробу [53].

GSA-TS01-2003 описує випробування скління та віконних систем під час дії динамічного надлишкового тиску. Для оцінки на практиці важливі тип пошкодження та ризик уламків у захищеному приміщенні. Показники GSA слід подавати у власній системі позначень. Не можна вважати їх автоматично такими ж, як EXR або нові класи EN [69; 96].

Щоб порівняти стандарти GSA і ASTM, потрібно розглянути їхні процедури, параметри навантаження і критерії оцінки фрагментів. Не можна називати одну систему тільки «безпековою», а іншу лише «технічною», бо обидві пов’язують результати випробувань із поведінкою скління і ризиком його руйнування [52; 69].

Допоміжні рекомендації (AAMA):

Документ, який підготувала Асоціація виробників архітектурних вікон та дверей (AAMA) США, дає рекомендації для проєктування та монтажу вибухостійких вертикальних світлопрозорих систем, зокрема вікон, фасадів і склопакетів. У ньому описано підхід, що враховує властивості скла, рами, кріплення і способи встановлення. Документ доповнює стандарти ASTM та ISO і містить практичні поради для проєктування світлопрозорих конструкцій, які можуть протистояти вибуховому навантаженню [47].

У цьому дослідженні використано національні стандарти ДСТУ EN, які повністю відповідають відповідним європейським документам. Для кожної згадки треба вказувати рік видання, бо рік ухвалення в Україні може не збігатися з роком оригінального EN. Метод ухвалення і мову документа

визначають за національною передмовою, а не за позначенням ДСТУ EN [15 — 18].

Практичну програму дослідження побудовано на полігонному методі: саме він доступний в Україні, тоді як випробування в ударній трубі потребують спеціалізованого стенда, якого вітчизняні лабораторії нині не мають. Це й визначило вибір натурного випробування у цій дисертації; для кожної програми, утім, слід перевіряти наявність потрібного обладнання та сферу компетентності виконавця [28; 29]. У цьому дослідженні використовували випробування комплектних зразків під дією повітряної ударної хвилі на відкритому майданчику. Такий підхід дав змогу дослідити різні конфігурації скління, рам, фурнітури та монтажних вузлів. Його перевага для цього завдання — аналіз реального руйнування системи. Водночас різні варіанти навантаження вимагають відповідного інструментального супроводу [16; 18; 28].

Захисне скління за ДСТУ EN 13541:2014 випробовують в ударній трубі. Застосування цього методу стримує відсутність в Україні відповідного обладнання, тому в межах цієї роботи його розглянуто як перспективний, а не як робочий інструмент [19].

Порівняння нормативних систем показує, що стандартизовані класи потрібні для порівняльної оцінки, але не охоплюють усі можливі загрози. Оновлена версія EN 13123-2:2025 додає родини класів PXR і VXR, а також користувацькі класи PXRU і VXRU. Потрібно погоджувати проєктне навантаження з параметрами вибраного сценарію, включаючи пік відбитого тиску та відбитий питомий імпульс [62].

Щоб використати результати у воєнних загрозах, треба порівнювати реальний сценарій з нормативною дією. Важливі не назва джерела загрози чи його маса, а навантаження на огородження, умови кріплення і допустимий рівень небезпеки. Поза фіксованою класифікацією можна розглядати класи користувача і окремі обґрунтовані програми перевірки. Це визначає, як

адаптувати методи до проєктних завдань, але не дає змоги переносити результати одного випробування на будь-які умови [7; 62].

Щоб порівняти нормативні підходи, потрібна не одна умовна шкала «слабший чи сильніший захист», а кілька ознак: вид впливу, параметри навантаження, об’єкт випробування та критерій результату. Протиударна характеристика скла за EN 356, клас комплектної конструкції за EN 13123-2 та рівень небезпеки уламків описують різні сторони. Перша показує, як скління реагує на контактний вплив, друга — як виріб поводиться під вибуховим навантаженням, третя — які наслідки руйнування для захищеного простору. Позначення P4A у склопакеті вказує на властивість окремого компонента, а не є скороченням вибухостійкості вікна [13; 62; 96].

У цьому підході перенесення результатів між методиками зводиться до перевірки, чи сумісні вихідні дані. Спочатку треба з’ясувати, чи однаково визначені вимірювані величини та умови закріплення, а потім уже порівнювати класифікаційні критерії. Якщо у старому протоколі відсутній певний параметр, це не означає, що він не відповідає новій вимозі, але й не дає підстав вважати цю вимогу виконаною. Таке розмежування важливе для ретроспективного аналізу: якщо документація неповна, не можна безпідставно перекласифіковувати або заперечувати зафіксований раніше результат [62; 64; 96].

Нормативні вимоги до світлопрозорих огороджувальних конструкцій стосуються міцності, безпеки, енергоефективності та акустичного комфорту. Якщо їх виконувати, будівлі працюють надійно, конструкції служать довго, а користувачі залишаються у безпеці.

У майбутньому українські норми й далі зближатимуть із європейськими. Зокрема, це стосується врахування можливостей впровадження «розумного скління», яке містить сенсори, змінює прозорість, затемнюється та автоматично регулює інші фізичні властивості світлопрозорих огороджувальних конструкцій.

## 1.4 Існуючі підходи до підвищення ударної стійкості

Ударна стійкість світлопрозорих огороджувальних конструкцій (СОК) визначає рівень безпеки людей у громадських, житлових та промислових будівлях. Якщо ці елементи пошкоджуються або руйнуються від механічної дії чи аварій, це може призвести до травм, загибелі людей і великих матеріальних збитків. Проблема стає гострішою через урбанізацію та зростання ризиків техногенного й природного характеру.

Підвищення ударної стійкості конструкцій допомагає захищати їх від навмисних пошкоджень, таких як вандалізм, терористичні загрози чи несанкціоноване вторгнення. Коли у будівлях критичної інфраструктури, закладах освіти та охорони здоров’я використовують ударостійкі конструкції, це підвищує пасивний захист об’єктів. Таке рішення робить архітектурне середовище безпечнішим.

Також ударна стійкість конструкцій впливає на їхній строк служби і допомагає зменшити витрати на ремонт і обслуговування. Нові рішення дають змогу поліпшити технічні характеристики та зберегти зовнішній вигляд і теплотехнічні властивості світлопрозорих елементів.

Пошкодження вікон під час бойових дій особливо небезпечні. Вони ставлять під загрозу здоров’я і життя людей, а також безпеку об’єкта. Руйнування цих конструкцій викликає кілька прямих і непрямих ризиків, особливо у місцях з активними бойовими діями або під час нових обстрілів.

Це пов’язано з наступними чинниками:

1. Уламкові поранення. Під час вибуху чи ударної хвилі скло розлітається на гострі уламки. Вони можуть пробити шкіру, очі, м’які тканини або навіть кістки. Типові травми: порізи обличчя, рук, шиї; осколкові поранення очей; смертельні ушкодження, якщо уламків багато.

2. Втрати теплового контуру і захисту. Руйнування вікон призводить до втрати тепла, особливо взимку. Це може викликати переохолодження,

особливо у дітей і літніх людей. У приміщення потрапляють волога, пил, опади. Втрачається герметичність, і приміщення стає непридатним для проживання.

3. Порушення захисної функції огородження. Якщо скління втрачене або рама відходить, у приміщення можуть потрапити уламки й впливати зовнішні фактори. Але навіть коли зруйновано багато вікон, це ще не означає, що будівля втратила несучу здатність. Стан несучих конструкцій і можливість користуватись захищеним простором треба перевіряти окремо [64; 96].

4. Додаткові ризики під час евакуації. Вибите скло часто не видно, але воно смертельно небезпечне під ногами під час паніки або евакуації. Осколки скла можуть заважати рятувальникам, якщо вони перекривають вхід до приміщень чи доступ до поранених.

5. Поєднані пошкодження будівлі. Після вибуху огляд скла потрібно доповнювати перевіркою інженерних мереж і сусідніх конструкцій. Якщо ці пошкодження виникли разом, це не завжди означає, що руйнування скла спричинило пошкодження мереж. Важливо відокремлювати причини й наслідки, щоб правильно запланувати відновлення і не робити хибних висновків про безпеку приміщення.

Багато вчених досліджують, як зробити світлопрозорі огороджувальні конструкції стійкішими до ударів.

У статті Земанова А., Конрада П., Гали П., Сов'яка Р., Глужека Р., Земана Й., Шейнохи М. описали серію маятникових ударів з різною енергією по три- і чотиришарових зразках ламінованого скла з PVB-прокладками [107].

П. Конрад і його колеги досліджували ламіновані скляні пластини під час швидкого удару снарядом та їхню здатність працювати після пошкодження. У цьому підході результати описують місцеве ураження з високою швидкістю і подальшу несучу здатність, а не визначають стійкість вікна до повітряної ударної хвилі, як у разі випробування падінням сталевої кулі [85].

У статті Флекенштайна Е., Борнеманна С., Салама М.А. та інших дослідили, наскільки ефективно поєднуються EVA та модифікована поліестерова плівка як сердечник між шарами [67].

Експериментальні дослідження низькошвидкісного удару ламінованих систем і високошвидкісного локального ураження вивчають різні режими навантаження. В обох випадках досліджують тріщиноутворення, роботу полімерного прошарку та залишкову здатність пошкодженого заповнення передавати зусилля. Щоб ці результати застосувати до задач вибухостійкості, треба враховувати різницю між контактним ударом і розподіленим тиском, а також різні умови крайового утримання [85; 107].

Результати дослідження показують, що структурна композиція інтерлейера має вирішальне значення. Додавання жорсткого сердечника одночасно збільшує жорсткість і покращує енергопоглинання ламінованої системи. Це особливо важливо для тонких панелей [67].

Книга Фельдмана М. містить детальне дослідження про проєктування, властивості та використання скла в будівництві [66].

Огляд реакції віконних систем на вибухове навантаження, зокрема ролі ламінування та крайового утримання скла, подано в роботі X. Zhang і H. Hao [108].

P. A. Hooper зі співавторами експериментально та чисельно дослідили вибухостійкість ламінованого скла з PVB-прошарком і показали визначальну роль крайового закріплення [74].

О. І. Суханова та О. О. Ларін проаналізували динаміку ламінованих композитних панелей із різною кривизною скла за ударного навантаження [41].

Ян Вурм дослідив самонесучі скляні конструкції та як вони витримують механічні впливи [104].

M. Larcher зі співавторами поєднали натурні випробування ламінованого скла під вибуховим навантаженням із чисельним

моделюванням, що дало змогу перевірити моделі полімерного прошарку [88].

У науковій і технічній літературі описують різні способи підвищити ударну стійкість світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Це ламінування скла, використання полімерних плівок, армування композитами, застосування триплексу, багатошарових структур і наноматеріалів. Публікації українських і закордонних дослідників звертають увагу на поєднання цих рішень. Такі комбінації дають змогу зберегти прозорість і підвищити міцність.

Способи підвищення ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій, запропоновані різними вченими узагальнено в таблиці 1.3.

Підвищити ударну стійкість світлопрозорих огороджувальних конструкцій (СОК) потрібно через більші вимоги до безпеки будівель і споруд, особливо під час бойових дій, техногенних аварій і природних катастроф. У сучасному будівництві для цього використовують кілька інженерних рішень, що зміцнюють СОК і допомагають їм витримувати імпульсні та локальні навантаження. Найчастіше застосовують ламінування скла, триплекс, загартування, заміну скла на полікарбонатні листи й армування сіткою.

Коли оцінюють збільшення товщини скла для підсилення, важливо пам’ятати, що жорсткість і маса зростають по-різному. Для монолітної пружної пластини, якщо модуль пружності E, коефіцієнт Пуассона $\nu$ і густина $\rho$ не змінюються, згинальна жорсткість $D = Eh^3 / (12(1 – \nu^2))$, а поверхнева маса $m_a = \rho h$. Тоді, якщо порівнювати з базовою товщиною $h_0$, отримаємо $D/D_0 = (h/h_0)^3$ і $m_a/m_{a0} = h/h_0$. На рисунку 1.3 ці формули показують різницю між геометричним підсиленням одного листа і зростанням інерційних властивостей заповнення [66].

*Таблиця 1.3*

Способи підвищення ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій

| **Спосіб** | **Зміст методу** | **Сфера поширення** | **Переваги** | **Недоліки** |
|---|---|---|---|---|
| Ламінування скла (триплекс) | Багатошарове скло з полімерною плівкою | ЄС, США | Висока міцність, безпека при руйнуванні, шумоізоляція. | Висока вартість, зменшення світлопропускання |
| Загартоване скло | Термічна обробка скла | Повсюдно | Механічна міцність | Ризик раптового руйнування |
| Полікарбонатні листи | Заміна скла на ударостійкий полікарбонат | Промислові об’єкти, фасади | Легка вага, висока ударостійкість | Менша прозорість |
| Армування сіткою | Вбудована металева чи полімерна сітка | Спеціальні об’єкти | Запобігання повному руйнуванню | Зменшення естетики |

Джерело: узагальнено за [41; 65; 66; 74; 88; 104; 108].

Якщо товщина збільшується у 1,5 раза, поверхнева маса теж зростає у 1,5 раза, а згинальна жорсткість — у 3,375 раза; якщо товщина подвоюється, ці коефіцієнти дорівнюють 2 і 8. Такі значення стосуються тільки обраної моделі монолітної пластини до руйнування. Вони не показують, наскільки зростає клас вибухостійкості, і не визначають допустиме навантаження для конкретного вікна. Наприклад, посилення заповнення не виключає можливість місцевої відмови штапика, кутового з’єднання чи анкерування.

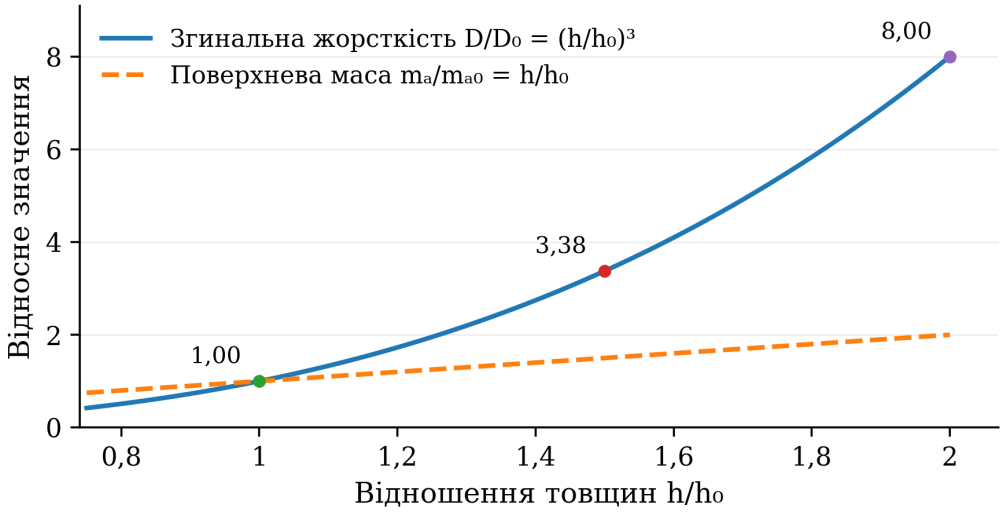



Рисунок 1.3 Відносні зміни згинальної жорсткості та поверхневої маси монолітного скла зі зміною товщини

*Джерело: розроблено автором.*

Для ламінованого скла не можна просто підставити сумарну товщину шарів у кубічну залежність, ігноруючи їхню взаємодію. Прошарок передає зсув, окремі листи можуть пошкоджуватися, і це змінює роботу пакета. У експериментах з багатошаровими системами оцінюють не тільки початкову жорсткість, а й послідовність появи тріщин і поведінку після руйнування [67; 107]. Під час дослідження віконного блока товщину скла треба розглядати разом із його місцем у склопакеті, типом кріплення по краю і властивостями інших частин захисного контуру [96].

Ламінування скла — це з'єднання кількох шарів скла з полімерною проміжною плівкою (зазвичай PVB або EVA). Така плівка утримує уламки у разі руйнування і знижує ризик травм. Цю технологію часто застосовують у безпечному склінні фасадів громадських будівель, банків, аеропортів і посольств. Pilkington, AGC Glass, Vetrotech пропонують комерційні рішення з підтвердженою ударостійкістю. Головні плюси - безпечність при руйнуванні, вища міцність і здатність зменшувати шум. Мінуси - висока вартість виробництва і більша маса виробу, через що монтаж ускладнюється і потрібно

посилювати несучі елементи.

Загартоване скло отримують після термічної обробки, яка створює внутрішні напруження і підвищує механічну міцність матеріалу. Його часто використовують для зовнішнього скління, душових кабін, вітрин і великих вікон. Таке скло добре витримує сильні удари, але якщо навантаження перевищує межу, воно розсипається на дрібні шматки. Серед мінусів — ризик раптового руйнування через нікель-сульфідні включення і неможливість подальшого різання чи свердління.

Полікарбонатні листи все частіше використовують замість скла в промисловому та житловому будівництві. Їх ставлять на фасадах, навісах, козирках і світлових куполах. Вони міцні, гнучкі, легкі й зручні у монтажі. Продукцію Sabic і Bayer (Makrolon) часто застосовують у протиударних системах. Але такі листи пропускають менше світла, ніж скло, і без захисного шару легко дряпаються.

Сітку для армування вставляють прямо в структуру скла. Це допомагає зберегти цілісність, якщо скло частково зруйнується, затримати уламки і тимчасово не порушувати герметичність контуру. Такий спосіб використовують переважно на спеціальних об’єктах, наприклад у виправних установах, школах, сховищах. Хоча цей метод добре працює для безпеки, виглядає він гірше, а виробництво дороге і складне.

Жоден із цих способів не підходить для всіх випадків. Технологію для підвищення ударної стійкості обирають з урахуванням особливостей об’єкта, виду загроз і економічної доцільності. У проєктуванні часто застосовують комбінований підхід, наприклад, ламінування загартованого скла або триплекс з армуванням. Це допомагає компенсувати недоліки окремих рішень і дає комплексний захист.

Аналіз наявних способів підвищити ударну стійкість СОК показує багато технічних рішень для різних умов роботи. Ламіноване скло та триплекс вважають найбільш універсальними, бо вони прозорі й не створюють

небезпеки при руйнуванні.

Полікарбонатні матеріали легкі та витримують удари, тому їх використовують у промислових і спортивних будівлях, але вони менш прозорі. Армування робить їх міцнішими, але вигляд стає менш привабливим.

Рівень використання в регіоні визначає економічна вигода, наявність матеріалів і вимоги законодавства. У країнах ЄС і США використовують нові способи з наноматеріалами. В Україні частіше застосовують традиційні технології.

Комбінування методів допомагає знайти рівновагу між технічними вимогами, ціною та зовнішнім виглядом. Це має значення для громадських об’єктів і будівель критичної інфраструктури.

Підвищення ударної стійкості має спиратися на комплексний підхід. Потрібно враховувати тип об'єкта, можливі загрози і бюджетні обмеження.

## 1.5 Аналіз науково-методичного апарату оцінки ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій

Через повномасштабну війну в Україні забезпечення ударної стійкості світлопрозорих конструкцій стало дуже важливим. Щодня з’являються нові загрози: ракетні удари, артилерія, атаки дронів і вибухи навіть у тилу. Це змушує змінювати підходи до проєктування та використання будівель. Скляні фасади, вікна, двері, куполи й перегородки тепер мають не лише естетичне чи енергоефективне значення, а й служити засобами безпеки та захисту життя.

Масові пошкодження цивільної інфраструктури, зокрема шкіл, лікарень, адміністративних будівель, житлових будинків, показали вразливість традиційних систем скління перед дією ударної хвилі та уламків. Скло часто стає джерелом вторинних травм: його уламки проникають у приміщення на великій швидкості, пошкоджують людей, меблі, обладнання. У деяких випадках уламки викликають смертельні поранення. Саме тому потреба в

застосуванні протиударних рішень для світлопрозорих конструкцій сьогодні є не просто інженерним викликом, а гуманітарною необхідністю.

Окрім безпеки, міцність скла впливає на стійкість міського середовища. Під час загроз люди залишаються у місті, працюють і навчаються. Ударостійкі конструкції допомагають зберегти роботу будівлі після атаки, зменшують витрати на ремонт і підтримують відчуття захищеності. Скло, яке витримало вибух, не дає пошкодити внутрішній простір і дає можливість швидко повернутися до роботи установі або бізнесу.

Більшість скляних систем в Україні не витримують такі навантаження. Їх створювали для енергозбереження, проникнення світла і вентиляції, але не враховували ризик вибухів. Тому зараз потрібно масово переоснащувати існуючі об’єкти, розробляти національні стандарти для протиударного скління і використовувати досвід інших країн у захисній архітектурі.

Отже, в умовах воєнного стану в Україні ударна стійкість світлопрозорих конструкцій — це не тільки вимога будівельних норм, а й питання національної безпеки. Це завдання для інженерів, архітекторів і науковців, яке треба вирішувати разом і без зволікань. Зараз потрібно об’єднати зусилля, щоб створити нове покоління будівельних систем, які працюватимуть під час війни і згодом допоможуть відновити країну.

У цих умовах головне — оцінити ударну стійкість світлопрозорих огороджувальних конструкцій.

Оцінка ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій визначає, чи може конструкція витримати ударне навантаження без серйозних пошкоджень або руйнування. Це потрібно при проєктуванні і запуску сучасних будівель, особливо там, де ризик вищий. Для цього використовують експериментальні методи, наприклад випробування ударом, а також чисельне моделювання, зокрема метод кінцевих елементів чи аналіз енергії деформації.

Серед дослідників цієї теми в Україні виділяють І. І. Солодея, О. О. Лук’янченко, Г. С. Ратушняка, О. І. Суханову та О. О. Ларіна, за кордоном —

S. J. Bennison, P. A. Hooper, M. Larcher, M. Feldmann. В Україні зазвичай проводять лабораторні випробування згідно з ДСТУ EN 12600, EN 356, ISO 16936-1. Тут конструкції перевіряють на удар маятником, кулькою або штучним знаряддям. Останнім часом все частіше використовують чисельне моделювання, бо з'явилося більше відповідного програмного забезпечення, такого як ANSYS, Abaqus, SCAD Office [13; 14; 24; 35; 39; 41; 48; 56; 66; 74; 80; 88].

У таблиці 1.4 зібрані методи оцінки ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій.

Таблиця 1.4 показує, що методи оцінки ударної стійкості світлопрозорих конструкцій відрізняються складністю, точністю і вартістю. Найчастіше використовують маятникове випробування і удар кулькою. Вони дають базовий рівень оцінювання, який відповідає вимогам будівельних норм.

Але ці методи не завжди дають змогу відтворити реальні умови використання, наприклад, множинні чи спрямовані удари. Тому все більше використовують методи моделювання, які дають змогу змінювати параметри конструкції та типи навантаження.

Чисельне моделювання, зокрема метод скінченних елементів, допомагає передбачити, як СОК поводитиметься під ударним навантаженням [68; 86; 92; 93; 102; 105; 106; 109]. Такий підхід дозволяє зменшити витрати матеріалів, краще спроєктувати конструкцію і знайти слабкі місця до її виготовлення.

Метод енергії деформації і поле ударів використовують у наукових дослідженнях і для тестування нових матеріалів. Ці методи дають змогу дослідити не тільки момент руйнування, але й як воно розвивається. Це потрібно під час розробки багатошарових і композитних матеріалів.

Для об'єктивної оцінки ударної стійкості варто використовувати комплексний підхід. Треба поєднувати експериментальні й чисельні методи, щоб врахувати регламентовані вимоги та індивідуальні особливості об'єкта.

*Таблиця 1.4*

Методи оцінки ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій

| **Метод оцінки** | **Зміст методу** | **Переваги** | **Недоліки** |
|---|---|---|---|
| Маятникове випробування (EN 12600) | Випробування ударом маятника зі стандартною енергією | Простота, стандартизація, наочність | Не враховує складні умови експлуатації |
| Удар кулькою (EN 356) | Імітація удару металевою кулькою по склу | Доступність, визначення класу стійкості | Обмежена точність при складних формах |
| Чисельне моделювання (МКЕ) | Комп'ютерна симуляція удару з використанням методу скінченних елементів | Гнучкість, відсутність витрат на матеріали | Потреба у спеціалістах і ліцензійному ПЗ |
| Метод енергії деформації | Розрахунок енергії, що поглинається конструкцією | Добре ілюструє механізми руйнування | Складність валідації результатів |
| Поле ударів (DIN 52290) | Серія ударів різної інтенсивності на одному зразку | Динамічне навантаження, прогресивна оцінка | Значна вартість випробувального обладнання |

Джерело: узагальнено за [13; 14; 48; 60; 80].

Поєднання розрахунку й експерименту доцільно організувати як послідовність перевірок різного змісту. Перша перевірка стосується самого навантаження: чи відтворено його пік, часову форму та імпульс у потрібній точці. Друга — відповіді компонента за заданих умов спирання. Третя — спільної роботи комплектного виробу та його кріплень. Узгодження на першому рівні не означає автоматичного підтвердження наступних. Зокрема,

близький до аналітичного відбитий пік на жорсткій стінці ще не перевіряє прогноз руйнування ламінованого скла або з’єднання імпосту [4; 66; 96].

За такої організації дослідження графічні матеріали мають показувати не тільки тенденцію, а й походження кожної величини. Розрахункову криву, табличну емпіричну оцінку та виміряний сигнал слід позначати окремо. Відсутні повторні досліди не можна замінювати умовними інтервалами похибки, а декілька конструктивно різних зразків — трактувати як статистично однорідну серію. Ці правила визначають спосіб подання результатів у розділах 2 і 3 та забезпечують простежуваність переходу від числового зіставлення до конструктивної рекомендації.

Оцінювання ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій важливе для безпечної експлуатації будівель під час звичайних і надзвичайних навантажень. Сьогодні використовують кілька стандартизованих та експериментально-моделювальних методів. Кожен із них має своє призначення, свої переваги та свої обмеження.

Найчастіше використовують маятникове випробування за стандартом EN 12600 і випробування ударом кульки (EN 356). У першому методі маятник наносить імпульсне навантаження на зразок скла, щоб оцінити, наскільки безпечно воно руйнується. Цей спосіб простий, наочний і добре стандартизований, тому його широко застосовують, зокрема для сертифікації скла в житловому та громадському будівництві. Метод EN 356 дає змогу визначати клас скління за протиударною стійкістю залежно від того, чи витримує воно імпульсне навантаження металевою кулею певної маси з заданої висоти. Обидва методи активно застосовують провідні виробники, серед яких Guardian Glass, Saint-Gobain, AGC Glass. Їхня спільна вада — вони не можуть відтворити складні впливи, наприклад багаторазові або спрямовані удари.

Чисельне моделювання методом скінченних елементів (МКЕ) стає дедалі популярнішим серед фахівців. Завдяки цьому підходу можна

передбачити поведінку СОК у різних умовах, від окремих кінетичних ударів до дії ударної хвилі. Провідні інжинірингові компанії, такі як Arup і Kuraray, використовують МКЕ-моделювання для розробки фасадних систем, енергоефективного скління та вибухозахищених споруд. Метод відзначається гнучкістю, не вимагає витрат на фізичні зразки та дає змогу визначити зони концентрації напружень. Але для коректного застосування цього методу потрібна висока кваліфікація фахівців і перевірка результатів фізичними експериментами.

До науково-дослідних методів входять оцінка енергії деформації та випробування за схемою поля ударів (DIN 52290). Перший метод дає змогу кількісно визначити, скільки енергії СОК поглинає під навантаженням, і показує, як проходить деформація, зокрема в ламінованих або багатошарових конструкціях. Другий метод дає змогу проводити серію ударів різної сили на одному зразку. Це наближує тестування до реальних умов пошкодження під час надзвичайних ситуацій. Такі методи використовують у R&D-відділах компаній Vetrotech, Glas Trösch, Dow Corning. Однак у комерційному будівництві їх використовують рідко через високу вартість обладнання та складність процедур.

Ефективно оцінити ударну стійкість СОК можна, якщо поєднати експериментальні та комп’ютерні методи моделювання. Такий підхід дає змогу виконати нормативні вимоги та підлаштувати конструкцію під конкретні умови роботи, зокрема бойові дії, техногенні впливи та вандалізм.

## 1.6 Методологічні межі оцінювання та обґрунтування напрямів дослідження

Результати огляду варто розподілити за трьома окремими об’єктами оцінки: матеріал скління, комплектний віконний блок і конструкція, встановлена у будівлі. Для першого об’єкта важливі склад шарів, механічні

властивості скла та полімерних прошарків. Для другого до цих характеристик додаються крайове утримання заповнення, рама, стулка, імпост і фурнітура. Третій об’єкт включає також монтажні кріплення і опорну основу. Перехід між цими рівнями не зводиться до простого додавання характеристик; змінюються умови передавання зусиль і можливі механізми втрати захисної функції [6; 28; 64].

У межах цієї роботи ударну стійкість розглянуто як загальну характеристику поведінки за короткочасного динамічного впливу, тоді як вибухостійкість — як властивість, підтверджену для конкретного вибухового навантаження і встановлених критеріїв пошкодження. Відповідність вимогам щодо удару твердим тілом не тотожна відповідності вимогам щодо повітряної ударної хвилі. Зокрема, позначення P4A характеризує захисне скління за випробуванням на ручний напад, а не клас вибухостійкості комплектного вікна. Тому наведення P4A у специфікації необхідно доповнювати характеристиками випробуваної системи [13; 96].

Потрібно розрізняти початок руйнування скла і момент, коли огородження втрачає захисну функцію. Тріщини у ламінованому склі не завжди призводять до викиду його фрагментів у приміщення. Склопакет може залишатися цілим, але все одно випасти разом зі стулкою або рамою. Тому оцінювати тільки за кількістю зруйнованих шарів недостатньо. Треба визначити, чи заповнення залишається на місці, чи з’явилися наскрізні отвори і чи потрапили частини конструкції у захищений простір [28; 96].

Щоб правильно зрозуміти результат, треба окремо описати несучу, огороджувальну та експлуатаційну функції. Несуча функція полягає у сприйнятті та передачі навантаження. Огороджувальна — у збереженні рівня захисту від проникнення фрагментів. Експлуатаційна — у можливості далі користуватися конструкцією. Якщо конструкція пройшла випробування на вибухостійкість, це не означає, що вона залишилася повітронепроникною, водонепроникною або що механізми відкривання працюють. У EN 13123-

2:2025 не вимагають обов’язкового збереження інших експлуатаційних властивостей після такого випробування [62].

Тому граничний стан, який досліджують, треба визначати перед порівнянням конструктивних рішень. Якщо мета — захистити людей, головне не те, як виглядає пошкоджений виріб, а яка небезпека виникає з його тильного боку. Для відновлення роботи виробу потрібні ще показники ремонтопридатності та залишкових деформацій. У цій дисертації другий блок питань подають як практичний результат дослідження, але він не замінює критерії, за якими оцінювали натурні випробування. Таке розділення не дозволяє штучно розширити сферу дії отриманого результату.

Навантаження від повітряної ударної хвилі слід описувати разом із місцем і способом його визначення. Падаючий надлишковий тиск показує хвилю до зіткнення з перешкодою, а відбитий тиск описує місцеву взаємодію хвилі з поверхнею. Дані датчиків у цих двох випадках не можна замінювати одне одним. Порівнюючи аналітичний прогноз, чисельний розрахунок і натурний запис, потрібно спочатку переконатися, що порівнюють одні й ті самі фізичні величини, а не лише однакові числа в тих самих одиницях [4; 28].

Друга умова порівняння вимагає враховувати піковий тиск і питомий імпульс разом. Пік показує найбільше миттєве навантаження, а імпульс — сумарну дію навантаження за певний час. Два впливи з однаковими піками можуть тривати різний час і викликати різну динамічну реакцію. Тому, коли опис випробування переходить від номінального сценарію до виміряних параметрів, це означає уточнення доказів, а не заміну всіх характеристик тільки максимальним значенням [62; 84].

Для встановленої конструкції важливі просторовий розподіл тиску і умови спирання. Показ датчика біля рами дає значення у конкретній точці, але не показує навантаження по всій площі скління. Так само, випробування на жорсткій опорі не описує, як поводиться цей самий виріб у пошкодженій кладці. Тому у програмі порівняння потрібно записувати геометрію зразка,

конфігурацію секцій, розташування кріплень, матеріал прорізу і розміщення вимірювальних засобів [6; 64].

Окремо потрібно розрізняти вибухову і уламкову дію. Повітряна хвиля тисне на конструкцію, а зовнішній уламок взаємодіє з нею локально. Вторинні уламки скла виникають через руйнування самого огородження. Ці явища можуть діяти разом, але якщо конструкція витримала один тип впливу, це не гарантує стійкість до іншого. У цій дисертації висновки щодо EXR стосуються лише дослідженого ударно-хвильового навантаження. Щоб підтвердити опір первинним уламкам, потрібно проводити окремі експерименти [6; 96].

Системне оцінювання скла, рами та кріплень уже описане в наукових публікаціях і нормативних актах. Через це науковий внесок цієї роботи не полягає лише в тому, щоб розглядати вікно як систему. Далі дослідження зосереджується на конкретизації цього підходу для випробуваних конструкцій: визначенні критичних зон, співставленні пошкоджень зі складом виробу та поясненні зміни результату після посилення конструкції. Такий підхід поєднує загальну методологію з перевіреними результатами розділу 3 [28; 66; 96].

У теоретичній частині треба відокремити розбіжності аналітичних моделей від похибки чисельної дискретизації. Перше визначають порівнянням моделей за однакових вихідних умов, друге — аналізом зміни чисельного результату при згущенні сітки. Якщо чисельний розв’язок збігається з обраною аналітичною залежністю, це не означає, що ця залежність є експериментальним фактом. Тому дослідницька цінність розділу 2 у тому, щоб обґрунтувати робочу постановку та її межі, а не заявляти про універсальну точність програмного комплексу [4; 70].

Класи PXRU і VXRU вже є в EN 13123-2:2025. Їх можна використати для національних сценаріїв як приклад прикладного розвитку нормативного підходу, але не для створення самих цих позначень. Щоб пропозиція стала кількісною, потрібно окремо визначити початкові сценарії, обґрунтувати пари

параметрів навантаження і встановити процедуру перевірки. Тут маса джерела впливу — це вихідний параметр сценарію, а не самостійний показник захищеності віконної конструкції [62].

З огляду на це розмежування, дослідження варто проводити як послідовність взаємопов’язаних, але різних етапів. Огляд встановлює терміни, граничні стани та нормативні критерії. Аналітичне і чисельне моделювання уточнює параметри навантаження і межі їх прогнозу. Натурний експеримент перевіряє роботу всієї конструкції. Прикладне узагальнення визначає умови застосування перевіреного рішення на об’єкті. Кожен етап дає вихідні дані для наступного, але не підміняє його способу підтвердження.

Ця послідовність також задає вимоги до документування. Для розрахунку треба зберігати вихідні параметри, вибрані моделі та критерій порівняння. Для експерименту — ідентифікацію зразка, конфігурацію датчиків і матеріали для фіксації пошкоджень. Для впровадження — специфікацію виробу та технологію монтажу. Без цього зв’язку не можна впевнено сказати, що розрахунок, протокол і встановлена конструкція стосуються одного технічного рішення. Тому можливість відстежити дані визначає, чи можна використовувати результат на практиці, а не тільки відноситься до вимог оформлення документації [6; 64].

Обмежена серія натурних випробувань може бути достатньою для виявлення характерного механізму пошкодження або перевірки конкретного конструктивного рішення, але не для визначення універсальної імовірності відмови серійної продукції. За одночасної зміни кількох параметрів позитивний результат не дозволяє однозначно розподілити внесок між товщиною скла, профілем, фурнітурою та кріпленням. Тому у подальших розділах необхідно розрізняти безпосередньо спостережені факти, механічну інтерпретацію та рекомендації щодо подальшого застосування [96].

Отже, науково-практичне завдання полягає у встановленні умов, за яких можна точно оцінити навантаження і захисну поведінку всієї конструкції.

Основні дії — це аналіз моделей у заданому діапазоні, обґрунтування чисельної дискретизації, порівняння різних конструктивних рішень на основі документації та визначення, на які об'єкти можна поширювати отримані результати. Це дозволяє зробити висновки без необґрунтованого перенесення властивостей одного матеріалу на все вікно, результатів окремого досліду на серійну продукцію або властивостей одного типу віконних блоків на всю будівлю.

## Висновки до розділу 1

1. Описано теоретичні підходи до оцінки світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Розділено властивості матеріалу скління, готового віконного блока і системи, яку вже встановили в будівлі. Для вибухового навантаження основне значення має спільна робота скла, рами, з'єднань, фурнітури, кріплень та опорної основи.

2. Контактний удар, повітряна ударна хвиля і дія первинних та вторинних уламків розділені окремо. Якщо зразок відповідає одному виду випробування, це не підтверджує інші захисні властивості. Наприклад, P4A не означає, що комплектне вікно вибухостійке.

3. Систематизовано нормативні підходи України, EN, ISO, ASTM і GSA. Для коректного зіставлення необхідні однаковий об'єкт оцінювання, сумісні умови навантаження та критерії небезпеки. Зміни редакцій EN 13123-2:2025 і EN 13124-2:2025 зумовлюють окрему перевірку достатності даних попередніх випробувань.

4. Обґрунтовано необхідність оцінювання пікового тиску разом із питомим імпульсом, із розрізненням падаючих і відбитих параметрів. Значення одного піка або сама номінальна комбінація маси та відстані не забезпечують вичерпного опису фактичного навантаження.

5. Визначено напрями подальшої роботи: порівняння аналітичних моделей і чисельної дискретизації; документоване дослідження критичних вузлів віконного блока; обґрунтування перевірених конструктивних рішень та меж їх застосування. Саме ці завдання конкретизують науковий внесок наступних розділів.

# РОЗДІЛ 2
# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНИХ ПРОЦЕСІВ У СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

## 2.1 Огляд математичних моделей оцінки параметрів ударної хвилі вибуху зарядів вибухової речовини

Математичне моделювання ударних процесів, що виникають під час вибухового навантаження, є ключовим інструментом для оцінки стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій до впливу повітряної ударної хвилі. Сучасні загрози вибухів техногенного або воєнного походження зумовлюють необхідність науково обґрунтованих підходів до визначення параметрів ударної хвилі та прогнозування її впливу на будівельні конструкції [50; 51; 77; 91; 94; 103]. Особливої актуальності це набуває для світлопрозорих конструкцій через їх малу масу, складну багатошарову структуру та високу чутливість до динамічних навантажень.

Параметри повітряної ударної хвилі визначають ступінь і характер навантаження на конструкцію. Вони необхідні для оцінки несучої здатності, деформацій та ризику руйнування конструкцій. До основних параметрів ударної хвилі належать: максимальний надлишковий тиск, тривалість позитивної та негативної фаз, імпульс ударної хвилі, швидкість фронту та час прибуття хвилі до об’єкта. Зазначені параметри залежать від маси вибухової речовини, форми заряду, відстані до об’єкта, фізичних властивостей середовища та умов відбиття хвилі від поверхонь.

На сьогодні існує значна кількість аналітичних, емпіричних та напівемпіричних математичних моделей для визначення параметрів ударної хвилі [49; 59; 72; 75; 83; 84; 95; 99; 100]. Вказані моделі ґрунтуються на узагальненні результатів експериментальних досліджень, теоретичних залежностях механіки вибуху та принципах подібності, зокрема із

застосуванням масштабного коефіцієнта. Проте використання різних математичних моделей може призводити до суттєвих розбіжностей у визначенні параметрів ударної хвилі, що обумовлює необхідність їх системного аналізу та оцінки точності.

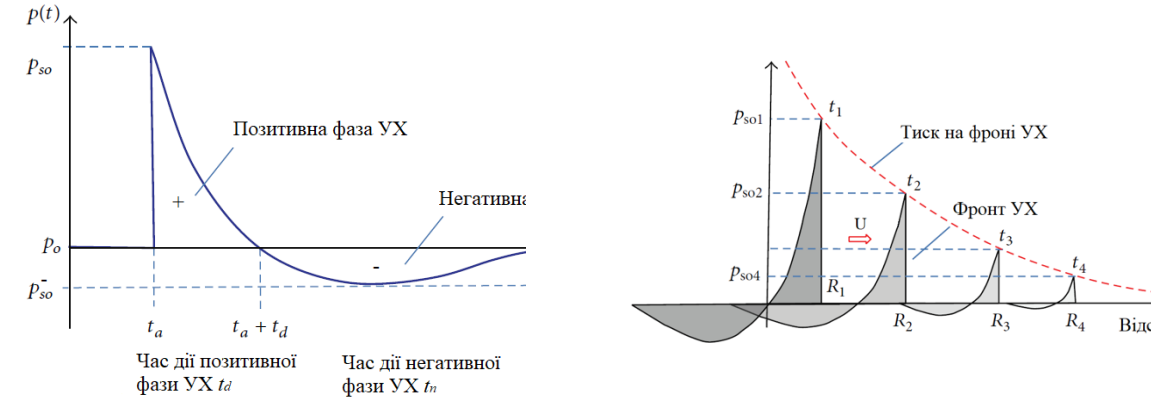
Визначення меж застосування існуючих математичних моделей, оцінка їхньої точності та відповідності експериментальним даним, а також вибір найбільш придатних моделей для подальшого використання у чисельному моделюванні взаємодії ударної хвилі з конструкціями є важливим завданням. Огляд існуючих математичних моделей є необхідним етапом при розробці методики математичного моделювання ударних процесів у світлопрозорих огороджувальних конструкціях.

Дослідження математичних моделей для визначення параметрів ударної хвилі формує наукову основу для подальшого чисельного моделювання ударних процесів, оцінки стійкості світлопрозорих конструкцій та розробки інженерних рішень, спрямованих на підвищення їх вибухостійкості.

Основними параметрами, що характеризують ударну хвилю (УХ), є: швидкість фронту УХ ($U$, м/с), час прибуття УХ до об'єкта ($t_a$, мс), значення максимального тиску на фронті УХ ($P_{SO}$, кПа), значення тиску негативної фази УХ ($P_{SO}^-$, кПа), час дії позитивної ($t_d$, мс) та негативної ($t_d^-$, мс) фаз УХ, імпульс позитивної ($i_s$, кПа·мс) та негативної ($i_s^-$, кПа·мс) фаз УХ.

Ці параметри є залежними від маси ВР ($m_{BP}$, кг), відстані від центру заряду ВР до точки в просторі ($R$, м), швидкості розповсюдження звуку у повітрі ($a_0$, м/с) та атмосферного тиску ($P_0$, гПа).

У статті [2] наведено відомі формули, що описують взаємозв'язок між параметрами ударної хвилі (рисунок 2.1).




*а* *б*

Рисунок 2.1 Параметри УХ [2]:

*а* – параметри, що описують УХ в різні моменти часу, *б* – умовна зміна фронту УХ залежно від відстані

Для оцінки фактичних значень параметрів УХ різні дослідники пропонують формули різного виду, які дають результати із різними значеннями похибок. У [2] проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків параметрів УХ за відомими формулами та отриманих за результатами експериментів. За результатами порівняння для подальшого дослідження було обрано наступні моделі УХ:

1) М. А. Садовського [36], за якою значення максимального тиску на фронті УХ ($P_{SO}$, кПа), визначається за формулою 2.1:

$$P_{SO} = \frac{0.084}{Z} + \frac{0.27}{Z^2} + \frac{0.7}{Z^3}; \qquad (2.1)$$

де Z – масштабний коефіцієнт, що визначається за формулою 2.6.

2) Ч.Н. Кінгері і Дж.Балмеша (англ. Kingery and Bulmash) [83]. Ця методика найбільш залежить від використання емпіричних коефіцієнтів, але дає одну з найповніших та найближчих до виміряних значень моделей УХ. Формула 2.2.

$$P_{SO} = \exp\left(A_1 + B_1 \times \left(\ln(Z)\right) + C_1 \times \left(\ln(Z)\right)^2 + D_1 \times \left(\ln(Z)\right)^3 + \right. \quad (2.2)$$
$$\left. + E_1 \times \left(\ln(Z)\right)^4 + F_1 \left(\ln(Z)\right)^5 \times G_1 \left(\ln(Z)\right)^6 \right) \times 10^{-3}$$

де $A_1$, $B_1$, $C_1$, $D_1$, $E_1$, $F_1$, $G_1$ – емпіричні коефіцієнти, що визначаються за таблицею 2.1.

*Таблиця 2.1*

Значення емпіричних коефіцієнтів для виразу (2.2)

| Z(m/kg$^{1/3}$) | $A_1$ | $B_1$ | $C_1$ | $D_1$ | $E_1$ | $F_1$ | $G_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,2-2,9 | 7,2106 | -2,1069 | -0,3229 | 0,1117 | 0,0685 | 0,0 | 0,0 |
| 2,9-23,8 | 7,5938 | -3,0523 | 0,40977 | 0,0261 | -0,01267 | 0,0 | 0,0 |
| 23,8-198,5 | 6,0536 | -1,4066 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

3) Дж.Ф. Кінні і К.Дж.Грема (англ. Kinney and Graham) [84]. Формула 2.3.

$$P_{SO} = P_O \frac{808\left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2\right]} \times \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2\right]} \times \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2\right]}} \quad (2.3)$$

4) Н.М. Ньюмарка і Р.Дж.Генсена (англ. Newmark and Hansen) [95]. Формула 2.4.

$$P_{SO} = 0.6784 \frac{m_{BP}}{R^3} + 0.294 \left(\frac{m_{BP}}{R^3}\right)^{1/2} \quad (2.4)$$

5) Й. Генріха і Р.Мейджора (англ. Henrych and Major) [73]. Формула 2.5.

$$P_{SO} = \begin{cases} \frac{1.380}{Z} + \frac{0.543}{Z^2} - \frac{0.035}{Z^3} + \frac{0.000613}{Z^4} \; для \left(0.05 \le Z \le 0.3\right) \\ \frac{0.607}{Z} - \frac{0.032}{Z^2} + \frac{0.209}{Z^3} \; для \left(0.3 < Z \le 1\right) \\ \frac{0.0649}{Z} + \frac{0.397}{Z^2} + \frac{0.322}{Z^3} \; для \left(1 < Z \le 10\right) \end{cases} \quad (2.5)$$

Перелічені моделі забезпечують найкращу відповідність даним експериментів, тому в подальшому дослідженні результати моделювання порівнюються з результатами розрахунку за цими формулами.

В усіх вищенаведених моделях масштабована відстань Z визначається за формулою (2.6):

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}; \tag{2.6}$$

де R — дистанція від заряду до зразка, м; W — маса заряду в тротиловому еквіваленті, кг [55; 82].

Перед порівнянням моделей потрібно узгодити одиниці виміру і фізичну постановку кожного виразу. Однакове позначення масштабованої відстані не скасовує різницю між повітряним і поверхневим вибухом, падаючим і відбитим піками або встановленими атмосферними умовами. Бар чи мегапаскаль треба перевести у кілопаскалі до складання спільної таблиці, а одиницю маси перевірити безпосередньо у формулі. Це не дасть переплутати різницю в одиницях чи геометрії з недоліками моделі [2; 4; 83; 84].

Аналітичне значення в цьому порівнянні є референтною оцінкою, а не точним експериментальним еталоном. Тому відносне відхилення чисельного піка від обраної формули показує, наскільки дві оцінки збігаються за даних умов. Щоб знати точність щодо фізичного процесу, треба окремо порівняти з вимірюваннями, які добре задокументовані. Це важливо, коли використовують кілька емпіричних залежностей з різною основою, які можуть давати різні референтні значення в одній контрольній точці [2; 4].

## 2.2. Організаційний інструментарій здійснення моделювання ударних процесів у світлопрозорих огороджувальних конструкціях

Для оцінки параметрів повітряної ударної хвилі, що утворюється від підриву зарядів вибухової речовини (ВР) масою 3 кг проведено математичне

моделювання із застосуванням ліцензійного пакету прикладних програм ANSYS LS-DYNA.

- Маса заряду вибухової речовини – 3 кг;
- густина ВР 1590 кг/м$^3$;
- маса ВР – 3,040 кг;
- діаметр сферичного заряду – 154,0 мм;
- висота і діаметр основи циліндричного заряду – 134,5 мм
- відстань від центру заряду (сферичного та циліндричного) до поверхні землі – 0,5 м;

відстань від центру заряду (сферичного та циліндричного) до вертикальної стінки (сталева плита) – 3,0 м.

Густину ВР 1590 кг/м³ прийнято за фактичною масою та геометрією заряду; параметри Чепмена–Жуге і константи рівняння стану JWL (таблиця 2.2) взято за [89] для референтної густини 1630 кг/м³, різниця за масою в межах 2,5 %.

*Моделі матеріалів, що застосовували під час проведення чисельного моделювання.*

При проведених дослідженнях опис поведінки матеріалу вертикальної стінки та землі, з урахуванням залежності пластичності матеріалу від температурних змін, використовували модель пластичності матеріалу Джонсона-Кука (англ. Johnson-Cook) [70]:

$$\sigma_y = \left(A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n\right)(1 + C\ ln\ \dot{\varepsilon}^*)\left(1 - \left(T^*\right)^m\right) \qquad (2.7)$$

де $A$, $B$, $C$, $n$ і $m$ – константи матеріалу; $\bar{\varepsilon}^p$ – ефективна пластична деформація; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^p}{\dot{\varepsilon}_0}$ – нормована швидкість ефективної пластичної деформації для $\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$; $T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$ – гомологічна температура.

Залежність тиску та об’єму описували з використанням рівняння стану

Мі-Грюнайзена (нім. Mie-Grüneisen) [70]:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \qquad (2.8)$$

де C – вільний член залежності $v_s$-$v_p$; $S_1, S_2, S_3$ – коефіцієнти нахилу кривої $v_s$-$v_p$; $\gamma_0$ – постійна Грюнайзена; $a$ – корекція об'єму першого порядку $\gamma_0$; $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$.

Під час застосування багатокомпонентного підходу визначення зміни тиску $p$ у газоподібному середовищі проводили з використанням рівняння стану [70]:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + \left(C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2\right)e, \qquad (2.9)$$

де $\mu = 1/V - 1$, $e$ – внутрішня енергія на одиницю початкового об'єму, $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – константи.

Для моделі повітря константи $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ і $C_4 = C_5 = \gamma - 1$. Тоді рівняння стану набуває вигляду [70]:

$$p = \left(\gamma - 1\right)\frac{\rho}{\rho_0}e, \qquad (2.10)$$

де $\gamma$ – показник адіабати (для повітря $\gamma = 1,4$).

Під час моделювання детонації заряду ВР застосовували найбільш розповсюджену на сьогоднішній день (і найбільш раціональну) форму рівняння стану $p = p(\bar{E}, \rho)$, що дозволяє з високою точністю описувати властивості продуктів детонації та має до того ж широку базу вихідних даних для різних ВР – рівняння стану Джонса-Уілкінса-Лі (англ. Jones-Wilkins-Lee, JWL) [70; 89; 98]:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})\exp\{-R_1 V\} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})\exp\{-R_2 V\} + \frac{\omega}{V}\bar{E}, \qquad (2.11)$$

де $V = \rho_0 / \rho = \upsilon / \upsilon_0$ – відносний питомий об'єм; $A$, $B$, $R_1$, $R_2$, $\omega$ – емпіричні константи; $\overline{E}$ – внутрішня енергія на одиницю початкового об'єму. У стані Чепмена–Жуге [90]:

$$\overline{E}_H = \overline{E}_0 + \frac{p_H}{2}(1 - V_H), \tag{2.12}$$

де $\overline{E}_0$ – енергія на одиницю початкового об'єму, що включає енергію хімічних зв'язків і визначається з термохімічного експерименту або за даними термодинамічного розрахунку [89].

Геометричні розміри та фізико-механічні властивості матеріалів, що застосовані під час моделювання.

Об'єктом моделювання є заряди ВР сферичної та циліндричної форми. Моделювання проведено із застосуванням методу 2D Лагранже-Ейлерового зв'язування (ALE) в ліцензійному програмному комплексі ANSYS LS-DYNA [57; 58; 70; 81]. Скінченно-елементна модель (СЕ-модель) утворена повноінтегровними двомірними (2D) S/R елементами (з вибірковим пониженням порядку інтегрування). Розміри елементів скінченно-елементної моделі варіювались з метою оцінки кроку дискретизації суцільного середовища на параметри тиску повітряної ударної хвилі. Підхід до побудови чисельної моделі та ідентифікації властивостей матеріалів ґрунтується на [23; 70], а досвід застосування LS-DYNA для задач вибухового навантаження конструкцій — на [3; 5; 9; 46].

Геометричні розміри розрахункової області складають 2 620 × 3 250 мм. Точка детонації вибухової речовини знаходиться в геометричному центрі заряду ВР (рисунок 2.2).

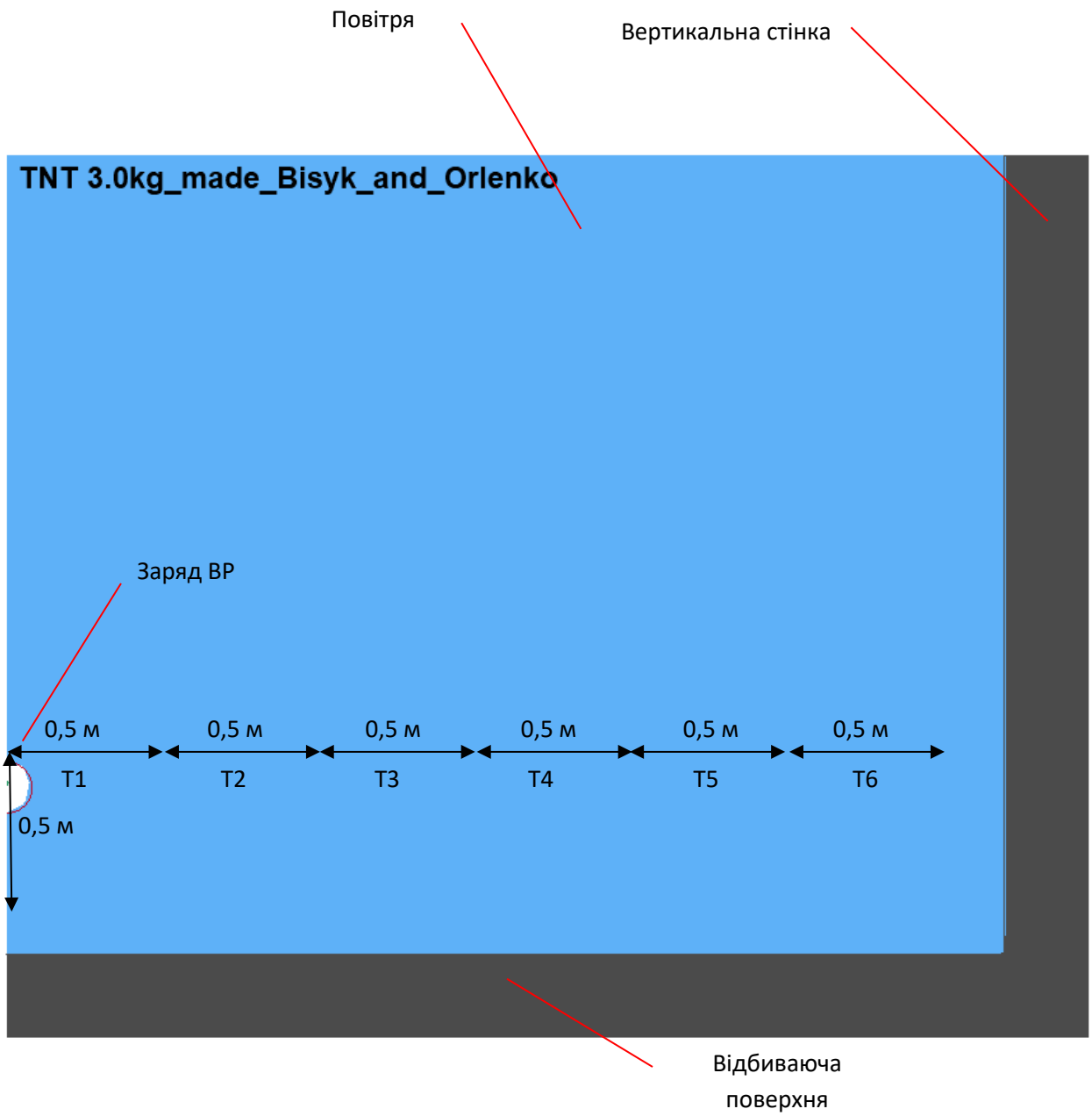



Рисунок 2.2 Розрахункова схема дослідження параметрів повітряної ударної хвилі

Параметри рівняння стану вибухової речовини, яку обрано для проведення моделювання, наведено в таблиці 2.2. Фізико-механічні властивості матеріалу вертикальної стінки наведено в таблиці 2.3.

*Таблиця 2.2*

Характеристики рівняння стану продуктів детонації [89; 98]

| Індекс ВР | Параметри Чепмена-Жуге (Chapman-Jouget), *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN | | | | | Коефіцієнти рівняння стану ПД у формі JWL (Jones-Wilkens-Lee), *EOS_JWL | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\rho_0$ | P | D | $E_0$ | Г | A | B | C | $R_1$ | $R_2$ | ω |
| | *кг/м³* | *ГПа* | *м/с* | *ГДж/м³* | | *ГПа* | *ГПа* | *м³/кг* | | | |
| ТНТ | 1590 | 21,0 | 6930 | 7,00 | 2,727 | 371,20 | 3,231 | 1,045 | 4,15 | 0,95 | 0,30 |

Примітка. Густину $\rho_0$ прийнято за геометричною моделлю заряду (1590 кг/м³); параметри Чепмена–Жуге та константи рівняння стану JWL взято за [89] для референтної густини 1630 кг/м³.

*Таблиця 2.3*

Фізико-механічні характеристики сталевої плити [71]

| Вертикальна стінка | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *E(ГПа)* | *v* | *ρ (кг/м³)* | *A(МПа)* | *B(МПа)* | |
| 210,5 | 0,3 | 7850 | 380 | 720 | |
| $C_p(J/_{kgK})$ | *C* | *n* | *$T_m$ (K)* | *$T_0$ (K)* | |
| 452 | 0,0114 | 0,73 | 1800 | 293 | |
| *m* | *$D_1$* | *$D_2$* | *$D_3$* | *$D_4$* | *$D_5$* |
| 0,94 | 0,294 | 5,149 | -5,583 | 0,0023 | 0,951 |

Математичне моделювання ударних процесів у програмі ANSYS LS-DYNA дало змогу створити науково обґрунтований організаційно-методичний інструментарій для дослідження взаємодії повітряної ударної хвилі з огороджувальними конструкціями. Сучасні чисельні методи, зокрема

метод скінченних елементів із лагранжево-ейлеровим підходом (ALE), дали змогу точно описати процеси поширення ударної хвилі, її відбиття та взаємодії з твердими поверхнями.

Застосування рівняння стану Джонса–Уілкінса–Лі (JWL) дозволило забезпечити високоточне моделювання процесу детонації вибухової речовини та визначення параметрів продуктів детонації. Це рівняння стану є одним із найбільш точних і широко застосовуваних підходів для моделювання вибухових процесів, оскільки дозволяє враховувати фізичні властивості вибухової речовини, зокрема густину, швидкість детонації та енергетичні характеристики.

Використання моделі пластичності Джонсона–Кука дозволило адекватно описати поведінку матеріалів конструкції під дією високошвидкісних навантажень, враховуючи залежність механічних властивостей матеріалу від деформації, швидкості деформації та температури. Це є критично важливим для оцінки реакції конструкцій на вибухове навантаження, оскільки процес вибуху супроводжується значними швидкісними та температурними ефектами.

Застосування рівняння стану Мі–Грюнайзена дозволило врахувати термодинамічні процеси, що відбуваються у матеріалах під дією ударного навантаження, що забезпечило підвищення точності визначення напружено-деформованого стану конструкцій.

Скінченно-елементна модель врахувала геометричні параметри системи, фізико-механічні властивості матеріалів, умови поширення ударної хвилі та її взаємодію з конструкцією. Контрольні точки дали змогу детально проаналізувати, як змінюються параметри ударної хвилі на різній відстані від джерела вибуху.

Суттєвим результатом стало створення робочої методики для цієї задачі моделювання. Вона дає змогу дослідити, як геометричні параметри заряду, його форма, маса та параметри дискретизації скінченно-елементної моделі

впливають на результати розрахунків. Це дозволяє оптимізувати параметри моделювання і підвищити точність результатів.

Результати показують, що програмний комплекс ANSYS LS-DYNA добре підходить для дослідження вибухових процесів та їхнього впливу на будівельні конструкції. Обраний підхід дає змогу отримати докладні дані про параметри ударної хвилі, які потрібні для оцінки вибухостійкості світлопрозорих конструкцій.

У такому чисельному дослідженні просторовий крок сітки треба враховувати разом із часовою дискретизацією та частотою збереження результатів. Якщо розв’язувач використовує малий внутрішній крок часу, але контрольний сигнал записують рідко, його максимальне значення може не потрапити до результатів. Тому навіть однакова геометрія сітки у двох розрахунках не означає, що експортовані піки будуть порівнюваними. До паспорта розрахунку варто вносити і параметри інтегрування, і інтервал виведення даних, і правило вибору максимуму [70].

Потрібно також розрізняти координату контрольної точки і область, для якої визначили тиск. Показник в одному елементі, середнє на невеликій ділянці та максимум уздовж поверхні пов’язані з різними способами обробки. Для порівняння з датчиком важливий спосіб, яким у моделі подали його чутливу поверхню. Графіки нижче створили на основі наявних табличних піків; вони не містять нових результатів просторового усереднення чи повторного чисельного розв’язання. Вони потрібні, щоб перевірити тлумачення вже отриманих даних і зрозуміти, яких ще відомостей не вистачає для подальшої перевірки.

Сформований організаційно-методичний інструментарій має наукове обґрунтування. Він дає змогу перевіряти точність моделювання у вибраних контрольних точках ударних процесів. Його можна застосовувати для подальших досліджень вибухостійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій.

## 2.3 Методика та результати моделювання ударних процесів у світлопрозорих огороджувальних конструкціях

Числове моделювання поширення повітряної ударної хвилі потребує перевірки, чи ця модель підходить, чи розрахунки збігаються і наскільки вони точні. Для цього типу задач точність оцінювали за різними параметрами, головний з яких — тиск повітряної ударної хвилі. Значення тиску, за яким визначали відносну похибку моделювання, обчислили аналітично з використанням кількох математичних моделей (рисунок 2.3).

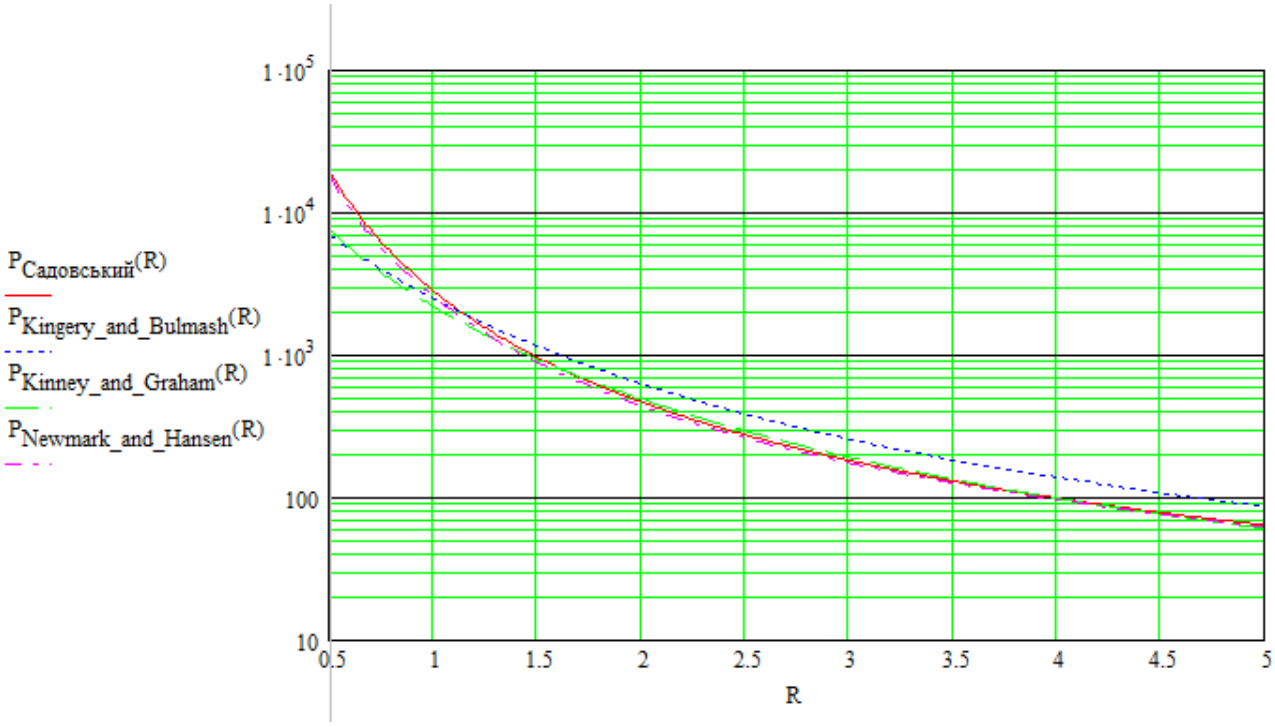



Рисунок 2.3 Значення тиску повітряної ударної хвилі ($P_{SO}$, кПа) залежно від відстані при підриві сферичного заряду вибухової речовини розрахованої за різними математичними моделями

На рисунку 2.3 показано, як змінюється тиск повітряної ударної хвилі залежно від відстані до центру вибуху за різними аналітичними математичними моделями. З аналізу цих залежностей видно, що всі розглянуті математичні

моделі показують однакове зниження максимального тиску ударної хвилі зі збільшенням відстані від центру вибуху. Це відповідає фізичним властивостям поширення ударної хвилі у газоподібному середовищі. Найбільше зменшення тиску відбувається на початку поширення ударної хвилі, бо енергія вибуху сильно концентрується поруч із джерелом детонації.

Результати, які дають різні математичні моделі, сильно відрізняються між собою, особливо на невеликій відстані від центру вибуху. Наприклад, при відстані 0,5 м значення тиску за різними моделями можуть різнитися більш ніж у 2–3 рази. Це показує різний рівень точності та сферу, де ці математичні залежності працюють. Потрібно порівнювати отримані значення, детальніше це показано у таблиці 2.4.

*Таблиця 2.4*

Розраховані значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках із застосуванням різних математичних моделей

| Від-стань, м | Значення тиску повітряної УХ, кПа | | | | | Значення тиску відбитої УХ, кПа |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Садов-ський | Kingery and Bulmash | Kinney and Graham | Newmark and Hansen | Henrych and Major | Kingery and Bulmash |
| 0,5 | 19290 | 6917 | 7420 | 17720 | 6633 | 76594 |
| 1,0 | 2783 | 2464 | 2157 | 2545 | 1465 | 20326 |
| 1,5 | 952 | 1143 | 926 | 880 | 730 | 7409 |
| 2,0 | 463 | 622 | 486 | 434 | 381 | 3244 |
| 2,5 | 272 | 380 | 290 | 259 | 236 | 1652 |
| 3,0 | 180 | 254 | 189 | 173 | 161 | 951 |

У таблиці 2.4 наведено числові значення тиску ударної хвилі та відбитої ударної хвилі, які отримали з різних математичних моделей у контрольних точках на різних відстанях від центру вибуху. Аналіз результатів показує, що розрахункові значення помітно відрізняються залежно від обраної

математичної моделі.

Зокрема, при відстані 0,5 м тиск за моделлю Садовського дорівнює 19290 кПа, за моделлю Kingery and Bulmash — 6917 кПа, а за моделлю Henrych and Major — 6633 кПа. Така велика різниця виникає через різні підходи до опису фізичних процесів поширення ударної хвилі і через особливості експериментальної бази, на якій побудовано ці емпіричні залежності.

Коли відстань від центру вибуху збільшується, відносна різниця між результатами різних моделей стає меншою. Це показує, що параметри ударної хвилі поступово стабілізуються і вплив нелінійних процесів, які є на початку вибуху, зменшується.

Згідно з таблицею 2.4 визначено показник Км = max(Pso,j)/min(Pso,j), де j позначає одну з п’яти аналітичних моделей. До розрахунку включено лише падаючі піки; колонку відбитого тиску виключено як іншу фізичну величину. На рис. 2.4 показано залежність Км від $Z = R/\sqrt[3]{W}$ за W = 3 кг. Відрізки між маркерами лише сполучають табличні точки [4].

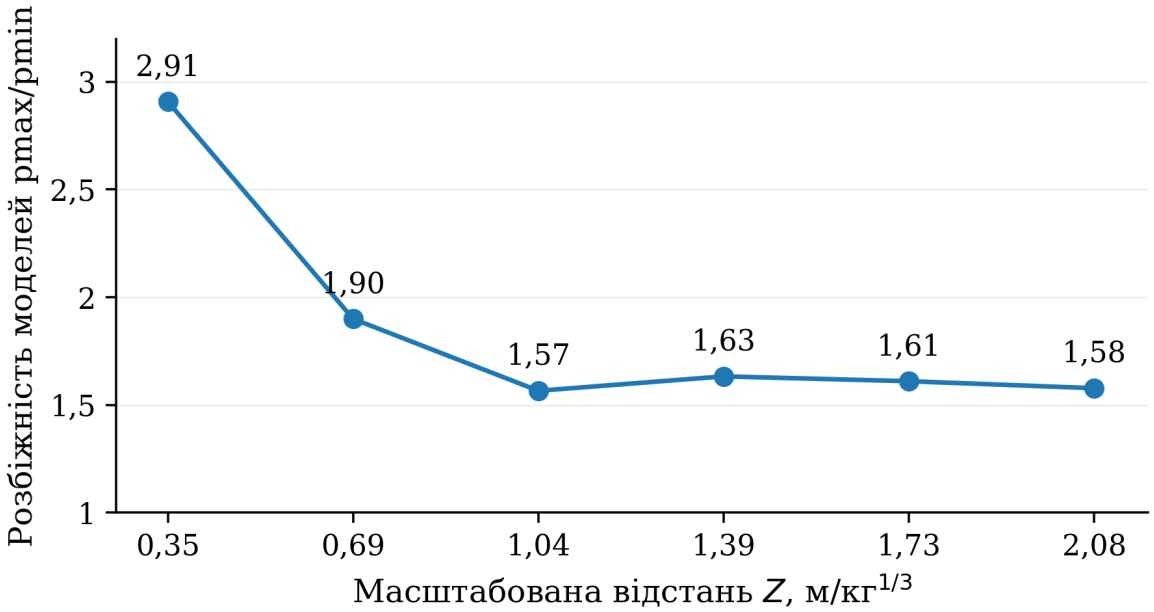



Рисунок 2.4 Розбіжність між п’ятьма аналітичними моделями за відношенням максимального та мінімального значень падаючих піків

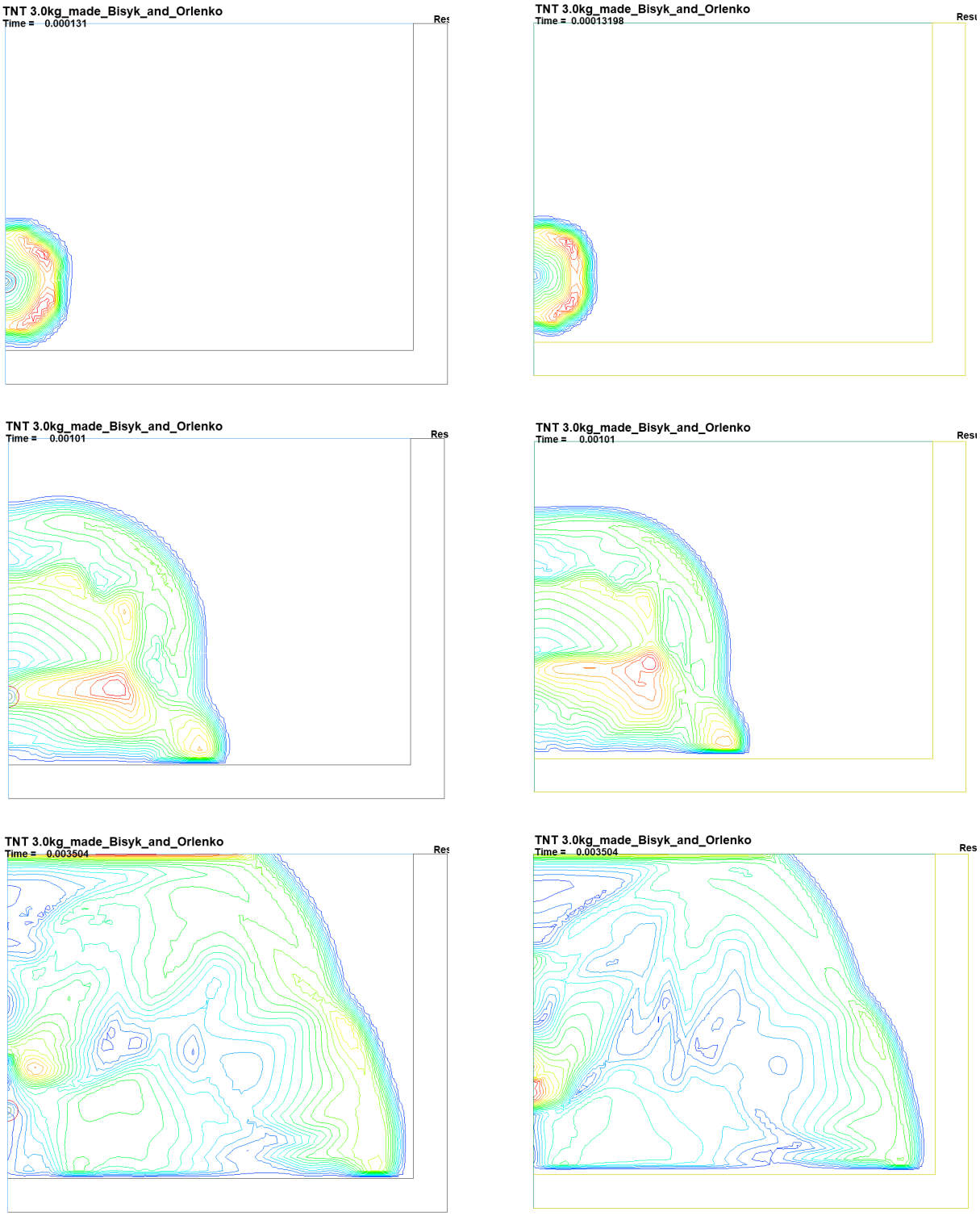
*Джерело: розроблено автором.*

На відстані 0,5 м відношення становить 19290/6633 ≈ 2,91, а на відстані 3,0 м - 254/161 ≈ 1,58. Проте зменшення цього показника не є строго монотонним: після досягнення приблизно 1,57 на відстані 1,5 м значення зростає до 1,63 на відстані 2,0 м. Таким чином, можна зробити висновок про загальне звуження розбіжності від ближньої до дальньої межі досліджуваного інтервалу, а не про її безперервне зменшення у кожній точці. Навіть на дальній межі різниця між крайніми оцінками залишається суттєвою.

Показник Км не дозволяє визначити точнішу модель і не є довірчим інтервалом фактичного тиску. Він відображає чутливість оцінки до вибору аналітичної залежності. Тому для проєктних розрахунків необхідно перевіряти застосовність формул і використовувати незалежні дані; просте усереднення п’яти оцінок не гарантує достовірності результату.

Отримані аналітичні результати дають змогу далі оцінити точність чисельного моделювання і розглянути, як параметри скінченно-елементної моделі впливають на підсумки розрахунку. На рисунку 2.5 показано, як змінюється швидкість поширення ударної хвилі з часом для двох розмірів скінченно-елементної сітки (50 мм і 40 мм). Аналіз цих даних показує, що менший розмір скінченного елемента дає більшу точність у визначенні параметрів ударної хвилі. Коли використовують дрібнішу сітку, модель точніше відтворює фізичні процеси поширення ударної хвилі, зокрема різкі зміни тиску і швидкості.

Коли використовують досить великі елементи (50 мм), пікові значення швидкості ударної хвилі згладжуються. Це показує, що моделі бракує роздільної здатності.




50 мм 40 мм

Рисунок 2.5 Зміна швидкості повітряної ударної хвилі, при підриві 3 кг сферичного заряду ВР, залежно від розмірів дискретизації скінченно-елементної моделі

З метою подальшого уточнення впливу розміру дискретизації на результати моделювання проведено аналогічний аналіз для менших розмірів елементів. Відповідні результати наведено на рисунку 2.6.

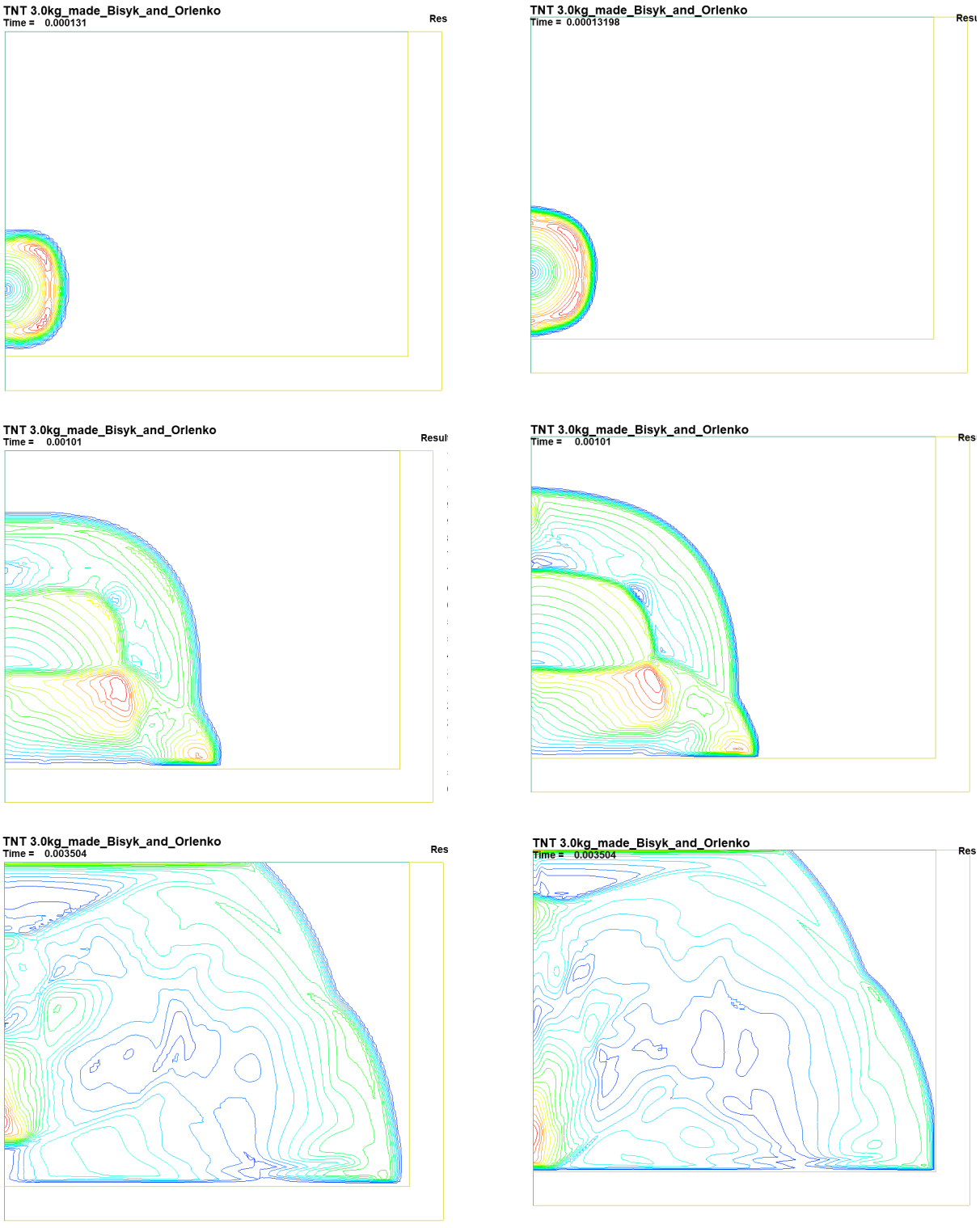
Результати, представлені на рисунку 2.6, свідчать про подальше підвищення точності моделювання при використанні розмірів елементів 30 мм та 20 мм. Зменшення розміру скінченного елемента забезпечує більш точне відтворення фронту ударної хвилі та її часових характеристик.

У цьому випадку спостерігається зменшення чисельної дисперсії результатів і підвищення стабільності чисельного рішення. Це вказує на збіжність чисельного рішення та його наближення до реального фізичного процесу.

З метою остаточного визначення оптимального розміру скінченного елемента було проведено додатковий аналіз для ще менших розмірів дискретизації. Результати цього аналізу наведено на рисунку 2.7.

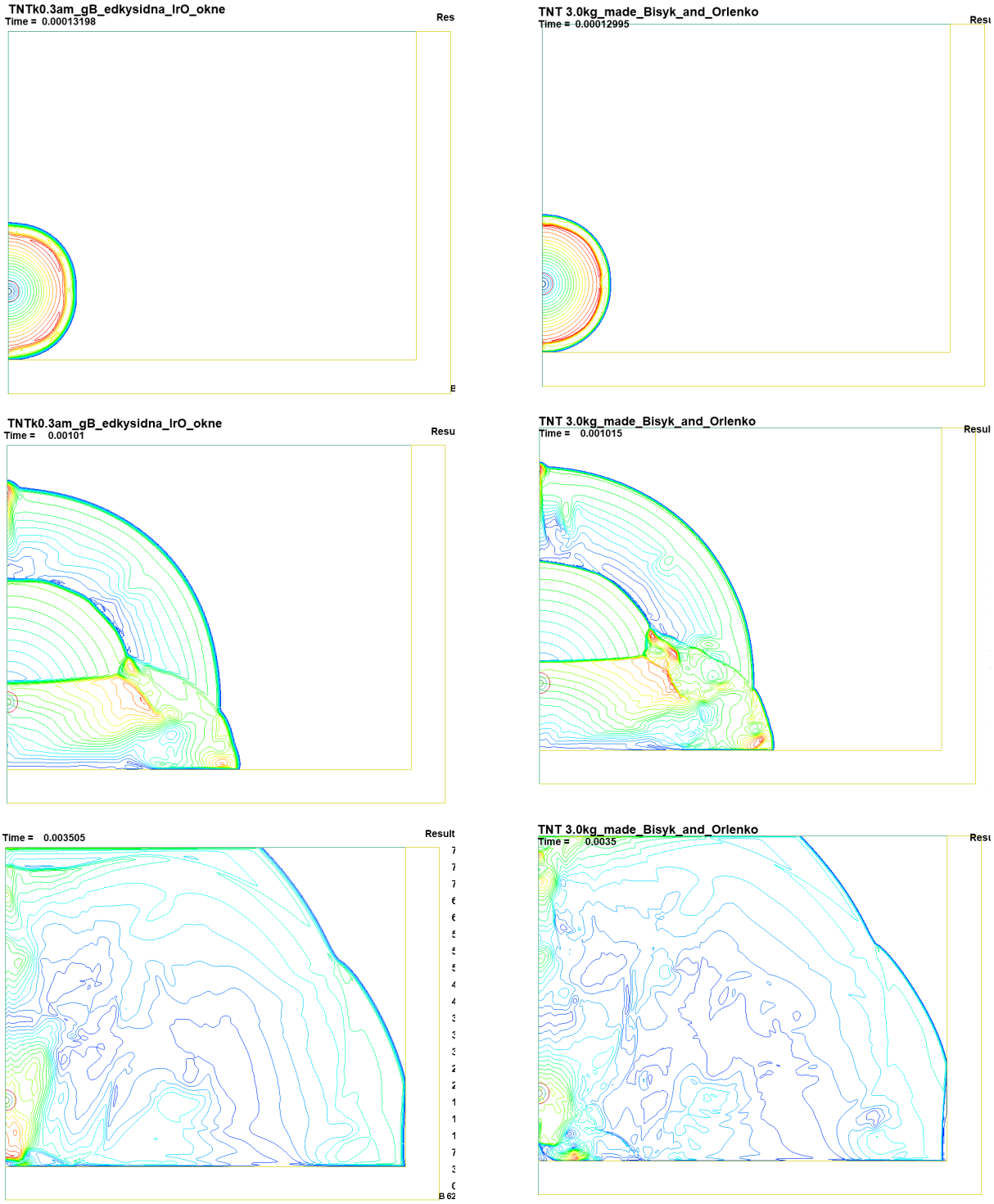
Аналіз результатів, наведених на рисунку 2.7, свідчить, що використання скінченних елементів розміром 10 мм та 5 мм забезпечує найбільш точне відтворення параметрів ударної хвилі. Подальше зменшення розміру елемента призводить лише до незначного підвищення точності, що вказує на досягнення збіжності чисельного рішення.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування скінченних елементів розміром 5 мм для досягнення оптимального балансу між точністю розрахунків та обчислювальними витратами.




30 мм 20 мм

Рисунок 2.6 Зміна швидкості повітряної ударної хвилі, при підриві 3 кг сферичного заряду ВР, залежно від розмірів дискретизації скінченно-елементної моделі




10 мм 5 мм

Рисунок 2.7 Зміна швидкості повітряної ударної хвилі, при підриві 3 кг сферичного заряду ВР, залежно від розмірів дискретизації скінченно-елементної моделі

Для детального аналізу зміни тиску ударної хвилі у контрольних точках проведено дослідження залежності тиску від часу для різних розмірів скінченно-елементної моделі, результати якого представлені на рисунках 2.8–2.13.

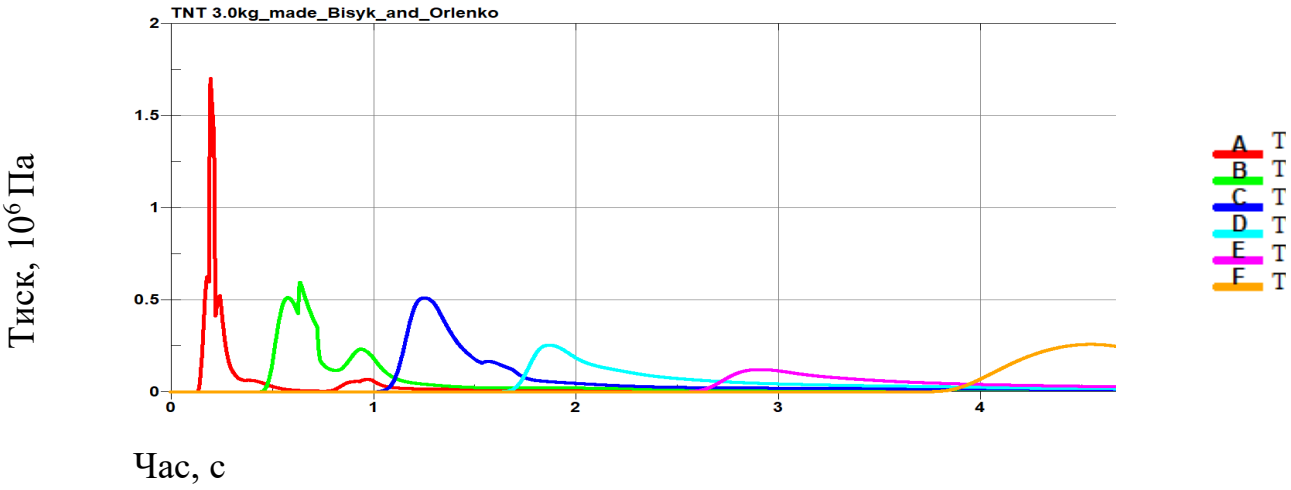



Рисунок 2.8 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг сферичного заряду ВР
(розміри скінченно-елементної моделі 50 мм)

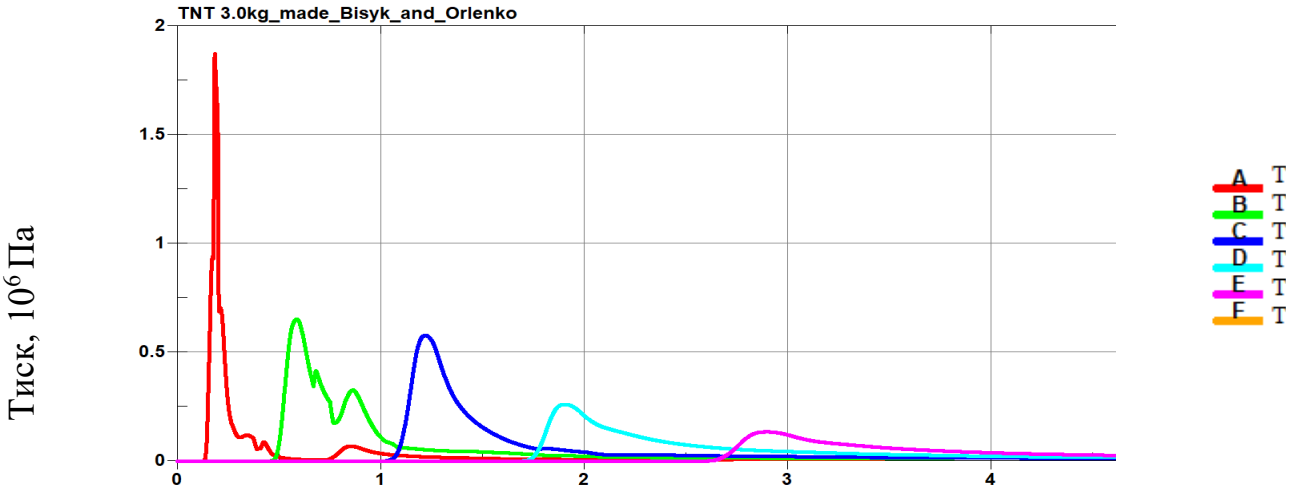



Рисунок 2.9 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг сферичного заряду ВР
(розміри скінченно-елементної моделі 40 мм)

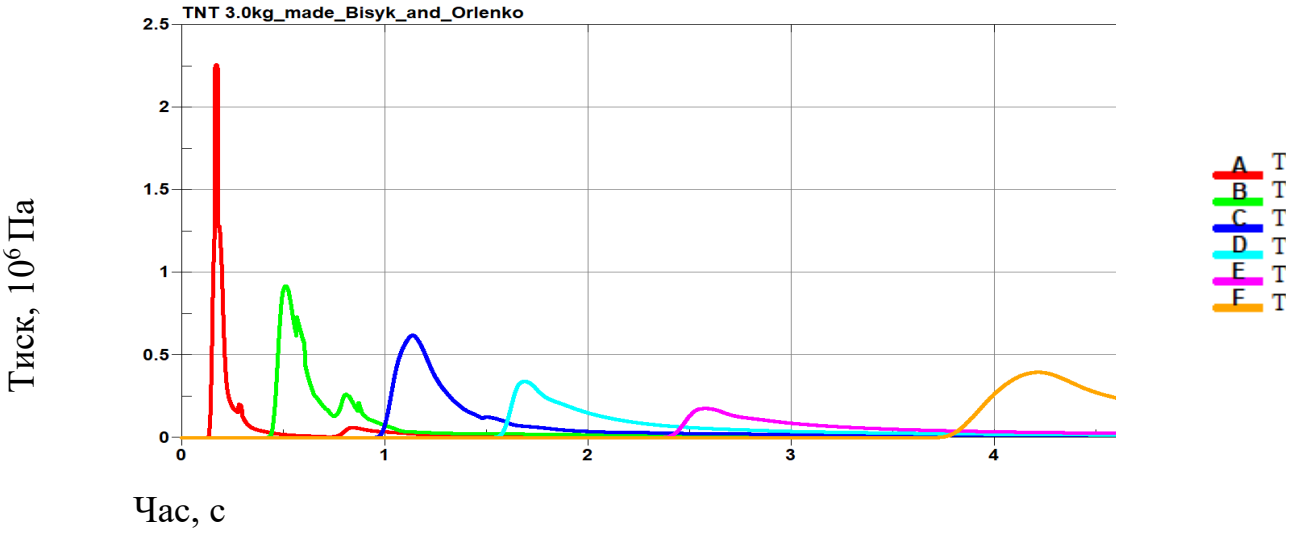



Рисунок 2.10 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг сферичного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 30 мм)

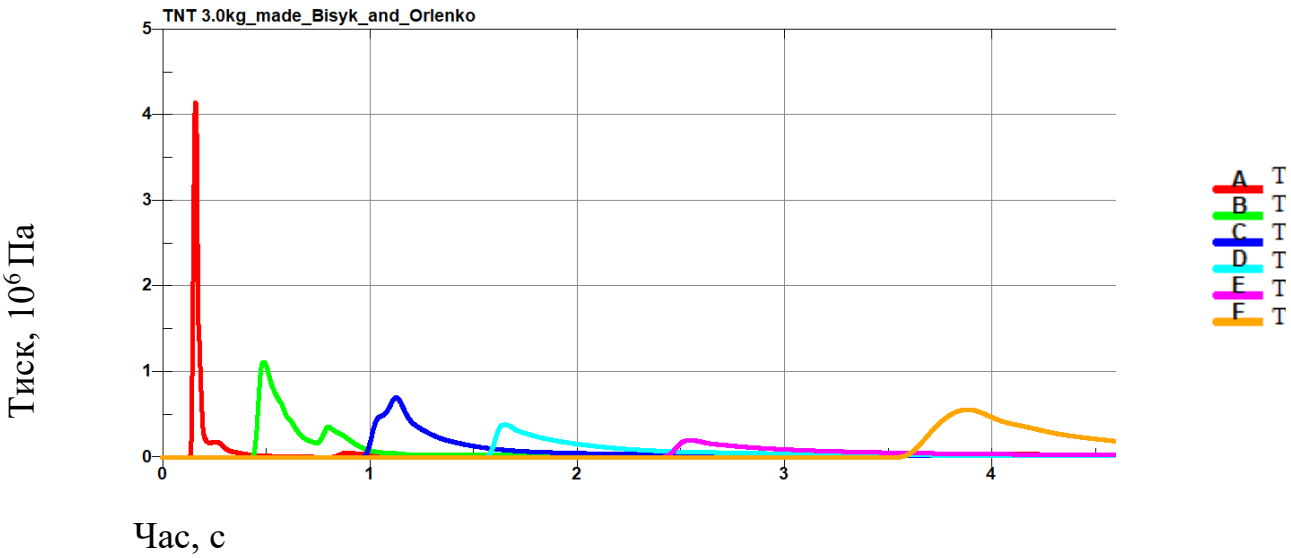



Рисунок 2.11 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг сферичного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 20 мм)

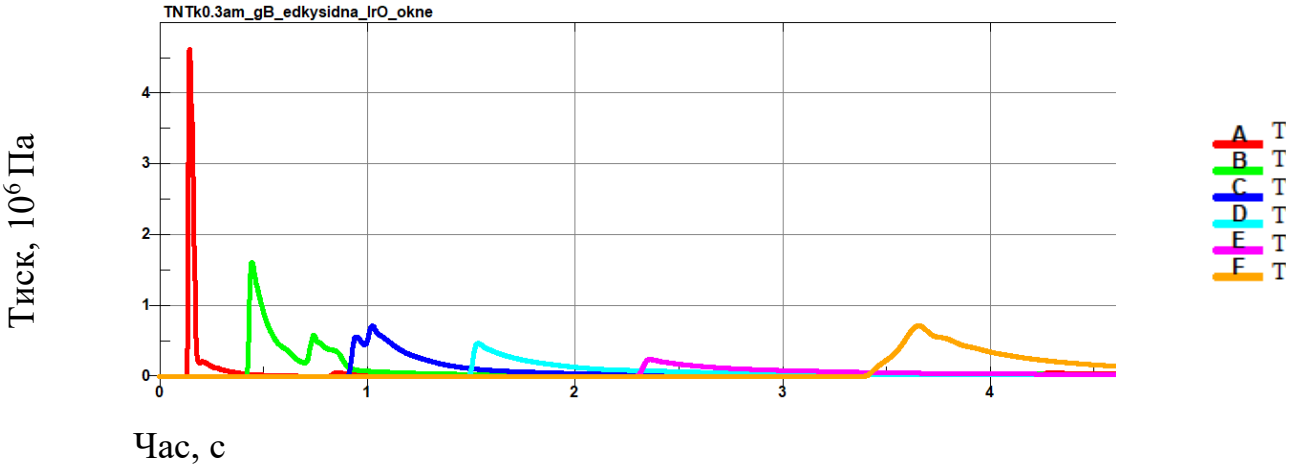



Рисунок 2.12 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг сферичного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 10 мм)

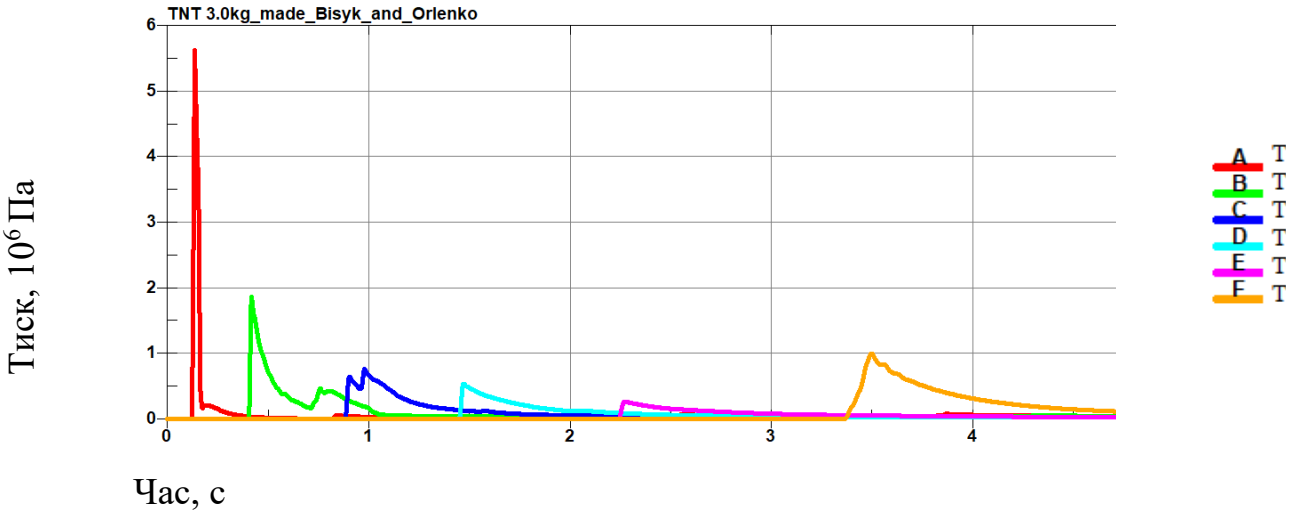



Рисунок 2.13 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг сферичного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 5 мм)

Аналіз результатів, представлених на рисунках 2.8–2.13, показує, що зі зменшенням розміру скінченного елемента спостерігається підвищення точності визначення максимального значення тиску ударної хвилі. При цьому форма кривої тиску наближається до теоретично очікуваної залежності, що характеризується різким зростанням тиску на фронті ударної хвилі та подальшим поступовим зниженням.

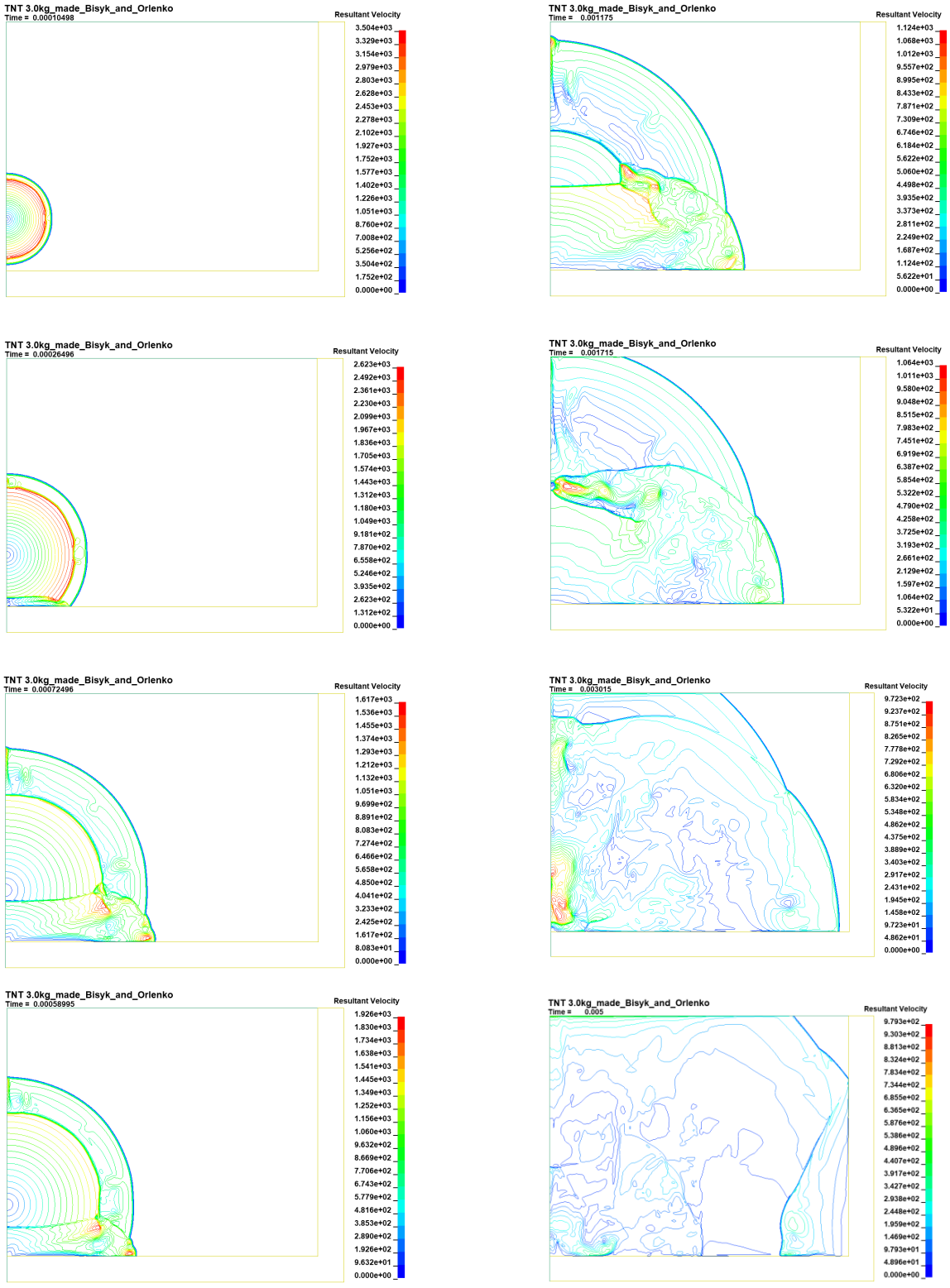



Рисунок 2.14 Зміна швидкості повітряної ударної хвилі, при підриві 3 кг сферичного заряду ВР

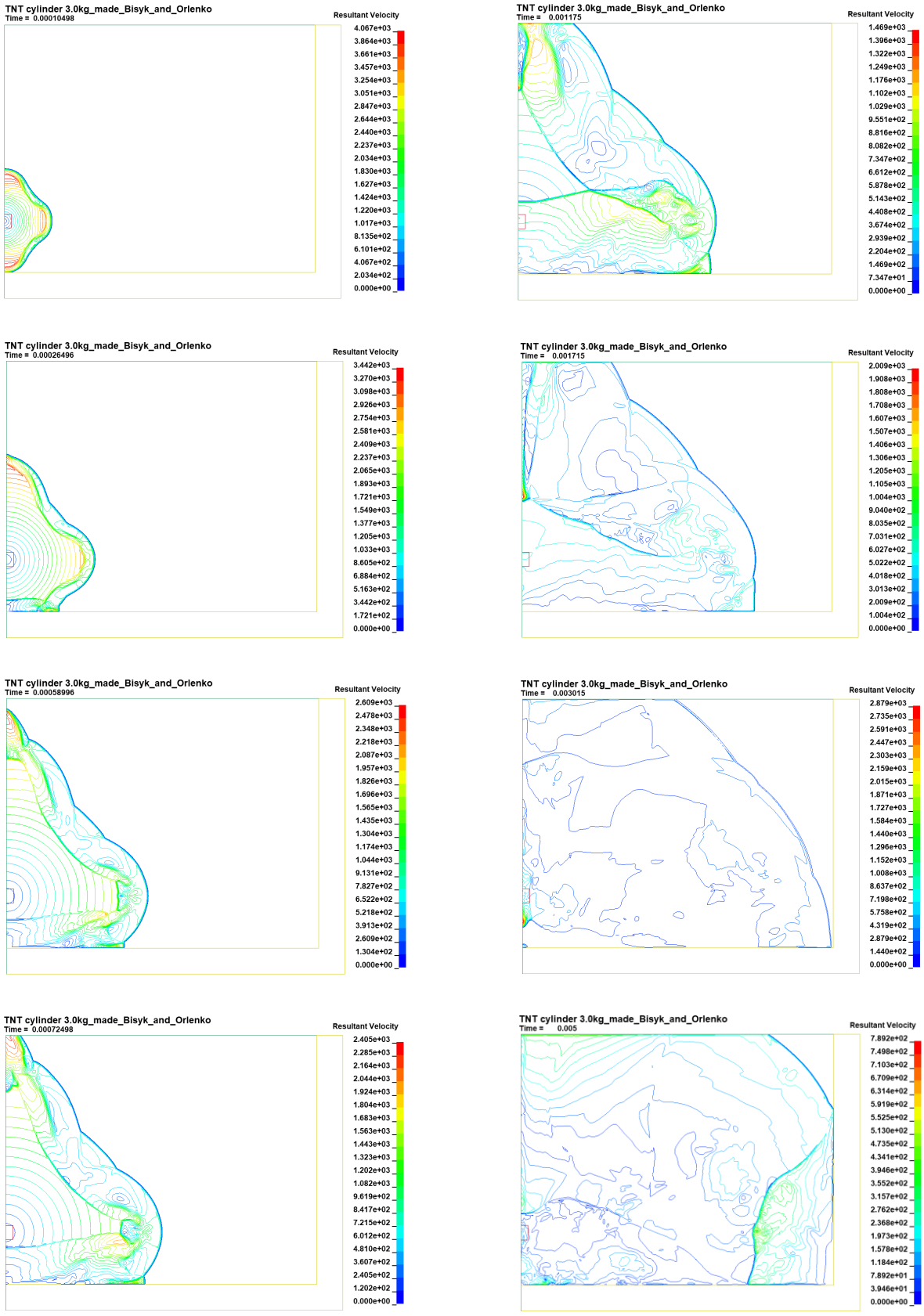



Рисунок 2.15 Зміна швидкості повітряної ударної хвилі, при підриві 3 кг циліндричного заряду ВР

Встановлено, що при використанні розміру елемента 5 мм забезпечується найбільш точне відтворення пікових значень тиску та часових характеристик ударної хвилі.

Для оцінки впливу геометричної форми заряду на параметри ударної хвилі проведено порівняльний аналіз сферичного та циліндричного зарядів, результати якого представлено на рисунках 2.14 – 2.15.

Результати на рисунках 2.14 – 2.15 показують, що форма заряду сильно впливає на параметри ударної хвилі на початку її поширення. Поруч із зарядом швидкість ударної хвилі відрізняється для сферичного і циліндричного зарядів.

Порівняння полів швидкості показує, що фронт перебудовується під час руху хвилі. Просторова картина може бути схожою, але це не означає, що локальні піки тиску однакові. Їх треба порівнювати в тих самих контрольних точках, відокремлюючи падаючу і відбиту хвилі.

На рисунках 2.16–2.21 показано, як змінюється тиск у циліндричному заряді з часом.

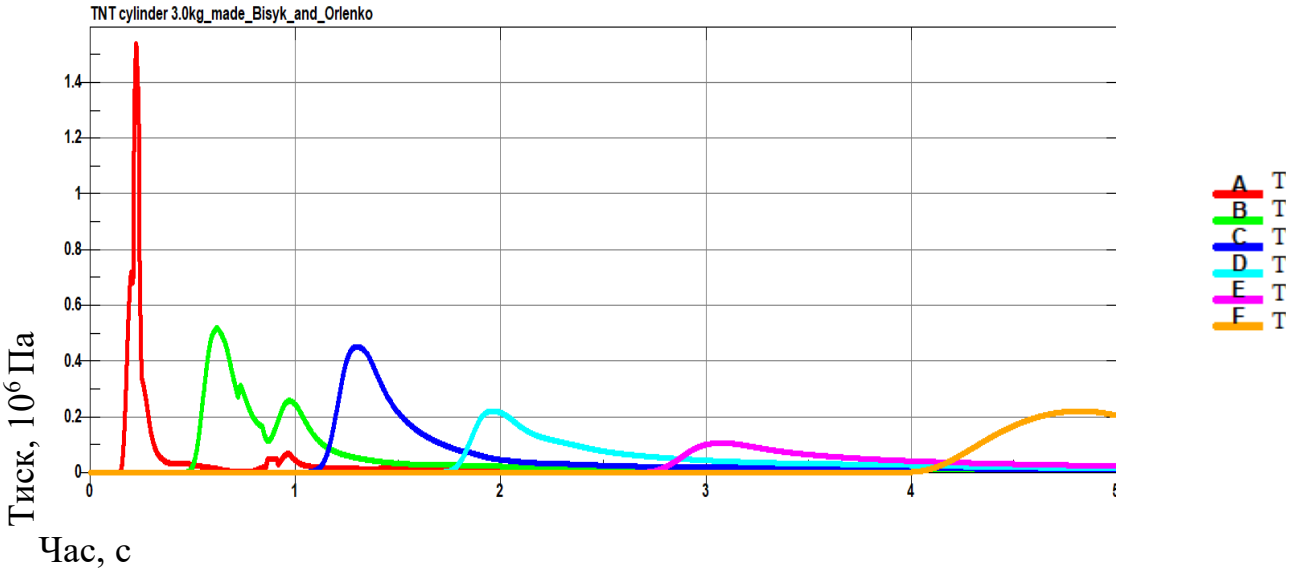



Рисунок 2.16 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг циліндричного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 50 мм)

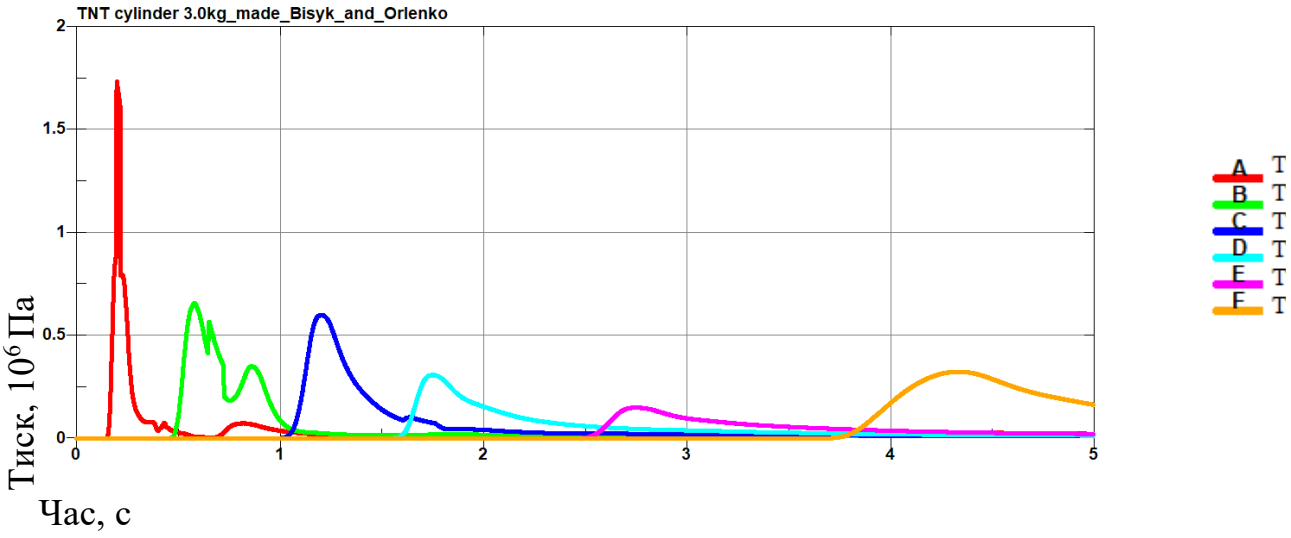



Рисунок 2.17 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг циліндричного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 40 мм)

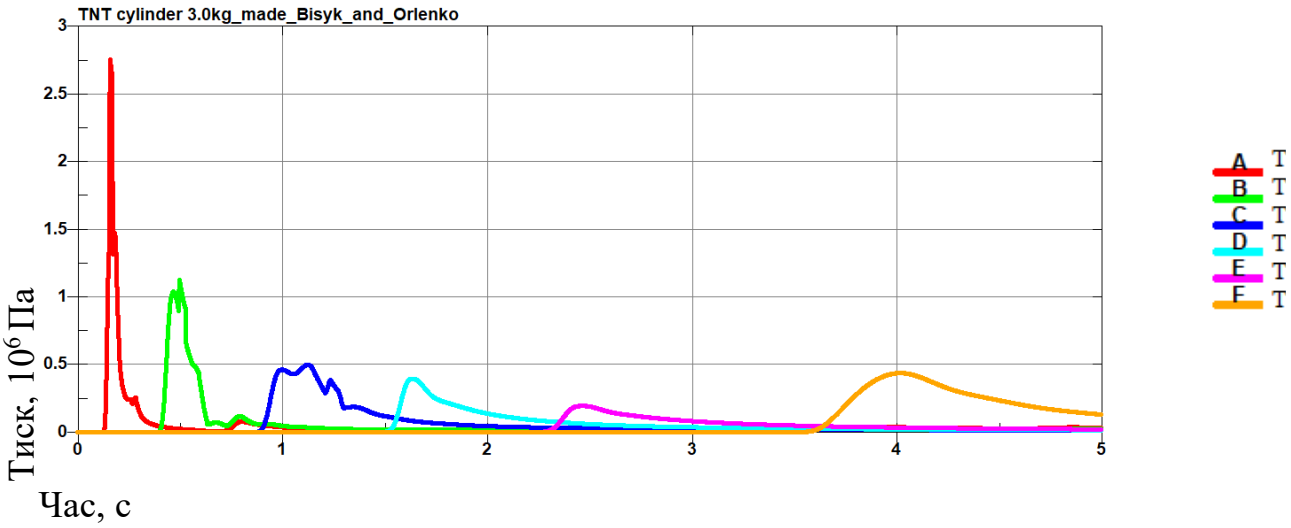



Рисунок 2.18 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг циліндричного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 30 мм)

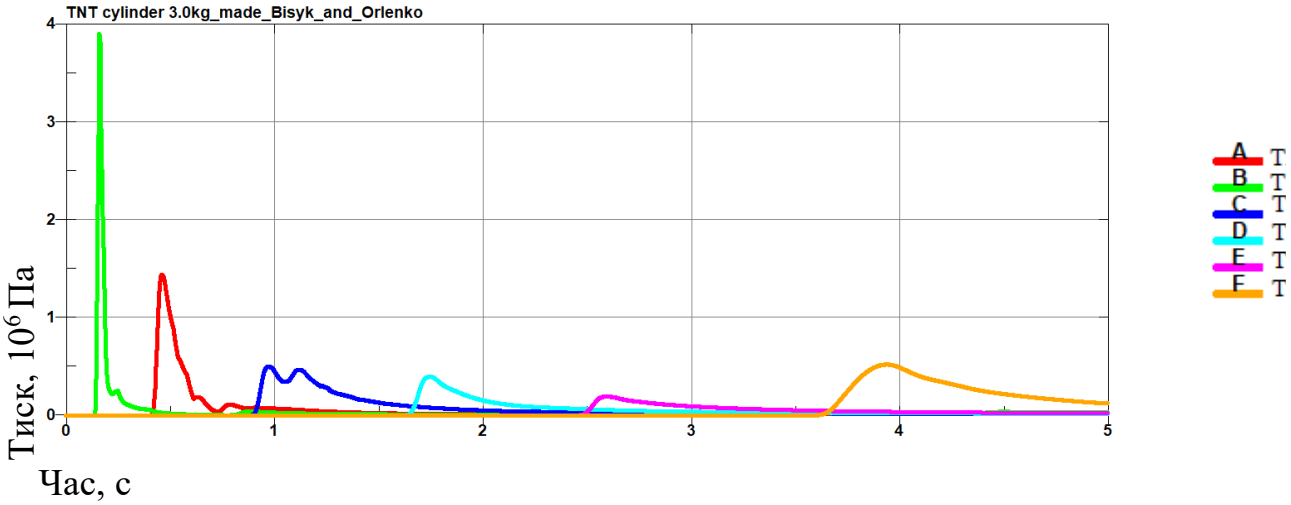



Рисунок 2.19 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг циліндричного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 20 мм)

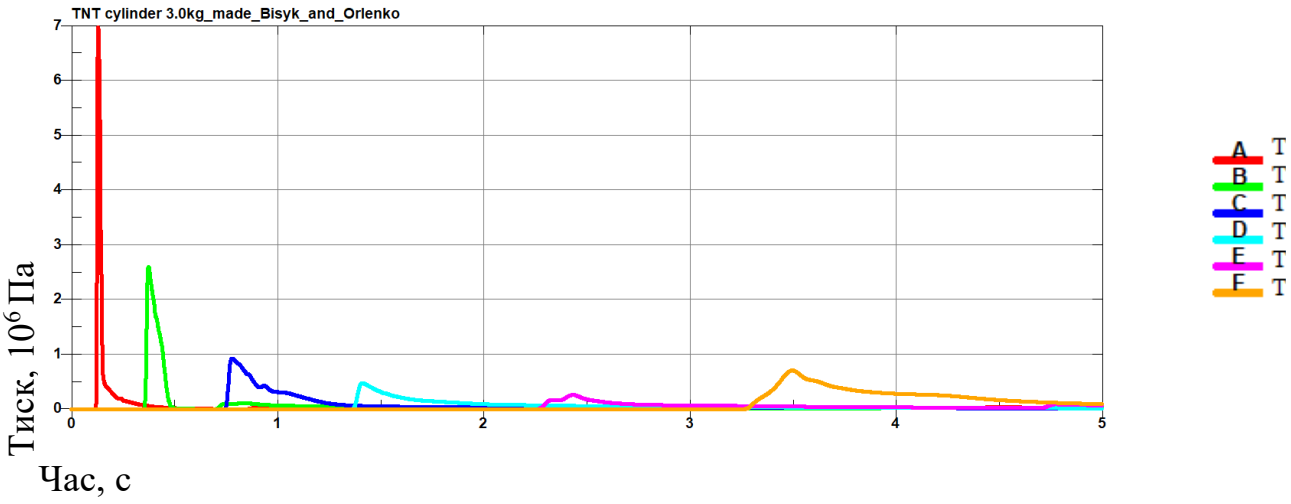



Рисунок 2.20 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг циліндричного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 10 мм)

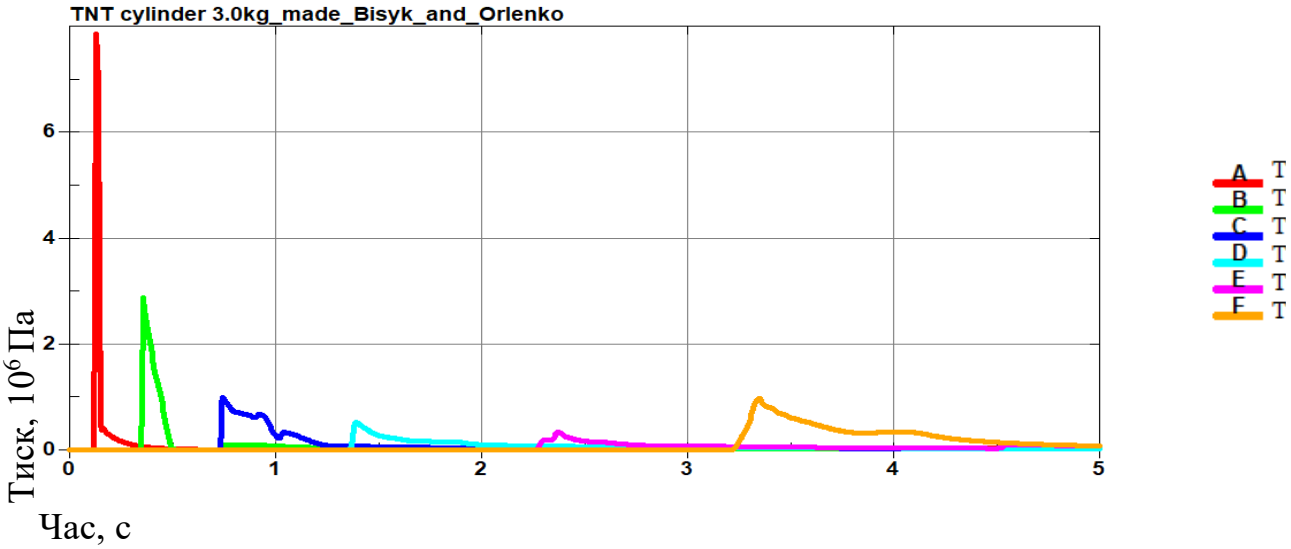



Рисунок 2.21 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг циліндричного заряду ВР (розміри скінченно-елементної моделі 5 мм)

Чисельне моделювання ударних процесів показало, як поширюється повітряна ударна хвиля і як параметри скінченно-елементної моделі впливають на точність результатів. Зменшення розміру скінченного елемента підвищує точність моделювання і дає більш точне відтворення фізичних процесів поширення ударної хвилі.

Встановлено, що скінченний елемент розміром 5 мм дає прийнятну точність і не потребує великих обчислювальних ресурсів. Проте цього недостатньо для моделювання елементів профільних систем СОК.

Форма заряду впливає на контрольні точки по-різному. Для відбитого піка на дослідженій вертикальній стінці при кроці сітки 5 мм обидві форми дають схожі результати. Чи можна так само оцінити всі точки траси та інші параметри хвилі, треба перевірити окремо за таблицями 2.5 і 2.6.

Отримані результати показують, що розроблена чисельна модель працює правильно і її можна використовувати для дослідження вибухостійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій.

Таблиці 2.5 і 2.6 показують чутливість чисельних піків до кроку скінченно-елементної сітки для обох форм заряду. Зростання піка за подрібнення сітки саме по собі не означає зменшення розбіжності з кожною аналітичною моделлю. За наявності відбитих хвиль необхідно перевіряти, якому етапу часового сигналу належить порівнюваний максимум; зіставлення глобального чисельного піка з падаючим аналітичним піком без такої перевірки може бути некоректним.

У таблиці 2.5 наведено результати чисельного моделювання значень тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках під час підриву сферичного заряду вибухової речовини масою 3 кг для різних розмірів скінченно-елементної дискретизації. Аналіз отриманих результатів свідчить про чітку залежність значення розрахованого тиску від розміру скінченного елемента.

Зокрема, при відстані 0,5 м від центру вибуху значення тиску збільшується з 1700 кПа при розмірі елемента 50 мм до 5630 кПа при розмірі елемента 5 мм, що свідчить про значне підвищення точності моделювання при зменшенні розміру елемента. Аналогічна тенденція спостерігається і для інших контрольних точок. Наприклад, на відстані 1,0 м значення тиску зростає з 595 кПа до 1860 кПа, а на відстані 3,0 м – з 259 кПа до 998 кПа.

Отримані результати можна пояснити тим, що при більш дрібній дискретизації фронт ударної хвилі відтворюється точніше. Зменшується чисельна дисперсія, тому максимальні значення тиску визначаються точніше.

Ще одна важлива особливість: коли відстань від центру вибуху зростає, абсолютна різниця між результатами для різних розмірів елемента стає меншою. Це відбувається через зменшення інтенсивності ударної хвилі.

*Таблиця 2.5*

Значення тиску ударної хвилі вибуху в контрольних точках при чисельному моделюванні підриву 3 кг сферичного заряду ВР

| Відстань, м | Значення тиску повітряної УХ, кПа (сферичний заряд) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 мм | 40 мм | 30 мм | 20 мм | 10 мм | 5 мм |
| 0,5 | 1700 | 1870 | 2260 | 4150 | 4630 | 5630 |
| 1,0 | 595 | 652 | 919 | 1110 | 1610 | 1860 |
| 1,5 | 511 | 578 | 621 | 701 | 716 | 760 |
| 2,0 | 254 | 261 | 341 | 383 | 469 | 534 |
| 2,5 | 122 | 135 | 176 | 199 | 240 | 265 |
| 3,0 | 259 | 307 | 396 | 560 | 718 | 998 |

Для оцінки впливу геометричної форми заряду на параметри ударної хвилі проведено аналогічний аналіз для циліндричного заряду, результати якого наведено у таблиці 2.6.

*Таблиця 2.6*

Значення тиску ударної хвилі вибуху в контрольних точках під час чисельного моделювання підриву 3 кг циліндричного заряду ВР

| Відстань, м | Значення тиску повітряної УХ, кПа (циліндричний заряд) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 мм | 40 мм | 30 мм | 20 мм | 10 мм | 5 мм |
| 0,5 | 1540 | 1740 | 2760 | 3910 | 6990 | 7860 |
| 1,0 | 519 | 657 | 1130 | 1440 | 2600 | 2880 |
| 1,5 | 452 | 601 | 499 | 500 | 930 | 986 |
| 2,0 | 221 | 309 | 395 | 398 | 476 | 515 |
| 2,5 | 106 | 150 | 194 | 194 | 265 | 336 |
| 3,0 | 221 | 325 | 437 | 523 | 710 | 971 |

Таблиця 2.6 містить результати чисельного моделювання тиску ударної хвилі під час підриву циліндричного заряду вибухової речовини масою 3 кг. Аналіз цих результатів показує, що зміна тиску залежно від розміру скінченного елемента відбувається так само, як і для сферичного заряду.

Зокрема, при відстані 0,5 м тиск зростає з 1540 кПа при розмірі елемента 50 мм до 7860 кПа при розмірі елемента 5 мм. Зменшення розміру скінченного елемента потрібно для точного визначення параметрів ударної хвилі.

Порівнюючи результати для сферичного і циліндричного зарядів, видно: на малих відстанях від центру вибуху форма заряду впливає на тиск. Наприклад, на відстані 0,5 м тиск біля циліндричного заряду становить 7860 кПа, а біля сферичного — 5630 кПа. Це пов’язано з геометрією заряду і напрямком руху продуктів детонації.

На вертикальній стінці на відстані 3,0 м і з кроком сітки 5 мм відбиті піки складають 998 кПа для сферичної форми і 971 кПа для циліндричної. Це показує, що ці локальні результати дуже схожі. Щоб перевірити, наскільки це справедливо просторово, далі наведено порівняння для всіх шести контрольних точок.

Щоб перевірити, чи впливає форма на результат у різних просторових умовах, за таблицями 2.5 і 2.6 обчислили $\delta ф = |Рц - Рс|/Рс \cdot 100\ \%$, де Рц і Рс - це пікові значення для циліндричної та сферичної форми. Порівнювали з однаковим кроком сітки 5 мм. На рисунку 2.22 точку Т6 показали окремим маркером і не з’єднали з іншими точками. На цій ділянці стінки аналізували відбитий пік, а Т1–Т5 відповідають сигналам уздовж траси поширення [4].

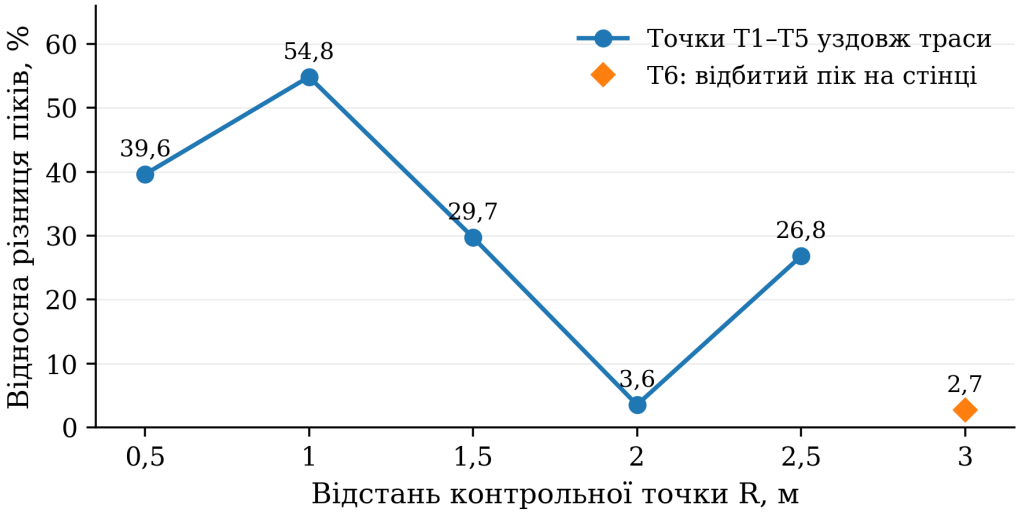



Рисунок 2.22 Відносна різниця табличних піків для двох форм заряду за кроку сітки 5 мм

*Джерело: розроблено автором.*

Для відстаней 0,5, 1,0 та 1,5 м різниця дорівнює 39,6, 54,8 та 29,7 % відповідно. На відстані 2,0 м вона падає до 3,6 %, але на 2,5 м знову піднімається до 26,8 %. На стінці при R = 3,0 м значення 998 і 971 кПа відрізняються на 2,7 % від сферичної форми. Тому збіг в кінцевій контрольній точці не показує, що вплив форми зникає на всій ділянці після 1,5–2,0 м.

Немонотонність цього показника вимагає перевірити часові історії. У різних точках глобальний максимум може відповідати різним стадіям проходження або відбиття хвилі. За табличними пікам не можна чітко відокремити цей чинник від просторової спрямованості навантаження чи впливу дискретизації. Тому зближення відбитих піків треба пов’язувати зі стінкою, яку досліджували, геометрією області і кроком 5 мм. Це не скасовує потреби перевірити імпульс і інші характеристики перед тим, як поширювати висновок на іншу задачу.

Щоб перевірити, наскільки результати чисельного моделювання відповідають аналітичним оцінкам, їх зіставлено з орієнтиром за моделлю Kingery–Bulmash у таблиці 2.7: для точок T1–T5 порівнюється падаючий тиск,

для точки Т6 на стінці — відбитий. Чисельні значення взято з таблиці 2.5 для кроку сітки 5 мм.

*Таблиця 2.7*

Зіставлення аналітичних (Kingery–Bulmash) і чисельних (крок сітки 5 мм) піків тиску для сферичного заряду ВР масою 3 кг

| Відстань R, м | Аналітичний орієнтир (Kingery–Bulmash), кПа | Чисельне моделювання, крок сітки 5 мм, кПа | Відхилення, % |
|---|---|---|---|
| 0,5 | 6917 | 5630 | 18,6 |
| 1,0 | 2464 | 1860 | 24,5 |
| 1,5 | 1143 | 760 | 33,5 |
| 2,0 | 622 | 534 | 14,1 |
| 2,5 | 380 | 265 | 30,3 |
| 3,0 (Т6, відбитий тиск) | 951 | 998 | 4,9 |

Для падаючого тиску на трасі відхилення становить від 14,1 до 33,5 %, і лише для відбитого піка на стінці воно зменшується до 4,9 % (951 кПа за моделлю Kingery–Bulmash проти 998 кПа за розрахунком). Тобто узгодженість з аналітичним орієнтиром досягнуто саме для цільового показника — відбитого тиску в точці Т6, тоді як для падаючих піків розбіжність залишається істотною і потребує окремого пояснення (підрозділ 2.4).

Для відбитої хвилі на відстані 3,0 м аналітичне значення за моделлю Кінгері, Балмаша дорівнює 951 кПа, а чисельне для сферичної форми при кроці 5 мм — 998 кПа. Відносне відхилення складає 4,9 %. Це показує локальну узгодженість відбитого піка, але не означає однакову точність для всіх параметрів хвилі чи для розрахунку руйнування конструкції.

Відхилення від референтного відбитого тиску зручно розглядати окремо від розбіжності між моделями. На рисунку 2.23 для точки Т6 показано $\delta r = |Pr,h - 951|/951 \cdot 100$ %, де Pr,h — це чисельний відбитий пік для даного кроку сітки. Значення 951 кПа взято з аналітичної колонки Кінгері, Балмаша у таблиці 2.7.

До графіка внесли тільки ті кроки, для яких у таблицях 2.5 і 2.6 є прямі числові значення; результат на стінці при кроці 2 мм не відновлювали з інших даних [4].

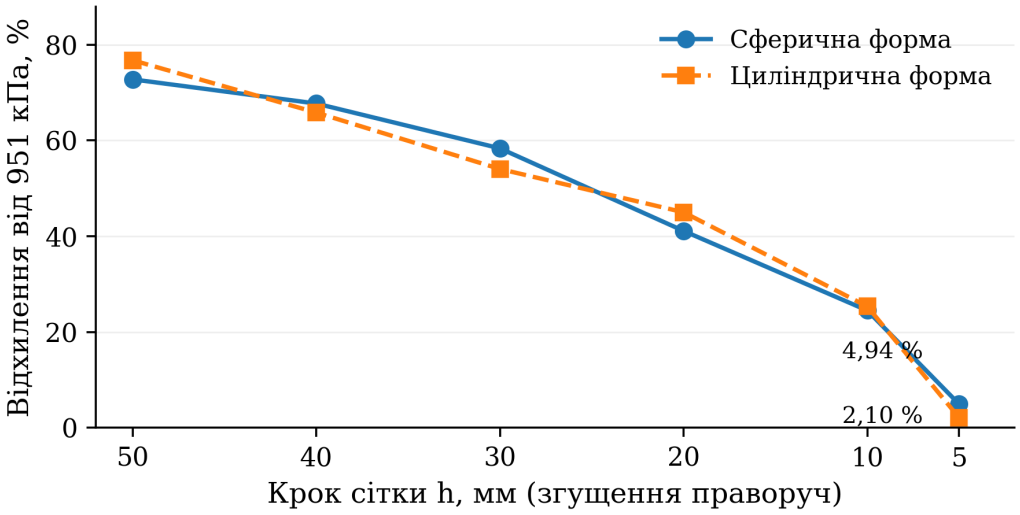



Рисунок 2.23 Зміна відхилення відбитого піка у точці T6 від референтного значення 951 кПа під час згущення сітки

*Джерело: розроблено автором.*

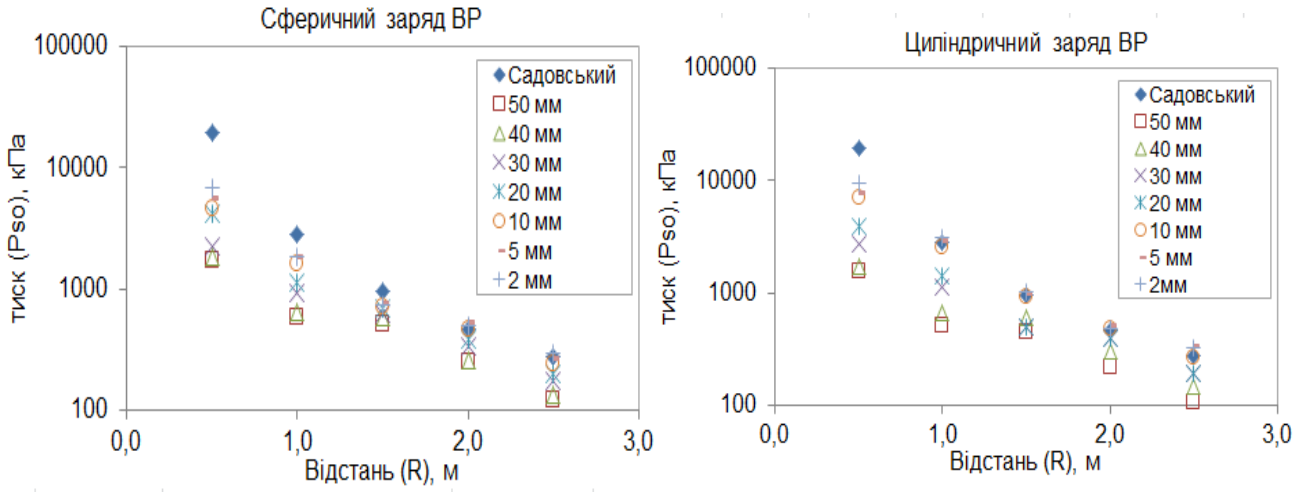
Для сферичної форми відхилення падає з 72,77 % при кроці 50 мм до 4,94 % при кроці 5 мм, а для циліндричної — з 76,76 до 2,10 %. Абсолютне відхилення не показує знак: при кроці 10 мм обидва чисельні піки нижчі за 951 кПа, а при кроці 5 мм — вищі. Тому мінімальна відстань до референтної точки ще не визначає асимптотичну межу чисельного розв’язку.

Розмір кроку 5 мм тут вибрали через прийнятну локальну відповідність відбитого піка та обчислювальні витрати, а не через підтверджену однакову точність для всього поля. Відхилення 2,10 % для циліндричної форми теж не показує, що вона фізично точніша за сферичну: обидва ці результати порівнюють з однією аналітичною оцінкою, а не з окремими вимірами для кожної форми. Перевірка збіжності імпульсу та реакції деформівної конструкції — окрема задача.

Проте на невеликій відстані від центру вибуху результати аналітичних і

чисельних розрахунків відрізняються більше. Це відбувається через складні фізичні процеси, які впливають на формування фронту ударної хвилі і відбиття хвиль від поверхонь.

Щоб легше порівняти результати чисельного моделювання для різних розмірів скінченного елемента, ці результати показані на рисунку 2.24.




а) б)

Рисунок 2.24 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг сферичного (а) та циліндричного (б) зарядів ВР залежно від розміру скінченного елемента

Рисунок 2.24 показує, як змінюється тиск ударної хвилі залежно від розміру скінченного елемента для сферичних і циліндричних зарядів вибухової речовини.

Залежності показують, як чисельний пік змінюється під час подрібнення сітки у вибраних контрольних точках. Якщо окреме значення наближається до аналітичної оцінки, це можна використати як один із критеріїв перевірки; але цього недостатньо, щоб підтвердити асимптотичну збіжність усього розв'язку чи адекватність моделі деформівного віконного блока.

Крок 5 мм розглядається як раціональний для дослідженої задачі визначення відбитого піка на стінці з урахуванням обчислювальних витрат.

Подальше подрібнення до 2 мм не забезпечує однакового поліпшення узгодженості з аналітичними моделями в усіх контрольних точках, що показує таблиця 2.8.

Коли відбиті піки двох форм розташовані близько один до одного при кроці 5 мм, це можна вважати локальним результатом для цієї геометрії. Це не означає, що часові навантаження повністю еквівалентні, і не скасовує потребу перевіряти форму і імпульс, якщо змінюється розрахункова постановка.

Відхилення чисельного результату визначають вибрана аналітична модель і контрольна точка (таблиця 2.8). За [4], розрахунок із кроком 2 мм вимагав набагато більше ресурсів і міг створювати до 300 Гбайт даних. Це врахували, коли обрали крок 5 мм для дослідження; обчислювальні витрати при цьому не гарантують достатньої точності для інших геометрій, імпульсів чи деталей профільної системи.

*Таблиця 2.8*

Значення відносної похибки визначення тиску ударної хвилі між аналітичним рішенням та чисельним моделюванням для сферичного заряду

| Відстань, м | Садов-ський | Kingery and Bulmash | Kinney and Graham | Newmark and Hansen | Henrych and Major |
|---|---|---|---|---|---|
| Дискретизація скінченно-елементної моделі 5 мм | | | | | |
| 0,5 | 70,8 | 18,6 | 24,1 | 68,2 | 15,1 |
| 1,0 | 33,2 | 24,5 | 13,8 | 26,9 | 27,0 |
| 1,5 | 20,2 | 33,5 | 17,9 | 13,6 | 4,1 |
| Дискретизація скінченно-елементної моделі 2 мм | | | | | |
| 0,5 | 64,9 | 2,0 | 8,6 | 61,7 | 2,2 |
| 1,0 | 34,6 | 26,1 | 15,6 | 28,5 | 24,2 |
| 1,5 | 22,9 | 35,8 | 20,7 | 16,6 | 0,5 |

Розраховане за аналітичним виразом Kingery and Bulmash значення тиску від відбитої ударної хвилі для сферичного заряду ВР масою 3 кг на відстані 3 м дорівнює 951 кПа. Розрахунок із використанням чисельного моделювання дав значення тиску 998 кПа. Відносна похибка становить 4,9 %.

Локальність ефекту подрібнення додатково ілюструє рисунок 2.25, побудований за опублікованими відхиленнями від моделі Кінгері–Балмаша у таблиці 2.8. Тут порівнюються кроки 5 мм та 2 мм у точках на відстанях 0,5; 1,0 і 1,5 м. Значення відтворено з табличним округленням; графік не містить обернено відновлених піків чи нових розрахунків. Його ордината характеризує саме розбіжність з аналітичною моделлю, а не незалежно визначену похибку дискретизації [4].

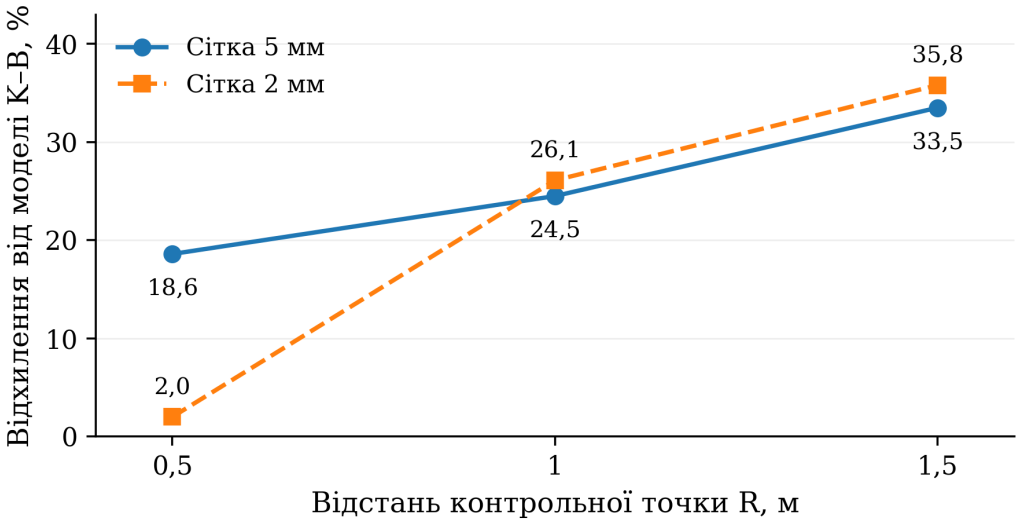



Рисунок 2.25 Порівняння табличних відхилень від моделі Кінгері–Балмаша за кроків сітки 5 та 2 мм

На відстані 0,5 м подрібнення сітки зменшує відхилення з 18,6 до 2,0 %, тобто на 16,6 відсоткового пункту. На відстанях 1,0 і 1,5 м відхилення, навпаки, зростає з 24,5 % до 26,1 % і з 33,5 % до 35,8 %. Отримані дані не підтверджують, що перехід до 2 мм у кожній точці завжди наближає чисельний розв’язок до вибраної формули. Треба окремо перевіряти, чи порівнюються фізично однойменні піки, особливо якщо є відбиття.

Тому подальше обґрунтування дискретизації потрібно будувати на кількох критеріях: зміні чисельного результату між послідовними сітками, збігу з аналітичною оцінкою там, де вона застосовується, і відповідності незалежному вимірюванню. Жоден з цих критеріїв не замінює інші.

Таблиці дають змогу кількісно описати чутливість піків і сформулювати локальне рішення щодо кроку, але не показують універсальну похибку всіх параметрів ударної хвилі.

Аналіз часових картин показує, що геометрія поширення і відбиття хвилі впливають на результати двох форм заряду. На стінці за кроку 5 мм різниця піків дорівнює 2,7 %, але для точки на відстані 2,5 м вона досягає 26,8 %. Тому не можна стверджувати, що вплив форми зникає після 1,5 або 2 м, або що результати завжди близькі для всіх кроків дискретизації (рисунок 2.26).

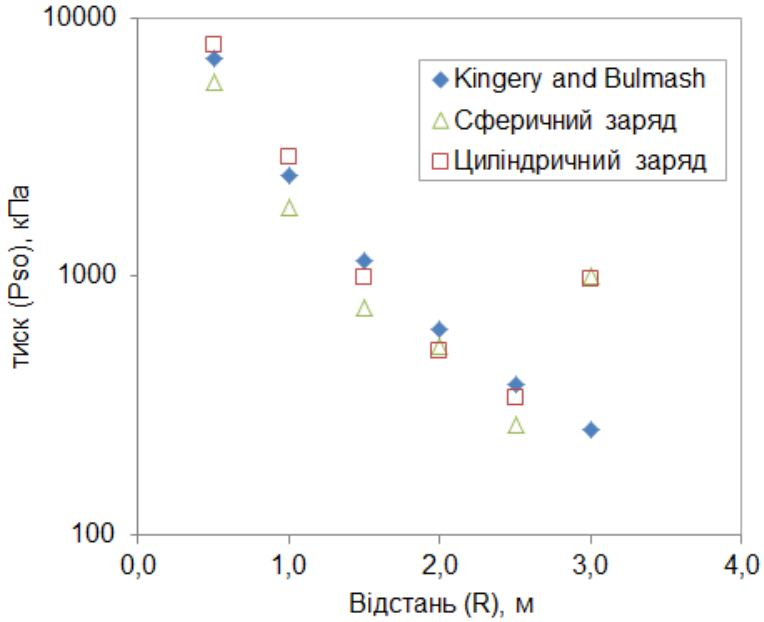



Рисунок 2.26 Значення тиску повітряної ударної хвилі в контрольних точках при підриві 3 кг сферичного та циліндричного зарядів ВР отримані за аналітичним виразом та чисельним моделюванням

Аналіз показує, як чисельні піки залежать від просторової дискретизації, форми заряду й положення контрольної точки. Для дослідженої стінки визначили робочий крок на місці. Щоб перевірити імпульс, часову форму й поведінку деформівних елементів СОК, потрібні додаткові дані.

## 2.4 Контроль достовірності розрахункових результатів і межі застосовності моделі

Щоб правильно скористатися результатами цього розділу, треба уточнити, як саме розуміти використаний критерій точності. Значення відносного відхилення 4,9 % отримали, коли порівняли чисельно знайдений відбитий тиск 998 кПа з аналітичним значенням 951 кПа за моделлю Кінгері, Балмаша. Це число показує, наскільки близько співпадають два методи розрахунку в конкретній контрольній точці. Воно не показує відхилення від незалежного експериментального вимірювання. Таке розмежування потрібне для правильного трактування цього кількісного результату і його подальшого використання у практичних порадах [4].

Верифікаційна перевірка оцінює, наскільки правильно виконана обрана математична постановка. У цих дослідженнях вона включає перевірку впливу сітки, відповідність одиниць і точність порівняння падаючого та відбитого тисків. Для валідації потрібно порівнювати результати з незалежними експериментальними даними, отриманими в тих самих умовах. Тому відповідність аналітичній залежності є обов’язковою для перевірки, але цього недостатньо, щоб показати, що модель може передбачати всі особливості реального процесу [4; 70].

Міжмодельна розбіжність має іншу причину. Вона з'являється через різні вихідні припущення, експериментальні дані та апроксимації аналітичних залежностей. Зменшення розміру скінченного елемента може зробити чисельне відтворення обраної задачі точнішим, але не прибирає розбіжності між самими аналітичними моделями. Тому висновок про раціональний крок сітки і висновок про придатність певної аналітичної залежності треба робити на основі різних порівнянь і подавати окремо [2; 4].

Потрібно окремо враховувати похибку пікового тиску та похибки інших характеристик хвилі. Навіть якщо максимуми близькі, це не означає однакову

тривалість позитивної фази або однаковий імпульс. Чисельне згладжування фронту впливає на амплітуду, а інтегральний результат залежить від усієї часової історії. Порівняння лише за піком перевіряє тільки один показник. На наступному етапі дослідження варто додати зіставлення моменту приходу хвилі, тривалості позитивної фази та площі під кривою тиску.

Для оцінювання розкиду результатів можна використати відношення найбільшого до найменшого тиску серед розглянутих аналітичних моделей у кожній контрольній точці. Цей показник не визначає істинного значення тиску, але робить порівняння незалежним від абсолютного рівня навантаження. За опублікованими даними на відстані 0,5 м крайні значення становлять 19 290 і 6 633 кПа; їх відношення дорівнює приблизно 2,91. На відстані 3,0 м відповідні значення 254 і 161 кПа дають відношення близько 1,58 [4].

Отримане порівняння уточнює висновок про зближення залежностей зі збільшенням відстані. У межах розглянутого інтервалу абсолютний розкид зменшується, проте моделі не стають тотожними. На відстані 3,0 м різниця між крайніми оцінками залишається 93 кПа, тобто близько 58 % від меншого значення. Тому твердження про зниження чутливості результату до вибору моделі є обґрунтованим лише як порівняння з ближньою зоною, а не як підстава вважати міжмодельну розбіжність неістотною.

Використання масштабованої відстані дає зручний спосіб подати результати, але все одно треба враховувати геометрію задачі. Порівнювати варто ті залежності, які мають однакові умови поширення хвилі, той самий тип заряду у моделі та такий самий спосіб визначення тиску. Щоб перенести висновок на іншу масу або іншу схему перешкод, не вистачає просто підставити нову масштабовану відстань; треба перевірити, чи залишилися чинними припущення, за яких отримали початкові результати [2; 83].

У задачі навантаження вертикальної стінки порівняння відбитого тиску в чисельній моделі з падаючим тиском з аналітичної формули особливо

ризиковане. Таке порівняння може показати велику похибку, навіть якщо результати фізично збігаються. У цьому дослідженні контрольна точка на стінці не збігається з попередніми точками на шляху поширення хвилі [4].

Для сітки з кроком 5 мм на вертикальній стінці отримали 998 кПа для сферичної і 971 кПа для циліндричної форми заряду. Аналітичний орієнтир становить 951 кПа; це на 4,94 % і 2,10 % більше відповідно. Ці відсотки розраховані безпосередньо з наведених у дослідженні значень; це не результат нового чисельного експерименту. Розрахунок показує, що вибраний крок придатний для цього показника в цій контрольній точці [4].

При цьому для падаючого тиску на відстані 2,5 м модель з кроком 5 мм дає 265 кПа для сферичного заряду, тоді як аналітичний орієнтир Кінгері, Балмаш становить 380 кПа. Відносне відхилення — близько 30,3 %. На відстані 1,5 м відповідні значення — 760 кПа і 1143 кПа, що дає близько 33,5 %. Тому показник 4,9 % не описує всю розрахункову область і не підходить як універсальна оцінка точності чисельної моделі. Він стосується відбитого пікового тиску на стінці у цій постановці.

Аналіз впливу форми заряду теж треба проводити локально. На стінці різниця між 998 кПа і 971 кПа складає близько 2,7 % від показника для сферичної форми. На відстані 2,5 м значення 265 кПа і 336 кПа відрізняються приблизно на 26,8 % від показника для сферичної форми. Зближення відбитих піків на вертикальній перешкоді не означає, що форма заряду не впливає на всі точки, які розташовані далі ніж 1,5–2,0 м [4].

Це уточнення не зменшує практичну користь моделювання, а лише визначає її межі. Для оцінки навантаження в конкретній контрольній зоні можна обґрунтувати достатність сітки потрібним показником. Якщо потрібно передбачити просторове поле тиску чи поведінку іншої перешкоди, перевірку треба провести ще раз. У цьому випадку раціональний крок — це компроміс між витратами на обчислення та точністю потрібного результату, а не постійна властивість усіх задач із використанням ALE.

Потрібно окремо виділяти дискретизацію газодинамічної області та дискретизацію елементів світлопрозорої конструкції. Крок, який підходить для розрахунку поширення хвилі та визначення відбитого тиску, може не врахувати тонкі стінки профілю, полімерний прошарок, контакт скла зі штапиком або місцеву роботу кріплення. Тому цю модель у цьому розділі застосовують для розрахунку навантаження, але вона не дає повного уявлення про руйнування віконного блока. Щоб перейти до оцінки пошкоджень, потрібно окремо описати матеріали, контакти та критерії відмови.

Щоб повторити чисельне дослідження, треба зберегти не тільки назву програми і розмір елемента, а й усі початкові дані. Сюди входять геометрія області розрахунку, вибрана двовимірна ідеалізація, матеріальні моделі, граничні умови, координати контрольних точок і параметри запису результатів. Якщо не вказано, чи ця постановка плоска або осесиметрична, позначення «2D ALE» саме по собі не дає чіткого уявлення про фізичний зміст розрахунку [70].

Значення густини, розміри та маса заряду мають відповідати одне одному. Якщо в описі є і номінальна маса, і маса за геометричною моделлю, потрібно пояснити, чим вони відрізняються, а не підміняти ці параметри. Це стосується і властивостей опорної поверхні: матеріальна модель повинна збігатися з тією ідеалізацією, яку прийняли. Числові параметри мають відповідати показникам у розрахунковому файлі; таке узгодження дає змогу відтворити модель, а не обирати значення довільно.

Натурні записи з розділу 3 можна ще раз перевірити, якщо місця реєстрації та параметри навантаження збігаються. Перед оцінкою відхилення треба врахувати різницю між розрахунковою стінкою і реальною будівлею, а також різницю між локальним датчиком і контрольним перерізом моделі. Якщо сигнал втрачено, діапазон вимірювань обмежений або часову історію записано не повністю, це обмежує дані. Не слід компенсувати ці обмеження підбором коефіцієнта [28].

Варто поширювати результати на інші сценарії поступово. Спочатку перевіряють, чи фізична постановка відповідає вимогам. Потім оцінюють чутливість до сітки. Тільки після цього порівнюють прогноз з незалежним вимірюванням. Сценарії з розділу 4, які виходять за межі дослідженої конфігурації, показують, як можна використовувати методику, але не підтверджують робочий діапазон. Чисельна модель може зменшити невизначеність проєкту, але підтверджені висновки залежать від проведених перевірок.

Головний підсумок розділу — обґрунтування вибраного розрахункового підходу з чітко визначеним цільовим показником і межами застосування. Для оцінки відбитого піку на вертикальній стінці у цій конфігурації взяли крок 5 мм як робочий. Міжмодельні розбіжності, локальна залежність результату від дискретизації та різниця між падаючою і відбитою хвилею залишаються окремими важливими факторами. Таке формулювання забезпечує правильний зв’язок між результатами моделювання, натурним експериментом і рекомендаціями для проєктування.

## Висновки до розділу 2

1. Порівняно п’ять аналітичних моделей параметрів повітряної ударної хвилі. Співвідношення найбільшого і найменшого падаючого піка становить 2,91 на відстані 0,5 м, а на відстані 3,0 м — 1,58. Менша розбіжність не показує, що моделі однакові [4].

2. У ANSYS LS-DYNA із застосуванням ALE виконали чисельне моделювання поширення хвилі та її взаємодії з вертикальною перешкодою. Це дозволяє визначити навантаження, але не показує деформацію та руйнування всіх елементів віконного блока.

3. Виявили, що чисельний пік залежить від кроку дискретизації. За кроку 5 мм відбитий пік для сферичного заряду дорівнює 998 кПа, а аналітичний орієнтир — 951 кПа. Відхилення 4,9 % стосується цієї точки, а не всієї похибки моделі [4].

4. Для циліндричного заряду при тому ж кроці відбитий пік дорівнює 971 кПа. Різниця між формами на стінці складає 2,7 %, але в окремих точках траси вона значно більша. Межі спрощення геометрії встановлюють за цільовим показником.

5. Окремо розглянуто міжмодельну розбіжність, вплив дискретизації та порівняння з експериментом. Крок 5 мм підходить для відбитого піка в цій задачі. Для інших геометрій, часових інтегральних параметрів і тонкостінних деталей потрібна додаткова перевірка.

6. Вимоги до відтворюваності обґрунтовані. Треба погодити одиниці, масу, геометрію, матеріальні моделі, граничні умови і точки реєстрації. Порівнювати з натурними записами слід ті ж фізичні величини за зафіксованих умов навантаження.

Отримана розрахункова основа об'єднує робочу модель і межі її застосування. Вона дає змогу розібрати натурні випробування з наступного розділу, але не підміняє експериментальне підтвердження класу стійкості.

# РОЗДІЛ 3
# НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА СТІЙКІСТЬ ДО УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

## 3.1 Обґрунтування вибору методики та критеріїв оцінки

Щоб оцінити вибухостійкість вікон, взяли стандарт [16] і процедурну частину випробувань зі стандарту [18]. Ці стандарти уніфікують класи EXR і дозволяють порівнювати результати з міжнародною практикою (відповідність міжнародним стандартам [52; 78]).

Методика досліджує, як повітряна ударна хвиля від вибуху вибухової речовини на відкритому майданчику впливає на об’єкт. Заряд вибухової речовини розміщують на висоті 500 ± 5 мм над ґрунтом. Є залізобетонна відбивна поверхня. У цій ситуації тиск від вибуху діє на лицьову сторону зразка.

Стандарт визначає порядок і послідовність полігонного випробування. Перевіряють місце впливу, включаючи відсутність видимих залишків вибухової речовини, для додаткового контролю. Це не замінює оцінку параметрів навантаження за інструментальними записами [18].

Ударна хвиля в основному визначає навантаження на будівельні конструкції при вибуху. Щоб з’ясувати, як світлопрозорі огороджувальні конструкції витримують вибухове навантаження, потрібно знати форму кривої ударної хвилі, її параметри та як вона діє на конструкції.

Повітряна ударна хвиля виникає, коли під час детонації вибухової речовини раптово вивільняється багато енергії. Вона рухається в газовому середовищі спочатку швидше за звук. На фронті ударної хвилі тиск, густина і температура повітря різко підвищуються, а потім ці величини поступово повертаються до початкових значень.

Класична часово-тискова характеристика ударної хвилі — це крива надлишкового тиску у часі. Вона складається з двох фаз: позитивної і негативної. У позитивній фазі тиск різко і сильно перевищує атмосферний. У негативній фазі повітря розріджується; ця фаза зазвичай менше руйнує жорсткі конструкції.

Крива ударної хвилі починається, коли фронт хвилі досягає об’єкта. У цій точці фіксують піковий надлишковий тиск. Це основний показник для оцінки миттєвих навантажень на конструкцію. Значення пікового надлишкового тиску часто визначає, чи розіб’ється скло крихко або чи з’являться локальні пошкодження профілю чи вузлів кріплення.

Після досягнення максимального значення тиск зменшується за експоненційним або майже експоненціальним законом протягом позитивної фази. Тривалість цієї фази дуже важлива, бо саме вона визначає час дії навантаження на конструкцію. Для гнучких і відносно легких елементів, таких як світлопрозорі огороджувальні конструкції, навіть короткий вплив високого тиску може призвести до великих деформацій або порушення цілісності.

Позитивна фаза ударної хвилі має інтегральну характеристику, тобто позитивний імпульс. Його визначають як інтеграл надлишкового тиску за час дії цієї фази. Імпульс враховує не тільки максимальний тиск, а й тривалість дії. Через це цей параметр важливий для оцінки динамічної відповіді конструкцій.

У випробуваннях вибухостійкості світлопрозорих конструкцій враховують піковий тиск і позитивний імпульс разом, щоб визначити рівень навантаження та клас вибухостійкості. Причина в тому, що однаковий піковий тиск може діяти різний час у позитивній фазі, і це по-різному впливає на конструкцію.

Форма ударної хвилі залежить від маси вибухівки, відстані до об’єкта, форми вибуху і наявності поверхонь, від яких хвиля може відбитися. Коли вибух стається на землі або має напівсферичну форму, ударна хвиля зустрічає ґрунт чи споруди. У цьому місці виникає відбита хвиля, і тиск зростає.

Відбивний надлишковий тиск особливо небезпечний для світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Він з'являється, коли фронт ударної хвилі стикається з твердою поверхнею фасаду. Відбитий тиск у кілька разів більший за інцидентний і сильно навантажує скло, штапики та монтажний вузол.

Крива ударної хвилі різко асиметрична в часі: тиск на фронті хвилі швидко зростає, а потім повільніше спадає. Таке навантаження дає імпульсну дію, де головну роль відіграють інерційні ефекти. У скляних елементів руйнування відбувається крихкими механізмами. У профільних системах і кріпленнях з’являються пружнопластичні деформації та локальні відмови вузлів. З точки зору динаміки конструкцій, ударна хвиля виступає короткочасним імпульсним навантаженням з широким частотним спектром. Через це реакцію світлопрозорих конструкцій часто визначають не тільки статичною міцністю матеріалів, а й їх динамічними властивостями: жорсткістю, демпфуванням і зв’язком між елементами системи.

Важливим є співвідношення між тривалістю позитивної фази ударної хвилі та власними періодами коливань конструкції. Коли навантаження діє менше часу або стільки ж, скільки власний період коливань, конструкція реагує головним чином як на імпульс. У цьому випадку максимальні деформації можуть сильно відрізнятися від тих, що отримують за квазістатичними розрахунками.

У випробуваннях світлопрозорих огороджувальних конструкцій треба оцінювати вибухостійкість не тільки за граничними значеннями тиску. Слід аналізувати форму кривої ударної хвилі та її інтегральні параметри. Це дає змогу правильно тлумачити результати натурних експериментів і пояснювати різну поведінку конструкцій з подібними геометричними та матеріальними характеристиками.

Отже, крива ударної хвилі описує вибухове навантаження. Її параметри — піковий надлишковий тиск, тривалість позитивної фази та позитивний імпульс — лежать в основі аналізу стійкості світлопрозорих огороджувальних

конструкцій у натурних випробуваннях. Щоб інтерпретувати експериментальні результати та розробити інженерні рішення для підвищення вибухостійкості, потрібно знати фізичну суть цих параметрів.

Взаємодія ударної хвилі зі світлопрозорими огороджувальними конструкціями має складний багатофакторний характер і визначається не лише параметрами самої хвилі, але й конструктивною схемою, матеріальними властивостями та умовами закріплення елементів системи. На відміну від масивних несучих конструкцій, світлопрозорі огороджувальні елементи характеризуються порівняно малою масою, значною площею та наявністю крихких складових, що зумовлює їх підвищену чутливість до імпульсних навантажень.

На першому етапі взаємодії ударної хвилі з СОК головне значення має тиск на лицьовій поверхні з урахуванням відбиття хвилі. Фронт ударної хвилі доходить до конструкції майже одразу, виникає різкий перепад тиску. Це призводить до інерційного прогину скляного елемента у напрямку дії хвилі. У склі з’являються великі згинальні напруження, які можуть перевищувати міцність матеріалу навіть за короткої тривалості позитивної фази.

Подальший перебіг взаємодії залежить від форми кривої ударної хвилі та того, як її параметри співвідносяться з динамічними властивостями конструкції. Для світлопрозорих огороджувальних систем характерний імпульсний режим навантаження, коли тривалість позитивної фази менша або приблизно така сама, як власний період коливань склопакета та рами. У цьому випадку максимальні деформації виникають не тоді, коли тиск досягає піку, а з певним часовим запізненням через інерційні ефекти.

Особливе значення має відбивний надлишковий тиск, який виникає внаслідок взаємодії ударної хвилі з жорсткою поверхнею фасаду або несучої стіни. Відбита хвиля призводить до локального підвищення тиску поблизу поверхні скла, що істотно збільшує навантаження на крайові зони склопакета, штапики та монтажний вузол. Саме в цих зонах найчастіше фіксуються

ініціація тріщин та початкові стадії руйнування.

Руйнування світлопрозорих конструкцій під ударною хвилею відбувається послідовно. Зазвичай спочатку ушкоджуються зовнішні шари скла, які приймають на себе тиск. Якщо немає ламінування чи захисних плівок, скло ламається крихко і з’являються вторинні уламки. У ламінованих склопакетах скло може ламатися, але система залишається цілісною, бо полімерна плівка утримує уламки.

Коли скляні елементи пошкоджуються, навантаження переходить на рамну систему і вузли кріплення. У цей час поєднуються імпульсний тиск і інерційні сили, які виникають через прискорений рух уламків та деформацію елементів. Якщо профільна система недостатньо жорстка, можливі локальні пластичні деформації, розкриття кутових з’єднань або втрата фіксації склопакета.

Монтажний вузол передає зусилля від рами на опорну основу. Його міцність залежить від механічних кріплень, підкладок і стану матеріалу прорізу. Монтажна піна та герметики забезпечують теплоізоляцію і захист, але не замінюють механічне анкерування. Якщо анкер втрачає зчеплення, руйнується або пошкоджується основа, це може призвести до втрати захисної функції всієї системи [6; 12].

Взаємодія кривої ударної хвилі з СОК сильно залежить від форми конструкції та рухомих деталей. Стулки, імпости та штульпові з’єднання створюють додаткові місця концентрації напружень і можуть бути слабкими місцями системи. Під імпульсним навантаженням у цих зонах виникають складні напруження і деформації, які спрощені розрахункові моделі не завжди описують точно.

Важливо, як саме взаємодіють позитивна і негативна фази ударної хвилі. Негативна фаза зазвичай майже не впливає на міцні жорсткі конструкції. Але для світлопрозорих систем вона дає додаткові цикли навантаження і розвантаження. Через це тріщини розкриваються сильніше, а елементи можуть

відшаровуватися. Це особливо стосується конструкцій, які вже частково пошкоджені під час позитивної фази.

З інженерної точки зору, взаємодію кривої ударної хвилі зі світлопрозорими огороджувальними конструкціями треба розглядати як процес динамічної відповіді всієї системи. Не можна правильно оцінити вибухостійкість СОК, якщо розглядати окремо тільки скло, профіль або фурнітуру. Головну роль відіграє їх спільна робота під короткочасним імпульсним навантаженням, форму якого визначає крива ударної хвилі.

Розгляд взаємодії ударної хвилі зі світлопрозорими огороджувальними конструкціями дозволяє обґрунтувати необхідність натурних вибухових випробувань як найбільш репрезентативного методу оцінки вибухостійкості. Отримані теоретичні положення слугують основою для подальшого аналізу експериментальних результатів та інтерпретації відмінностей у поведінці конструкцій різного складу і конструктивного виконання. Вибір методики натурних вибухових випробувань та застосування класифікації EXR у даному дослідженні відповідає сучасним науковим підходам і враховує системний характер роботи світлопрозорих огороджувальних конструкцій в умовах вибухового навантаження.

Також використання стандартів [16; 18] дає змогу правильно порівнювати їх з міжнародними стандартами [52; 78], а отримані результати підходять для сертифікації та проєктування об’єктів цивільної і критичної інфраструктури.

Результати сучасних експериментальних досліджень, проведених у 2023–2024 роках на спеціалізованих полігонах, також підтверджують вибір натурних випробувань як основного способу оцінки вибухостійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій. У цих дослідженнях показали, що під дією ударної хвилі СОК поводяться інакше, ніж це можна було передбачити за спрощеними розрахунками або лабораторними моделями, особливо якщо враховувати взаємодію скла, профілю, фурнітури та

монтажного вузла як однієї системи.

Дослідження показало, що якщо один з вузлів, таких як анкерне кріплення, імпост або кутове з’єднання, виходить з ладу, це може зруйнувати всю конструкцію і призвести до появи вторинних уламків, навіть коли окремі елементи відповідають нормативним вимогам. Тому потрібно використовувати інтегральні критерії оцінки зі стандарту [16] разом з аналізом фактичних механізмів руйнування.

### 3.2 Програма експериментів

Дослідження стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій до ударної хвилі провели у чотирьох серіях тестів. Зразки систематизували за кодами у табл. 3.1. На спеціалізованому полігоні випробували 11 зразків віконних конструкцій. Вони відрізнялись складом скління, профілем, фурнітурою та монтажним стиком.

Випробування провели у профільних установах (випробувальна лабораторія ТОВ «Науково-інженерний центр випробувань виробів та матеріалів захисту»; науково-випробувальний відділ НДЦ НУОУ), дотримуючись техніки безпеки і правильно оформлюючи документи. Виробник виконав монтаж і кріплення згідно з ТУ та національними стандартами. Це потрібно для надійного утримання склопакета.

Кожна серія випробувань мала окремий набір цілей:

Серії 1–3: тестування вікон різного складу, представлених на будівельному ринку України, із глухою частиною та стулкою;

Серія 4: тестування нових експериментальних конфігурацій із урахуванням досвіду попередніх тестів:

- конструкція з двома стулками;
- ПВХ-профіль з алюмінієвою накладкою;
- алюмінієва конструкція зі штульпом.

Структуру експериментальної програми варто показати одночасно за ціллю досліду і за походженням параметрів навантаження. На рис. 3.1 одинадцять зразків поділено на пошукову і кваліфікаційну частини, як у [96], і використано позначення С/М з таблиці 3.2. До пошукової частини входять зразки № 1, 2, 3 і 8; до кваліфікаційної — № 4, 5, 6, 7, 9, 10 і 11. Такий поділ описує функцію і спосіб фіксації результату, а не нові хронологічні серії випробувань.

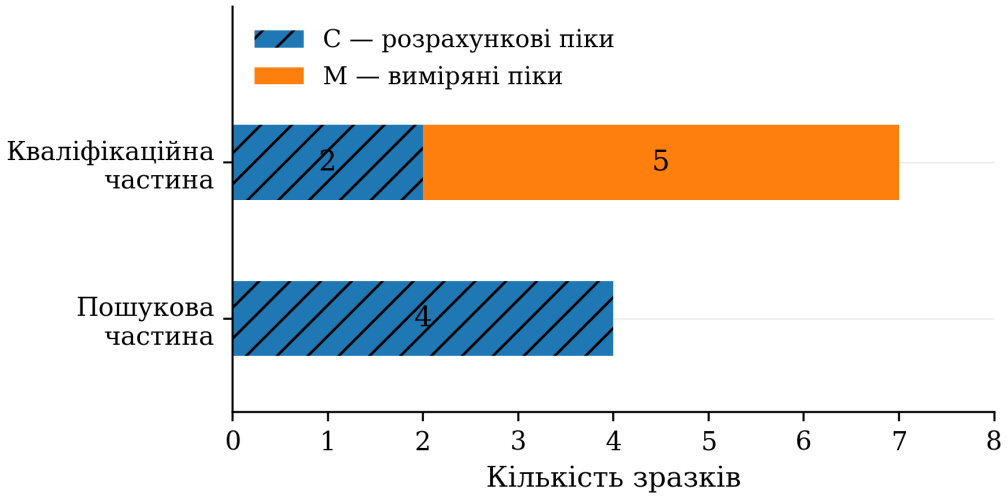



Рисунок 3.1 Розподіл зразків за призначенням досліду та способом визначення пікових параметрів навантаження

У пошуковій частині для чотирьох зразків наведені розрахункові піки. Серед семи кваліфікаційних зразків для п’яти зафіксовано виміряні піки, а для двох — розрахункові або референтні. Таким чином, документований висновок про результат випробування та вказівка на інструментальне походження кожного числового показника є різними характеристиками. Посилання на протокол не перетворює розрахунковий параметр на виміряний. Відсутність виміряного піка у зведеній публікації не скасовує висновку, сформульованого відповідно до процедури випробування [28; 96].

Таке розмежування визначає межі подальшого аналізу. Для опису пошкоджень залучаються всі одинадцять спостережень, для порівняння

виміряних піків використовуються лише п’ять інструментованих дослідів, а для окремого підрахунку кваліфікаційних результатів — сім відповідних зразків. Об’єднання цих множин без зазначення походження даних створює хибне враження однорідної статистичної вибірки. Побудовані діаграми мають описовий характер і не застосовуються для визначення ймовірності відмови конструкцій.

### 3.3 Опис зразків і змінних факторів

Під час полігонних випробувань вивчили поведінку одинадцяти зразків СОК під впливом вибухового навантаження. Це навантаження імітує поширені сценарії атак на цивільну та критичну інфраструктуру. Конструкції перевірили на відповідність вимогам класів EXR за національним стандартом [16] і міжнародними аналогами [52; 53; 69; 78].

Ключові характеристики кожного зразка було систематизовано в Таблиці 3.1 за структурою:

- Конфігурація склопакета (тип та товщина скла, товщина повітряних камер);
- Профіль рами та стулки (марка, матеріал);
- Фурнітура (тип петлевої групи, замикання, обмежувачі);
- Монтажний шов (тип кріплення, ущільнення, стрічки);
- Тип конструкції (глухе, поворотне, двостулкове, штульпове);

Усі зразки були однакового розміру: 1780 × 1460 мм, площа становила 2,6 м².

Випробування проходили на відкритому полігоні, розташованому на території покинутої промислової будівлі з масивними залізобетонними стінами. Такі умови відтворюють реальні ситуації монтажу у житлових і адміністративних будівлях. Віконні зразки монтували у вже наявні прорізи зовнішніх стін, прямо у конструктивну частину стіни.

Умови випробувань і результати зібрано в Таблиці 3.2.

Однакові габарити 1780 × 1460 мм забезпечують порівнюваність загального розміру дослідних блоків, але не означають однакової механічної схеми їх заповнення. Поділ прорізу на глуху частину й стулку, дві стулки з імпостом або штульпову систему змінює розміри окремих полів скління та способи передавання навантаження. Тому при зіставленні зразків необхідно враховувати не лише загальну площу, а й розміри робочих прольотів, положення опор та тип з’єднань. У матриці випробувань ці характеристики потрібно зберігати разом із кодом зразка [28; 96].

Програма не є повним факторним експериментом, оскільки у різних зразках одночасно змінювали профіль, склад склопакета, фурнітуру, конфігурацію та додаткове підсилення. Через це, якщо певна комплектація дала позитивний результат, не можна кількісно відокремити вплив кожного компонента. Щоб перевірити окрему конструктивну гіпотезу, потрібні зіставні зразки, в яких контрольовано змінюють тільки відповідний чинник і забезпечують однакове фактичне навантаження. Наявні результати дають змогу визначити характерні слабкі місця і обрати напрямки для подальших досліджень [96].

Монтаж досліджених зразків відрізнявся залежно від їх комплектації (таблиця 3.1). Для підсилених систем у матеріалах програми подано механічне кріплення турбошурупами 7,5 × 152 мм і анкерними пластинами, а також матеріали для герметизації. Для зразків № 3 і 8 вказано іншу комплектацію монтажного стику. Тому опис комбінованого кріплення не стосується всіх одинадцяти зразків [28; 96].

Вибухівку масою 3 кг (ТНТ) використовували для створення ударної хвилі. Її ставили на пінополістиролове підвищення на контрольних відстанях 5 м або 3 м від зовнішньої площини вікна. Підвищення руйнувалося під час вибуху і не відбивало ударну хвилю.

Два п’єзоелектричні датчики тиску DYTRAN 2300V5 (максимальний

тиск 34474 кПа) встановили в контрольних точках для фіксації параметрів вибуху. З їх допомогою визначали:

- Pso (інцидентний) і Pref (відбивний) тиск;
- тривалість позитивної фази t+, мс;

Тести, під час яких проводили інструментальні вимірювання, у Таблиці 3.2 позначені індексом M (Measurement). Для інших тестів наведені значення, розраховані за емпіричною моделлю Kingery, Bulmash [83; 101], які позначені індексом C (Calculation).

Результати вимірювань відповідають методиці випробування, яку адаптували до вимог [78] і врахували особливості натурного випробування на реальному об’єкті.

### 3.4 Результати випробувань базових конструкцій

Результати випробувань СОК, які витримують ударну хвилю, аналізували з урахуванням вимог і класифікацій із нормативних документів [18; 78], а також міжнародних стандартів [52; 53; 69; 78]. Оцінювання проводили за такими основними критеріями:

- Рівень максимального тиску та імпульсу ударної хвилі, що фіксувалися за допомогою п’єзоелектричних датчиків;
- Ступінь пошкодження елементів конструкції (скло, профіль, імпост, монтажний вузол);
- Наявність та характер вторинних уламків у зоні захисту;
- Збереження цілісності конструкції та функціональності після впливу;
- Відповідність фактичного результату цільовому EXR-класу та вимозі відсутності уламків у зоні захисту (критерій NS).
- Результати кваліфікаційної частини програми оформлено протоколами випробувань. Розрізнення кваліфікаційних і

пошукових дослідів та зв’язок номерів зразків із протоколами наведено в підрозділі 3.6 [31–33; 96].

- Візуальні спостереження та фрактографічний аналіз пошкоджень доповнювали дані, отримані шляхом фотофіксації з високою роздільною здатністю до та після впливу.

Зосередилися на пошуку слабких місць у вузлах конструкцій, які могли стати причиною відмови всієї системи. У таблицях 3.1 — 3.2 наведено інформацію про підтверджений клас стійкості (EXR1, EXR2 тощо), тип профілю, конфігурацію конструкції. Це дає змогу простежити зв’язок між конструктивними рішеннями і стійкістю до вибухового навантаження.

Розрахункові показники (C). У сценаріях без інструментальних вимірювань інцидентний (падаючий) надлишковий тиск Pso (incident/side-on) і позитивний імпульс Iso визначали за емпіричною моделлю Kingery, Bulmash [83; 101] для півсферичного вибуху на поверхні. Позитивний імпульс розраховували за формулою (3.1) як інтегральний параметр позитивної фази.

$$I_{so} = \int_0^{t_+} P(t)dt, \tag{3.1}$$

де $t_+$ — це час, коли триває позитивна фаза.

Значення Pso брали з КВ-поліномів/таблиць для відповідного інтервалу

Для контрольних «еталонних» комбінацій, які відповідають вимогам [16] (EXR1: 3 кг і 5 м; EXR2: 3 кг і 3 м), прийняли референтні значення за [101]: EXR1: Pso ≈ 86 кПа, Iso ≈ 118 кПа·мс; EXR2: Pso ≈ 259 кПа, Iso ≈ 187 кПа·мс. Усі розрахункові значення в таблицях мають індекс C (calculation) і наведені в одиницях SI (кПа, кПа·мс) після округлення до цілих. Для кількісної оцінки невизначеності потрібен окремий бюджет похибок моделі, геометрії та вимірювань. У цьому зіставленні такий бюджет не наведено.

*Таблиця 3.1*

Характеристики випробуваних зразків

Склад склопакетів

| № | Код зразка (ID) | Зовнішнє скло | Зовнішній прошарок | Проміжне скло | Внутр. прошарок | Внутр. скло |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | S1-01_2022 | 4LEF | 14AR | 4LEF | 12AR | 44.4VSG (P4A) |
| 2 | S1-02_2022 | 6LEESG | 12AR | 4LEF | 12AR | 44.4VSG (P4A) |
| 3 | S2-01_2023 | 4LEF | 14AR | 4F | 14AR | 4LEF |
| 4 | S2-02_2023 | 4LEF | 14AR | 4LEF | 12AR | 44.4VSG (P4A) |
| 5 | S3-01_2023 | 6LEF | 14AR | 6LEF | 14AR | 44.4VSG (P4A) |
| 6 | S3-02_2023 | 6LEF | 14AR | 6LEF | 14AR | 44.4VSG (P4A) |
| 7 | S3-03_2023 | 4LEF | 14AR | 4LEF | 12AR | 44.4VSG (P4A) |
| 8 | S4-01_2024 | 4LEF | 14AR | 4F | 14AR | 4LEF+ зах. плівка |
| 9 | S4-02_2024 | 6LEF | 14AR | 6LEF | 14AR | 44.4VSG (P4A) |
| 10 | S4-03_2024 | 4LEF | 14AR | 4LEF | 12AR | 44.4VSG (P4A) |
| 11 | S4-04_2024 | 6LEF | 14AR | 6LEF | 14AR | 44.4VSG (P4A) |

*Продовження таблиці 3.1*

Характеристики випробуваних зразків

Профільна система, тип конструкції, фурнітура та монтажний шов

| № | Код зразка (ID) | Марка профілів Матеріал та товщина профілю | Тип конструк. | Фурнітура | Монтажний шов |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | S1-01_2022 | VEKA MD PVC, 82 мм | 1 стул. + 1 глуха | Winkhaus ActivPilot \| RC2 \| | Ext+Int ME 508 \| Ø7,5×152 турбо-шуруп |
| 2 | S1-02_2022 | VEKA MD PVC, 82 мм | 1 стул. + 1 глуха | Winkhaus ActivPilot \| RC2 \| | Ext+Int ME 508 \| Ø7,5×152 турбо-шуруп |
| 3 | S2-01_2023 | EPSILON MD PVC, 70 мм | 1 стул. + 1 глуха | Axor | PU піна |
| 4 | S2-02_2023 | VEKA MD PVC, 82 мм | 1 стул. + 1 глуха | Winkhaus ActivPilot \| RC2 \| | Ext+Int ME 508 \| Ø7,5×152 турбо-шуруп |
| 5 | S3-01_2023 | Reynaers ML8HI Al, 77 мм | 1 стул. + 1 глуха | SIEGE-NIA | Ext+Int ME 508 |
| 6 | S3-02_2023 | Reynaers Sunrise Al, 77 мм | 1 стул. + 1 глуха | Winkhaus ActivPilot \| RC2 \| | Ext+Int ME 508 \| Ø7,5×152 турбо-шуруп |
| 7 | S3-03_2023 | VEKA MD PVC, 82 мм | 1 стул. + 1 глуха | Winkhaus ActivPilot \| RC2 \| | Ext+Int ME 508 \| Ø7,5×152 турбо-шуруп |
| 8 | S4-01_2024 | EPSILON MD PVC, 70 мм | 1 стул. + 1 глуха | Axor | PU піна |
| 9 | S4-02_2024 | Reynaers Sunrise Al, 77 мм | 1 стул. + 1 стул | Winkhaus ActivPilot \| RC2 \| | Ext+Int ME 508\| Ø7,5×152 турбо-шуруп |
| 10 | S4-03_2024 | VEKA MD PVC, 82 мм, Al накладка | 1 стул. + 1 глуха | Winkhaus ActivPilot \| RC2 \| | Ext+Int ME 508\| Ø7,5×152 турбо-шуруп |
| 11 | S4-04_2024 | Reynaers Sunrise Al, 77 мм | 1 стул + 1 стул (штульп) | Winkhaus ActivPilot \| RC2 \| | Ext+Int ME 508\| Ø7,5×152 турбо-шуруп |

*Таблиця 3.2*

Умови і результати випробувань

Умови навантаження

| № | Відстань до заряду, м | Метод визначення тиску і імпульсу | Пік інцидентного надлишкового тиску, $P_{so}$, кПа | Пік відбивного надлишкового тиску, $P_r$, кПа | Позитивний імпульс інцидентної фази, $I_{so}$, кПа·мс |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | С | 86 | 228 | 118 |
| 2 | 3 | С | 259 | 939 | 187 |
| 3 | 5 | С | 86 | 228 | 118 |
| 4 | 5 | С | 86 | 228 | 118 |
| 5 | 3 | М | 576,3 | 826 | 264,5* |
| 6 | 3 | М | 415,5 | 892,5 | 232,6* |
| 7 | 3 | М | 564,6 | 802,1 | 273,3* |
| 8 | 3 | С | 259 | 939 | 187 |
| 9 | 3 | М | 324 | 1013,1 | 162,6* |
| 10 | 3 | М | 302,9 | 1117,2 | 45,7* |
| 11 | 5 | С | 86 | 228 | 118 |

*Продовження таблиці 3.2*

Умови і результати випробувань

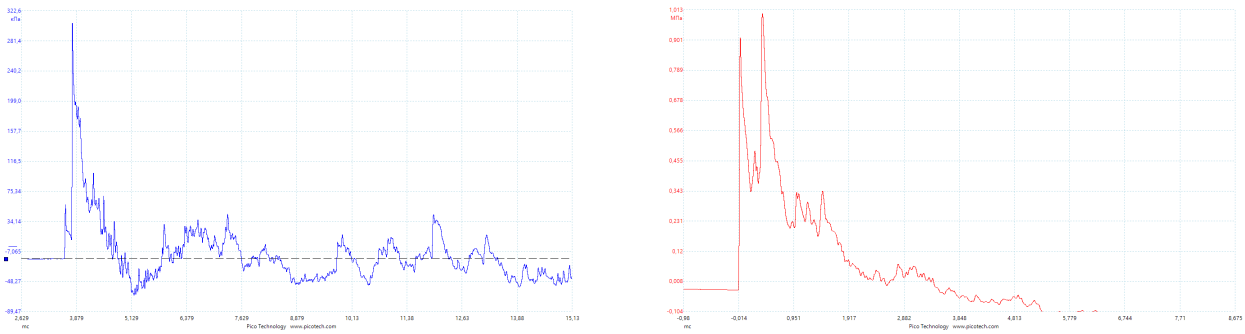
Результати оцінювання та документування

| № | Цільовий клас EXR | Рівень небезпеки | Підсумок | Фактичний результат EXR | Протокол випробування |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | EXR 1 (NS) | PC 1 (No Hazard) | Пройшов | EXR 1 (NS) | - |
| 2 | EXR 2 (NS) | N/A | Ні | FAIL (EXR2 NS) | - |
| 3 | N/A | N/A | Ні | N/A | - |
| 4 | EXR 1 (NS) | PC 1 (No Hazard) | Пройшов | EXR 1 (NS) | [33] |
| 5 | EXR 2 (NS) | PC 1 (No Hazard) | Пройшов | EXR 2 (NS) | [31] |
| 6 | EXR 2 (NS) | PC 1 (No Hazard) | Пройшов | EXR 2 (NS) | [31] |
| 7 | EXR 2 (NS) | N/A | Ні | FAIL (EXR2 NS) | [31] |
| 8 | N/A | N/A | Ні | N/A | - |
| 9 | EXR 2 (NS) | N/A | Ні | FAIL (EXR2 NS) | [32] |
| 10 | EXR 2 (NS) | PC 1 (No Hazard) | Пройшов | EXR 2 (NS) | [32] |
| 11 | EXR 1 (NS) | PC 1 (No Hazard) | Пройшов | EXR 1 (NS) | [32] |

Інструментальні вимірювання (М). У деяких дослідах використали два п’єзоелектричні датчики DYTRAN 2300V5. Одна схема фіксувала відбитий тиск біля жорсткої поверхні в зоні зразка. Друга — падаючий тиск у вільному полі. Потрібно розрізняти схеми side-on і face-on за тим, як чутлива поверхня орієнтована до напряму поширення хвилі. Щоб правильно тлумачити запис, кожен канал треба пов’язати зі схемою розміщення датчиків, а сигнал — з відповідною фізичною величиною. За формулою (2.6) масштабована відстань для прийнятих у роботі комбінацій дорівнює приблизно 2,08 та 3,47 м·кг$^{-1/3}$. Виміряні падаючі й відбиті параметри не замінюють один одного [28; 96].




Рисунок 3.2 Схема встановлення вимірювального обладнання [32]



а) б)

Рисунок 3.3 Графіки змін тиску біля датчиків ДТ№1 (а) і ДТ№2 (б) під час випробування №9 [32]

На рисунку 3.4 для п’яти інструментованих дослідів показано виміряні значення падаючих і відбитих піків з таблиці 3.2. Кожний маркер позначає

окремий зразок, а його форма відповідає опублікованому висновку про EXR2. Точки не з’єднують лінією і не будують для них регресійну залежність. Зразки мають різну комплектацію, а обидві координати визначають навантаження, а не числову оцінку пошкодження. Цей графік не є діаграмою «тиск, імпульс» [28; 96].

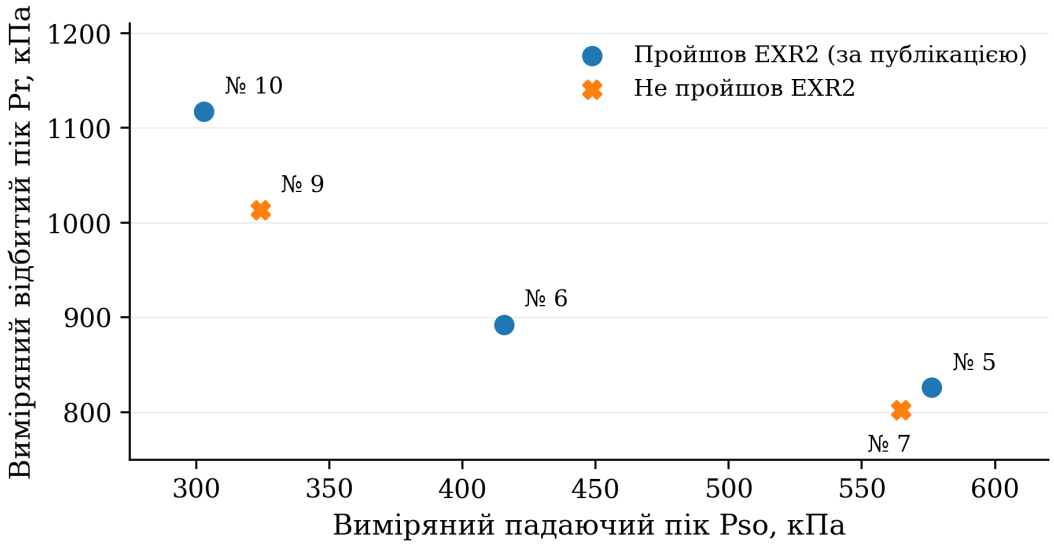



Рисунок 3.4. Виміряні падаючі та відбиті піки для зразків № 5, 6, 7, 9 і 10 з позначенням опублікованого результату

Розташування маркерів показує, що результат випробування не визначається тільки одним піком. Наприклад, у зразків № 5 і 7 падаючі піки схожі — 576,3 та 564,6 кПа, а відбиті — 826,0 та 802,1 кПа, але підсумки відрізняються. Через це конструктивні відмінності між ними треба аналізувати, однак це ще не означає, що часові навантаження однакові; щоб це стверджувати, потрібні однакові імпульси і записи тиску. Також позитивний результат зразка № 10 при відбитому піку 1117,2 кПа не визначає межу стійкості для всіх ПВХ-систем із накладкою [28; 96].

Відношення амплітуди відбитого піка до падаючого не можна прямо використовувати як коефіцієнт нормального відбиття для ідеальної плоскої хвилі. Значення отримані в різних контрольних точках, тому на їх

співвідношення впливають розташування датчиків і особливості місцевих сигналів. Одночасна реєстрація дає ширший опис фактичного впливу і дозволяє перевірити, чи погоджуються канали, а не визначити єдиний множник для всіх експериментів.

Позитивний імпульс інцидентної фази $I_{so}$ у таблиці 3.2 позначено «*» і обчислено за аналітичною формою Фрідлендера (3.2)

$$I_{so} = \kappa \cdot P_{so} \cdot t_{+}; \tag{3.2}$$

де κ - коефіцієнт форми, що приймається κ = 0,30;

$t_{+}$ - те саме, що формулі 3.1, визначалася за сигналом ДТ№2 від моменту приходу фронту до першого перетину нульової лінії; післяінерційні коливання та повільний дрейф базової лінії не враховувалися.

Індекс М вказує на прямо зареєстровані пікові значення тиску, а індекс С — на модельні оцінки. Значення імпульсу зі знаком «*» розрахували з додатковим припущенням про форму сигналу, тому їх треба відрізняти від результатів прямого інтегрування початкового часового запису. Джерело кожного показника потрібно зберегти у зведеній таблиці та враховувати під час порівняння з нормативними вимогами [28].

Щоб перевірити внутрішню узгодженість зведених показників, розрахували умовну часову характеристику $\tau^* = I^*so/Pso$, де зірочка позначає модельно оцінений імпульс. На рисунку 3.5 показані лише дані з виміряним Pso і імпульсом із позначкою «*». Одиниця вимірювання τ* — мілісекунди, але цей показник не дорівнює тривалості позитивної фази. За формулою (3.2) $I^*so = \kappa Pso\ t_{+}$, тому $\tau^* = \kappa t_{+}$ і залежить від припущення про коефіцієнт форми.

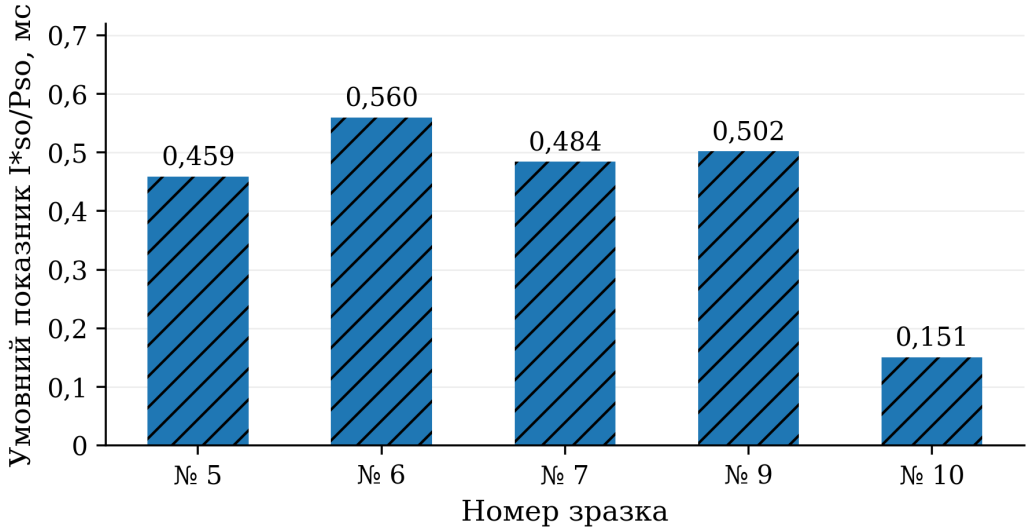



Рисунок 3.5. Умовна часова характеристика τ* = I*so/Pso за зведеними показниками інструментованих дослідів

Для зразків № 5, 6, 7 і 9 отримали відповідно 0,459; 0,560; 0,484 та 0,502 мс, а для зразка № 10 — 0,151 мс. Це значення сильно відрізняється від інших. Потрібно окремо перевірити первинний запис, вибір часових меж, одиниці вимірювання і чи всі параметри належать одному каналу. Таке відхилення показує, що треба перевірити дані. Воно не дає підстав змінювати 45,7 кПа·мс у таблиці або робити висновок про неповну детонацію. Без первинного сигналу не можна точно сказати, чому виникла різниця.

Показаний розкид не можна брати як окремо виміряний розподіл тривалостей або як доказ того, що певний профіль кращий при короткому імпульсі. Імпульс уже розрахований із припущенням про форму сигналу, тому якщо знову брати його співвідношення до піка, це не дає нового незалежного вимірювання. Щоб перевірити далі, варто порівняти модельний I*so з інтегралом надлишкового тиску в тому ж первинному каналі й окремо порахувати відбитий імпульс. До цього моменту похідні показники слід лишати з умовним статусом.

Для кожного зразка після дії ударної хвилі виконували фрактографічний і конструктивний аналіз, щоб визначити характер руйнувань і знайти критичні

зони. Фото деяких зразків до і після тестування наведені на рисунках 3.6 - 3.11.

Типові сценарії ушкоджень сильно відрізнялися залежно від типу скла, профілю, вузлів кріплення та конфігурації віконної системи.

**Скло**

У процесі дослідження було перевірено поведінку різних типів скла у складі склопакетів:

- Флоат-скло продемонструвало характерні радіальні та дугоподібні лінії розломів, які свідчать про крихке руйнування. Часто спостерігалося випадання уламків у напрямку дії ударної хвилі.
- Захисна плівка в нормативних умовах не забезпечує захисту від руйнування та утворення вторинних елементів ураження.
- Загартоване скло (ESG) не дало очікуваних переваг: під час вибухового навантаження воно фрагментувалося на дрібні уламки, які мали потенційно небезпечну кінетичну енергію. Його стійкість виявилась подібною до флоат-скла.
- Ламіноване скло (VSG, типу P4A) показало найбільш передбачувану поведінку. У разі руйнування скло залишалося закріпленим на плівковій основі, зменшуючи ризик травмування. Проте важливо зазначити, що ефективність цього рішення залежить від забезпечення цілісності фіксації скла в рамі.

У цьому випадку потрібно розділяти появу тріщин і втрату здатності утримувати заповнення. Фото розтрісканого ламінованого скла показує пошкодження скляних шарів, але щоб оцінити захищений простір, потрібні також дані про відрив фрагментів, вихід заповнення з фальца і появу наскрізного отвору. Якщо небезпечні уламки не вилітають, це не означає, що немає пошкоджень. Коли скло залишається на прошарку, це не гарантує, що весь скло-полімерний елемент утримується в рамі. Фіксація всіх цих ознак разом дозволяє пов’язати поведінку ламінованого скла з результатом випробування усього блока [28; 96].

Аналіз механізму відмови має враховувати часові обмеження після випробувального огляду. Зламаний кут і пошкоджений анкер можуть вказувати на послідовний перерозподіл зусиль, але фотографія кінцевого стану не дає даних про порядок подій у часі. Тому послідовність руйнування, яку визначають за характером пошкоджень, треба відрізняти від тієї, яку фіксує швидкісне знімання. Це не зменшує інженерну цінність спостережень, але уточнює, наскільки вони підтверджують пояснення механізму.

**Рама та з’єднання**

Критичними точками виявилися кути стулок і рам, особливо в ПВХ-системах без додаткового підсилення. Тут часто фіксувалося локальне відшарування армування, механічна деформація профілю або його повний розрив. У зразках з алюмінієвим профілем ці проблеми не спостерігалися.

У випадку застосування зовнішньої алюмінієвої накладки на ПВХ-профіль фіксувалося значне підвищення стійкості – руйнування профілю не відбувалося навіть за умов досягнення тиску класу EXR2 NS.

**Кріплення імпосту та монтажний вузол віконного блока.**

В конструкціях із комбінованим кріпленням (турбогвинт + анкерна пластина) основними сценаріями руйнування були:

- Руйнування кріплення імпосту;
- Часткове відривання конструкції по монтажному шву;
- Деформація анкерів або втрата зчеплення з несучою конструкцією.
- Зріз анкерного кріплення.



Рисунок 3.6. Віконна конструкція зразка №S2-02_2023 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [33]



Рисунок 3.7. Віконна конструкція зразка №S3-01_2023 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [31]



Рисунок 3.8. Віконна конструкція зразка №S3-02_2023 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [31]



Рисунок 3.9. Віконна конструкція зразка №S4-02_2024 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [32]



Рисунок 3.10. Віконна конструкція зразка №S4-03_2024 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [32]



Рисунок 3.11. Віконна конструкція зразка №S4-04_2024 до (ліворуч) та після (праворуч) випробування [32]

Усі протестовані світлопрозорі конструкції були систематизовані відповідно до отриманих результатів на відповідність класам стійкості до ударної хвилі, згідно з класифікацією EXR (Explosion Resistance Rating), встановленою стандартом [16]. Результати представлені в Таблиці 3.3.

*Таблиця 3.3*

Розподіл результатів випробувань

| Клас стійкості | | Матеріал профілів | | |
|---|---|---|---|---|
| | | PVC, 70-82мм | PVC, 82мм з Al накладкою | Al, 77мм |
| | | Номер тесту | | |
| Без цільового класу | Зруйновані | 3,8 | | |
| EXR1 | Не пройшов | | | |
| | **Пройшов** | **1, 4** | | **11** |
| EXR2 | Не пройшов | 2,7 | | 9 |
| | **Пройшов** | | **10** | **5,6** |

На початковому етапі дослідження (серії випробувань 1–3) основна увага приділялася випробуванням віконних конструкцій на базі ПВХ-профілю. За результатами натурних тестів було встановлено, що такі конструкції, за умови застосування армування та відповідної фурнітури, здатні забезпечити відповідність класу EXR1 NS (без викиду уламків у захищений простір).

Втім, при переході до рівня EXR2 NS, виявилося, що ПВХ-профілі виявляють недостатню стійкість: найчастіше руйнування виникало у зонах кутових з’єднань, що призводило до втрати цілісності конструкції.

Для досягнення вищого класу стійкості були застосовані альтернативні рішення:

- конструкції на базі алюмінієвого профілю, які успішно пройшли випробування на відповідність класу EXR2 NS;

- комбіновані системи, у яких ПВХ-профіль підсилювався зовнішніми алюмінієвими накладками. Це дозволило зберегти економічну ефективність пластикових конструкцій, водночас досягнувши необхідного рівня вибухозахисту.

На завершальному етапі дослідження були випробувані нові конструктивні типи: зразок з двома стулками та алюмінієвий штульповий варіант. Конструкція з двостулковим відкриванням не змогла пройти випробування на EXR2 NS через руйнування зони кріплення імпосту, що потребує подальших інженерних удосконалень. Натомість алюмінієва штульпова система успішно пройшла випробування на рівень EXR1 NS.

Таким чином, групування результатів за EXR-класами дозволило:

- чітко виявити межу ефективності стандартних ПВХ-рішень;
- підтвердити ефективність застосування алюмінієвих систем для підвищення рівня вибухозахисту;
- обґрунтувати доцільність інженерної модифікації конструкцій на основі комбінованих матеріалів.

### 3.5 Класифікація результатів відповідно до міжнародних стандартів

Класифікація результатів випробувань вибухостійкості вікон допомагає визначити, чи відповідають вони міжнародним вимогам безпеки. Через глобалізацію будівельного ринку та участь України в міжнародних організаціях потрібно порівнювати результати з європейськими, американськими та міжнародними стандартами. Це дає змогу уніфікувати підходи, забезпечити безпеку користувачів і впровадити українські нормативи у світову практику.

За результатами проведених експериментів отримано наступні результати:

Зразок вікна №231 відповідає вимогам стандарту [16] щодо тривкості EXR1 (NS).

Зразок вікна №345-В/1 відповідає вимогам стандарту [16] щодо тривкості EXR2 (NS).

Зразок вікна №345-В/2 відповідає вимогам стандарту [16] щодо тривкості EXR2 (NS).

Зразок вікна №345-В/3 не відповідає вимогам стандарту [16] щодо тривкості EXR2 (NS).

Зразок вікна №796-В/1 не відповідає вимогам стандарту [16] щодо тривкості EXR2 (NS).

Зразок вікна №796-В/2 відповідає вимогам стандарту [16] щодо тривкості EXR2 (NS).

Зразок вікна №796-В/3 відповідає вимогам стандарту [16] щодо тривкості EXR2 (NS).

Окреме узагальнення семи кваліфікаційних зразків показано на рис. 3.12. У цей підрахунок не входять чотири пошукові досліди, але їх враховують при аналізі пошкоджень. За матрицею документованих результатів два зразки пройшли випробування на EXR1, три — на EXR2, а два не пройшли випробування на EXR2. Номери зразків розміщені біля стовпчиків, щоб можна було зіставити діаграму з таблицями та описом конструкцій [96].

Підрахунок трьох позитивних і двох негативних результатів на рівні EXR2 не можна перетворювати на оцінку «60 % надійності» виробу. У цих п’яти дослідах випробувано різні комплектації, а не повторні реалізації одного й того самого конструктивного рішення за однакових умов. Зокрема, результати двох алюмінієвих блоків із глухою частиною та стулкою не скасовують негативного результату двостулкового блока іншої конфігурації. Діаграма характеризує обсяг і структуру доказової бази, а не статистичну частоту відмов серійної продукції [96].

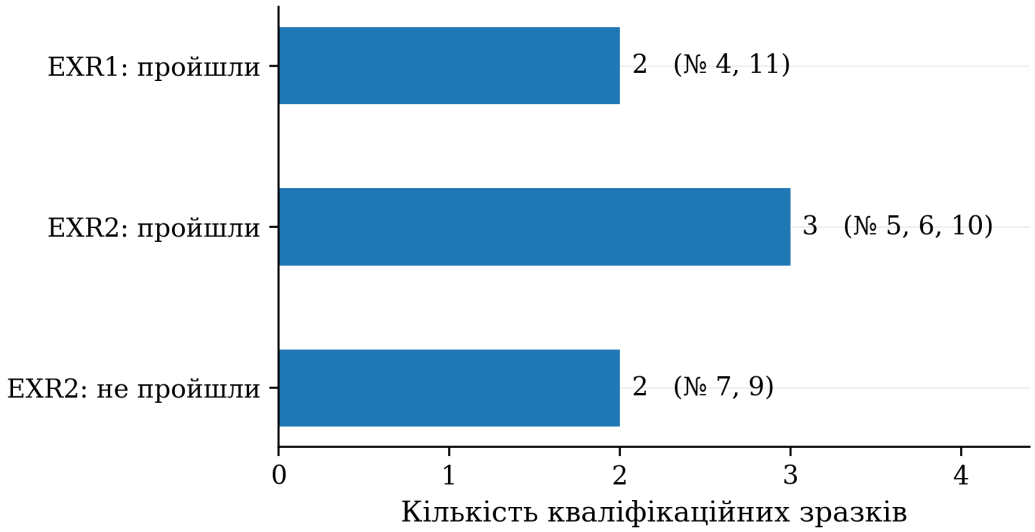



Рисунок 3.12. Описовий розподіл результатів семи кваліфікаційних зразків за цільовими класами EXR

Такий підхід дає змогу визначити, що спочатку потрібно повторно перевірити: відтворити позитивний результат підсиленого ПВХ-блока, потім перевірити вузол імпосту у двостулковій конструкції, а також зібрати дані для штульпової схеми. Для кожного з цих напрямів треба фіксувати повну специфікацію зразка й часові параметри впливу. Це дозволить у майбутніх дослідах перевіряти конкретні гіпотези цієї програми, а не просто збільшувати кількість випробуваних вікон без чіткої мети.

Результати випробувань семи зразків вікон порівняли з вимогами зазначених стандартів.

Аналіз показав, що деякі вікна відповідають рівням EXR1 і EXR2 за стандартом [16]. Це також збігається з міжнародними вимогами [52; 78].

Зразки 231 та 796-В/3 відповідають EXR1 (NS), а зразки 345-В/1, 345-В/2 та 796-В/2 відповідають EXR2 (NS) за наведеними протокольними результатами. Ці висновки стосуються випробуваних комплектних виробів і умов впливу, зазначених у випробуваннях, а не всіх можливих сценаріїв вибуху [96].

Зразки 345-B/3 та 796-B/1 не підтвердили EXR2 (NS). Далі потрібно працювати з критичними вузлами: кутовим з'єднанням, імпостом і кріпленням. Просто збільшити товщину скла недостатньо — це не прибирає відмову цих ланок [96].

Отже, українські випробування виконали за європейським стандартом [16]. Цей стандарт лежить в основі оцінки вибухостійкості вікон.

Порівняння з ISO, ASTM і GSA потрібне для аналізу критеріїв, але не дає автоматичного присвоєння класів іншої системи або відповідності STANAG. У дослідженій програмі результат визначався повною конфігурацією: наприклад, підсилений ПВХ-зразок № 10 з зовнішнім склом 4 мм пройшов випробування EXR2, а двостулковий алюмінієвий зразок № 9 із зовнішнім склом 6 мм цей клас не підтвердив [28; 96].

Отже, отримані результати показують, що українські виробники можуть виготовляти продукцію, яка відповідає міжнародним вимогам вибухостійкості.

### 3.6 Поглиблена інтерпретація експериментальних результатів та межі їх узагальнення

Щоб науково пояснити одинадцять досліджених конструкцій, потрібно розділити пошукові експерименти та випробування, для яких складають окремі протоколи. На пошуковому етапі знаходять слабкі місця та перевіряють технічні припущення; ці дані мають дослідницьку цінність навіть без окремого класифікаційного документа. Дані з протоколу дозволяють зробити висновок про відповідність зразка певному класу. Якщо ці рівні змішати, кількість результатів із документальним підтвердженням зростає без підстав [96].

За цією систематизацією зразки № 1, 2, 3 і 8 потрапили до пошукового етапу, а зразки № 4, 5, 6, 7, 9, 10 і 11 — до протокольно оформленого. З цих семи п'ять зразків входили до цільових класів, а два — ні. Зразки № 4 і 11

віднесли до EXR1 (NS), а № 5, 6 і 10 — до EXR2 (NS). Для № 7 і 9 виявили невідповідність EXR2 (NS). Цей розподіл взяли для подальших узагальнень [28; 96].

Кількість успішних випробувань у неоднорідній програмі не є оцінкою імовірності безвідмовної роботи серійної продукції. Зразки відрізнялися матеріалами, схемою відкривання та рівнем навантаження, а повторні випробування однакових конфігурацій у необхідній для статистичного оцінювання кількості не наведено. Тому співвідношення «п’ять із семи» характеризує склад дослідженої групи, але не відсоток надійності виробника або класу конструкцій. Достовірний висновок тут має конструктивний, а не статистично-прогностичний характер.

Однакові зовнішні габарити дають можливість порівнювати, але різниці все одно залишаються. Площа стулки, глуха частина, спосіб з’єднання імпосту і розташування замикальних елементів впливають на передачу навантаження. Тому матеріал профілю не підходить як єдиний критерій для класифікації. Для кожного результату потрібно зберігати зв’язок з повною специфікацією зразка, а не поширювати його на всі вироби з того ж матеріалу чи під тією ж торговою назвою [28; 96].

Порівняння зразків № 7 і 10 дає найбільш прямий доказ ефекту підсилення ПВХ-конструкції. Профільна система, склад склопакета, фурнітура та схема кріплення в обох зразках однакові (таблиця 3.1); відмінність одна — зовнішня алюмінієва накладка у зразка № 10. Перший зразок не відповідав EXR2 (NS), другий відповідав, причому за більшого виміряного відбитого піка (1117,2 кПа проти 802,1 кПа, таблиця 3.2). Отже, зміну результату пов’язано саме з підсиленням кутової зони. Окремо слід зазначити, що кількісно виділити внесок накладки з-поміж інших чинників за двома дослідами з різним фактичним навантаженням не можна; для цього потрібні парні випробування за однакових умов [28; 96].

Механічна причина відмови непідсиленої конфігурації — це порушення

передавання зусиль у кутовій зоні, де поздовжнє сталеве армування не створює безперервного замкненого елемента. Коли кут розкривається, це змінює роботу прилеглої ділянки рами і кріплень. Якщо відстань рами до опори збільшується, може з’явитися наскрізна щілина навіть тоді, коли ламіноване скло залишається на місці. Тому важливий не тільки опір прямолінійного профілю, а й спільна робота його з’єднань і монтажного вузла [96].

Цей ланцюг відтворили механічно, орієнтуючись на зафіксовані пошкодження. Фотографії до і після випробування показують місця руйнування, але не завжди дають змогу точно визначити порядок окремих відмов. Щоб стверджувати, який елемент зруйнувався першим, потрібно мати швидкісний відеозапис або синхронні вимірювання. Доступні дані дають змогу обґрунтовано визначити критичну зону та взаємозв’язок пошкоджень, а для детальної хронології потрібні додаткові підтвердження.

Результат двостулкового алюмінієвого зразка № 9 показує інший рівень узагальнення. Алюмінієвий профіль не запобіг відмові вузла імпосту, тому позитивні результати зразків № 5 і № 6 не можна переносити на іншу схему відкривання. Також позитивний результат штульпового зразка № 11 стосується EXR1 (NS), а не EXR2 (NS). Ця різниця означає, що потрібно оцінювати конфігурацію конструкції разом із матеріалом профілю [96].

Роль ламінованого скла полягає в тому, що воно утримує уламки після руйнування скляних шарів. Позначення 44.4 вказує на склад ламінату, а P4A — на його класифікаційну властивість за іншим типом випробування. Робота такого заповнення у досліджених вікнах залежала від того, чи зберігалося крайове закріплення. Захисна плівка, наклеєна на готове скло без належного кріплення, не дає такого ж ефекту. Невдалий результат одного плівкового зразка не означає, що всі анкеровані плівкові системи неефективні [13; 96].

Одночасний запис падаючого і відбитого тиску дає більше даних під час натурного випробування, бо описує хвильовий процес двома різними

способами. Перший показує, що відбувається у контрольній точці у вільному полі, другий — як хвиля взаємодіє з поверхнею біля зразка. Два канали не гарантують, що процедура повністю відповідає стандарту. Потрібно знати орієнтацію датчиків, чи пройшли вони калібрування, з якою частотою ведеться запис, чи не було перевантаження і чи можна обробити часові історії [28; 64].

Потрібно описувати положення датчика через розташування його чутливої поверхні відносно напрямку хвилі і навколишніх відбивних поверхонь. Позначка side-on не виключає неоднозначність у геометрії. Якщо текстовий опис і схема установки не збігаються, треба брати трактування каналу з первинних матеріалів досліду. Наприклад, різне співвідношення між виміряними падаючим і відбитим піками може показувати місцеві умови реєстрації. Не варто пояснювати це тільки різницями у конструкціях.

У таблиці результатів потрібно відокремлювати безпосередньо виміряний пік, значення за моделлю та величину, яку отримали з вимірювання з додатковим припущенням. Імпульси, які оцінили за формулою з фіксованим коефіцієнтом форми $\kappa = 0{,}30$, входять до третьої групи. Вони залежать не лише від зареєстрованих піка і тривалості, а й від прийнятої апроксимації. Тому їх не можна подавати як результат прямого інтегрування первинної часової історії або використовувати для підтвердження точності, якої сама процедура не дає.

Потрібно окремо перевірити оцінки падаючого імпульсу 162,6 кПа·мс і 45,7 кПа·мс для зразків № 9 і № 10. У матеріалах дослідження для цього сценарію також вказано мінімальний орієнтир 165 кПа·мс. Це розходження не дає підстав редакційно скасувати результат протоколу, бо вторинну оцінку імпульсу могли отримати іншим методом. Проте без додаткової перевірки не можна стверджувати, що всі параметри навантаження перевищували відповідні орієнтири. Потрібно звірити первинні записи і використану процедуру обробки [7; 28].

Для повторного оброблення треба зберігати вихідний запис і окремо фіксувати корекцію базової лінії, межі інтегрування та використані фільтри. Якщо запис обрізаний, кабель пошкоджений або втрачено частину позитивної фази, імпульс може стати непридатним для визначення, навіть якщо максимум зберігся. У такому випадку відсутню величину позначають як невизначену, а не відновлюють за референтною моделлю без пояснення. Це дає змогу відслідкувати експериментальний результат і перевірити його незалежно.

Перехід на класифікацію за EN 13123-2:2025 вимагає використовувати відбитий питомий імпульс, а не падаючий. Якщо в таблиці є тільки значення падаючого імпульсу, це не підходить. Множити це значення на відношення піків не можна обґрунтувати для всіх випадків. Для нової класифікації треба перевірити обидва параметри саме для відбитої хвилі й застосувати відповідні критерії небезпеки. Тому результати цієї роботи позначені як EXR, доки немає достатньої інформації для нового висновку [62; 64].

Практичні висновки потрібно робити на основі перевірених рішень. Якщо замінити профіль, схему відкривання, спосіб утримання склопакета або опорну основу, основний механізм відмови може бути іншим. Питання повторного випробування треба вирішувати не за схожістю зовнішнього вигляду виробів, а за тим, чи інший у них спосіб передавання навантаження або граничний стан. Чисельний аналіз може підтвердити таке обґрунтування, але має враховувати підтверджені межі застосування.

З точки зору наукової новизни важливо не просто оцінити вплив товщини скла чи матеріалу рами, а визначити критичні конструктивні зони в дослідженій системі й пояснити, як працює конкретне підсилення. Також інструментальний супровід цінний не тільки через використання датчиків, а через те, що дозволяє окремо аналізувати падаюче навантаження і його локальне відбиття. Висновки мають відповідати проведеним дослідам і не замінювати механічний аналіз статистичними твердженнями, яких ця програма не підтвердила.

Отже, експериментальна частина дозволяє вибирати перевірені конфігурації і визначати, як їх можна вдосконалити. Хороші результати не означають, що кожен ПВХ-, алюмінієвий чи ламінований виріб підійде завжди; погані результати не забороняють використовувати ці матеріали після зміни конструкції. Важливими залишаються конкретна специфікація, реальне навантаження, встановлений механізм пошкодження і спосіб підтвердження. На цій основі підготовлено практичні рекомендації для наступного розділу.

## Висновки до розділу 3

1. Одинадцять натурних дослідів розділили на пошукову і кваліфікаційну частини. За опублікованими протокольними даними, п’ять із семи кваліфікаційних зразків відповідають цільовим класам: два — EXR1 (NS), три — EXR2 (NS). Зразки 345-B/3 і 796-B/1 не пройшли [96].

2. Виявили, що з’єднання і монтажний вузол мають ключове значення. У дослідженій ПВХ-конфігурації цілісність кутової зони порушилась, після чого перестало працювати прилегле кріплення. Зразок № 10 із зовнішньою алюмінієвою накладкою показав хороший результат. Це підтверджує, що підсилення цього захисного контуру виправдане для цієї ситуації, але не дає межі, яка підійшла б до всіх ПВХ-систем.

3. Установлено, що товщина зовнішнього скла та матеріал профілю не є самодостатніми предикторами результату. Відмова двостулкового алюмінієвого зразка № 9 у вузлі імпосту та успішне проходження підсиленого зразка № 10 із тоншим зовнішнім склом підтверджують необхідність комплексного оцінювання конфігурації.

4. Внутрішнє ламіноване скло 44.4 VSG утримувало фрагменти за умови збереження крайового закріплення. Цей механізм не слід ототожнювати з дією нанесеної захисної плівки без належного утримання у рамі; P4A стосується іншого виду випробування і самостійно не підтверджує вибухостійкість вікна.

5. Роздільне визначення падаючого та відбитого тисків підвищує інформативність оцінювання навантаження. При цьому розрахункові та апроксимаційні імпульси слід відокремлювати від результатів прямого інтегрування сигналів. Для перенесення результатів на редакцію EN 13123-2:2025 необхідно надати відповідні дані відбитого тиску, відбитого імпульсу та критерії небезпеки; нові класи в межах цього розділу не присвоюються [62; 64].

# РОЗДІЛ 4
# РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІДВИЩЕНОЇ УДАРНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Результати теоретичного аналізу з розділу 1, математичного й чисельного моделювання з розділу 2 та натурних полігонних випробувань з розділу 3 лягли в основу практичних рекомендацій, що є завершальним і прикладним завданням дисертації. У цьому розділі рекомендації згруповано за основними напрямами: конструктивно-технічні пропозиції для учасників будівництва (підрозділ 4.1); пропозиції щодо розвитку національної нормативної бази (підрозділ 4.2); досвід впровадження отриманих результатів у будівництво (підрозділ 4.3); впровадження результатів у методичну літературу та освітній процес (підрозділ 4.4); організаційно-технічне забезпечення відтворення захисних властивостей (підрозділ 4.5).

На зміст підрозділу 4.2 вплинуло те, що в листопаді 2025 року оприлюднили нові редакції європейських стандартів полігонного методу: EN 13123-2:2025 і EN 13124-2:2025, а також стандартів ударної труби EN 13123-1:2025 і EN 13124-1:2025. Ці документи замінили редакції 2004 і 2001 років, на яких базувалися ДСТУ EN, використані в дослідженні, і змінили сам підхід до класифікації вибухостійкості. У цьому розділі подано пропозиції, які спираються на порівняльний аналіз нових і попередніх редакцій та положення документів, наведений у межах цієї роботи. [61–64].

## 4.1 Конструктивно-технічні пропозиції для учасників будівництва

Було визначено, що неможливо забезпечити або оцінити вибухостійкість світлопрозорої огороджувальної конструкції тільки за одним елементом. Склопакет, профільна система, армувальні елементи, фурнітура і монтажний

вузол разом створюють один несучий контур. Через нього динамічне навантаження від ударної хвилі переходить на несучу основу будівлі. Якщо відмовляє будь-яка частина цього контуру, наприклад, зрізається анкер, руйнується кутове з'єднання профілю або порушується кріплення імпосту, конструкція втрачає цілісність навіть тоді, коли інші елементи відповідають вимогам [28; 96].

Тому головна порада для проєктувальників, виробників і монтажних організацій: перейти від вибору окремих «посилених» елементів до проєктування конструкції як єдиної системи. У технічному завданні на вибухостійке вікно треба вказати цільовий клас стійкості для всієї конструкції, тобто для скла, профілю, армування, фурнітури, кріплення, монтажного шва. Якщо клас визначили тільки для скла або тільки для профілю, це не дає уявлення про стійкість всієї системи.

Зразок № 8 показав обмеження підсилення тільки одного елемента. На скло наклеїли захисну плівку, але потрібного кріплення не було, профіль і фурнітура залишилися без підсилення. Зразок зруйнувався. Плівка не втримала скло в рамі, утворився великий уламок із скла та плівки. Цей результат стосується цієї конфігурації. Він не дає підстав заперечувати всі анкеровані плівкові системи. Саме наявність плівки не підтверджує клас вибухостійкості [96].

Для класифікації полігонним методом у цій роботі використовують задокументований результат випробування всієї конструкції. Не можна просто додати характеристики окремих частин і назвати це класом вікна. Розрахунок підходить для інженерного обґрунтування і планування перевірки. Його доказова сила залежить від меж валідації і вимог застосованої процедури. Тому протокол, специфікацію випробуваного виробу і умови монтажу треба розглядати разом [16; 18; 96].

Треба окремо зазначити, що межа цієї системи не збігається з межею віконного блоку. Вона охоплює також монтажний вузол і сам стіновий проріз,

у який встановлено блок. Динамічне навантаження від ударної хвилі передається через анкерні елементи в стіну. Здатність прорізу сприймати ці зусилля входить до захисного контуру. Це потрібно враховувати для правильного використання результатів випробувань, оскільки нова редакція EN 13124-2:2025 чітко обмежує область випробування вікном, рамою та кріпленнями і вказує, що не дає даних про здатність стіни чи конструкції сприймати прямі або передані зусилля. Практичний наслідок цього розглянуто далі в цьому підрозділі [64].

Систематизація натурної програми дає змогу визначити комплектації, які показали позитивний результат у досліджених умовах. Їх подано в таблиці 4.1 у вихідній системі EXR за ДСТУ EN 13123-2:2006. Ці дані не підтверджують повної мінімальності складу чи автоматичної відповідності класам PXR редакції 2025 року. Зразок № 1 входить до пошукової частини. Протокольні результати EXR1 подано для зразків № 4 і 11, EXR2 — для № 5, 6 і 10 [96].

Механічне трактування результатів ПВХ-зразків пов’язане з роботою кутового з’єднання. У зразку № 7 зафіксували пошкодження в кутовій зоні та кріпленні, а також появу щілини між рамою і опорою. Це відповідає критерію втрати цілісності, коли контрольний стрижень діаметром 10 мм проходить через щілину. У зразку № 10 зовнішня алюмінієва накладка змінила поведінку цього контуру, і зразок показав позитивний результат EXR2 (NS). Відтворений ланцюг «порушення кута, зміна роботи кріплення, відхід рами» показує зв’язок ушкоджень. Але для встановлення точної послідовності відмов і впливу накладки потрібна синхронна реєстрація, оскільки реальні навантаження в обох дослідах були різними [28; 96].

*Таблиця 4.1*

Експериментально перевірені комплектації світлопрозорих огороджувальних конструкцій для досягнення класів стійкості (за результатами розділу 3)

| **Елемент конструкції** | **Клас EXR1 (NS) / PXR 3 — підтверджено зразками 1, 4, 11** | **Клас EXR2 (NS) / PXR 4 — підтверджено зразками 5, 6, 10** |
|---|---|---|
| Внутрішнє скло склопакета | ламіноване 44.4 VSG (P4A) — обов'язково | ламіноване 44.4 VSG (P4A) — обов'язково |
| Зовнішнє скло | 4 мм (у складі пакета 43,52 мм) — допустимо | 6 мм (пакет 48 мм); 4 мм — лише за умови підсиленого контуру (зразок 10) |
| Профільна система | ПВХ 82 мм зі сталевим армуванням або алюміній 77 мм | алюміній 77 мм або ПВХ 82 мм із зовнішньою алюмінієвою накладкою |
| Фурнітура | протизламна (RC2), з достатньою кількістю точок замикання | те саме; внесок фурнітури проявляється лише у взаємодії з профілем, армуванням і монтажним вузлом (підрозділ 4.1) |
| Монтажний вузол | комбіноване кріплення: турбошуруп Ø7,5×152 мм + анкерні пластини 1,5 мм; паропроникні стрічки зовні та всередині | те саме, з перевіркою кроку кріплення та опорних підкладок |
| Тип конструкції | глуха частина + стулка з жорстким імпостом; алюмінієва штульпова система (підтверджено одним зразком) | глуха частина + стулка; двостулкова система з імпостом — не пройшла (зразок 9), потребує доопрацювання вузла імпосту |

Джерело: узагальнено особисто за результатами розділу 3. [28; 96].

Ці комплектації підтверджені експериментально тільки для конфігурацій розміром 1780×1460 мм. Для конструкцій з іншими розмірами

чи пропорціями потрібне окреме обґрунтування (див. підрозділ 4.2 про правила поширення результатів).

Коли переносять рекомендовану комплектацію у проєкт, потрібно застосовувати принцип ідентифікації перевіреного варіанта. Треба фіксувати не тільки торговельну назву профілю, а й схему членування блока, розміри полів скління, склад пакета, наявність підсилень, комплектацію фурнітури та спосіб утримання заповнення. Два вироби з однаковою монтажною глибиною профілю можуть мати різні ці характеристики, тому вони не завжди належать до одного й того ж випробуваного типу. Таблиця 4.1 слугує навігацією до перевірених конфігурацій, а не універсальним переліком взаємозамінних складників [28; 96].

Зміни, які здаються неважливими на перший погляд, наприклад, заміна нерухомої частини на стулку, зміщення імпосту, інший спосіб кріплення скла або приєднання накладки, вимагають особливої уваги. Кожна з цих змін може вплинути на шлях передачі навантаження, навіть якщо розміри та основні матеріали не змінюються. До виробничої специфікації потрібно додавати перелік відмінностей від зразка, що пройшов випробування, а також окреме рішення про їх прийнятність. Встановлення «міцнішого» компонента не знімає потреби оцінити зміни у складі всієї системи [66; 96].

Результати випробувань і аналіз нормативних вимог показують, що потрібно уникати деяких рішень і практик, які часто пропонують на ринку для підвищення вибухостійкості, хоча вони самі по собі цього не забезпечують. Загартоване скло (ESG) у вивчених комплектаціях під вибуховим навантаженням не показало очікуваної переваги над флоат-склом і розпалося на дрібні уламки з небезпечною кінетичною енергією. Його не можна вважати основним критерієм вибухозахисту.

Захисна плівка без фіксації скла в рамі, якщо скло тонке або контур менш жорсткий, змінює тип руйнування. Виникає великий і важкий фрагмент зі скла та плівки. Тому її варто використовувати тільки як додатковий елемент

після випробування всієї конструкції.

Не можна поширювати ці результати на всі ПВХ-системи як підтверджене рішення для класу EXR2, навіть якщо в профілях є сталеве армування. Причина конструктивна: армування є тільки на прямолінійних ділянках профілю і не доходить до зварних кутових з'єднань, тому кутові зони рами та стулки у досліджених ПВХ-системах залишаються без підсилення. Саме в цих місцях під навантаженням рівня EXR2 відбувалося руйнування конструкцій на основі армованих ПВХ-профілів. Щоб досягти вищого класу, потрібно підсилити весь несучий контур, зокрема зовнішню алюмінієву накладку, яка закриває кут, або перейти на алюмінієву профільну систему (повну послідовність відмови описано вище).

Монтажна піна, згідно з ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010, служить тільки тепло- та звукоізоляційним шаром монтажного шва. Вона не передає навантаження від віконного блока до стінового прорізу. Для цього використовують тільки механічні кріпильні елементи. Монтаж без механічного кріплення, який ще трапляється на ринку, заборонений. У вибухостійких конструкціях схему, тип і крок механічного кріплення визначають як розрахункові параметри захисної системи (підрозділ 4.1) та записують у протоколі випробування [12].

Аналіз пошкоджень допомагає знайти ділянки, які потрібно перевіряти в першу чергу: це кути ПВХ-рами та стулки, вузол імпосту, анкерування, крайове утримання заповнення, запірні планки та петльові групи. Для цих вузлів треба контролювати геометрію, комплектність і спосіб передавання зусиль. Спостереження про різні пошкодження фурнітури описують їхню якість; вони не дають загального порядку відмов за певного тиску без врахування конфігурації й часу дії навантаження [42; 96].

Монтажний вузол передає зусилля від віконного блока до опорної основи. Специфікація випробуваного рішення має містити його геометрію, механічні кріплення і умови спирання. Під час монтажу на об’єкті потрібно

виконати цю специфікацію, перевірити приховані роботи і перевірити, чи матеріал прорізу підходить для анкерування. Теплоізоляційні та герметизувальні матеріали не виконують функцію несучих кріплень. Підготовка виконавців і фіксація контролю монтажу допомагають забезпечити відповідність [6; 12; 64].

Далі монтажний вузол переходить у стіновий проріз, який сприймає передане навантаження. Анкерне кріплення передає зусилля прямо в стіну, тому фактична вибухостійкість конструкції залежить від того, чи може проріз витримати ці зусилля. Це визначають матеріал і товщина стіни, стан укосів, наявність зон послаблення. Це має два практичні наслідки. Перше: натурне випробування показує реальний результат тільки тоді, коли зразок встановлюють у проріз, що відтворює справжні умови спирання. Так проводили випробування в розділі 3 (зразки монтували у прорізи зовнішніх стін масивної залізобетонної будівлі), і цю вимогу треба закріпити у нормативних документах (підрозділ 4.2). Друге: клас стійкості, підтверджений випробуванням, не переходить автоматично на об'єкт, якщо проріз не може сприйняти передані зусилля. Нова редакція EN 13124-2:2025 прямо вказує, що не оцінює здатності навколишньої стіни. Тому для об'єктів із вибухостійкими конструкціями перевірка несучої здатності прорізу та вузла анкерування (особливо для стін із газобетону, тонкої цегляної кладки або з пошкодженнями) є окремою обов'язковою проєктною задачею. Наявність сертифіката на вікно цю задачу не скасовує. Це треба враховувати і в проєктних рішеннях, і в національному додатку до гармонізованих стандартів. [12; 64].

Необхідність окремого обґрунтування для іншого розміру видно на прикладі геометрично подібних прямокутних блоків. Коли обидва лінійні розміри змінюються одночасно у $\lambda$ разів, площа A збільшується у $\lambda^2$ разів, а довжина зовнішнього опорного контуру L — у $\lambda$ разів. Якщо умовний рівномірний тиск p залишається однаковим, результуюче навантаження $F = pA$

також змінюється як $\lambda^2$, а середнє навантаження на одиницю зовнішнього контуру $\bar{q} = F/L$ — як $\lambda$. На рис. 4.1 показано ці геометричні співвідношення без урахування динамічного впливу.

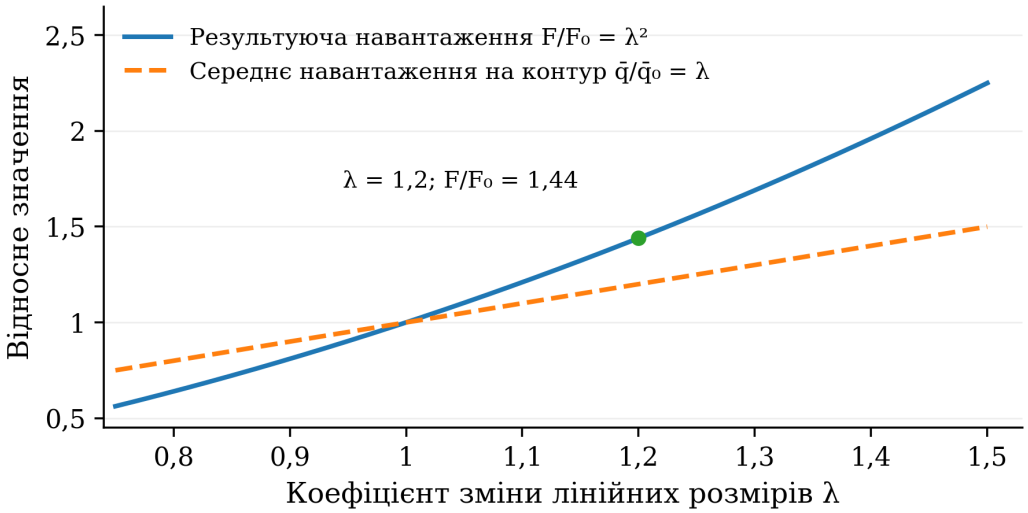



Рисунок 4.1. Умовна зміна результуючого навантаження та його середнього значення на зовнішньому опорному контурі при масштабуванні блока

Наприклад, якщо обидва лінійні розміри збільшити на 20 %, площа та умовна результативна величина зростають на 44 %, а середнє навантаження на одиницю контуру — на 20 %. Якщо розміри збільшити у 1,5 раза, ці показники дорівнюють 2,25 та 1,50. Навіть така проста оцінка показує, що якщо зберегти матеріали та загальний принцип монтажу, навантаження на систему кріплень усе одно змінюється. Це також пояснює, чому потрібно фіксувати розміри, для яких отримано випробувальний результат.

Середнє $\bar{q}$ не показує максимальну реакцію окремого анкера. Реальний розподіл залежить від жорсткості рами й опор, розташування кріплень, деформації стулок, імпостів і заповнення, а також від часу. Коли змінюються розміри, змінюються й динамічні характеристики блока. Тому ці криві не визначають крок анкерування, допустиму несучу здатність або нормативну область поширення класу. Вони потрібні, щоб показати причину окремої перевірки зміненого габариту та зв’язку «рама, кріплення, несуча

основа» [12; 66].

Вимоги до світлопрозорих конструкцій варто розділяти за сценарієм навантаження, допустимою небезпекою для людей і функціями будівлі. Призначення будівлі саме по собі не визначає клас PXR чи VXR. Для відповідальних об’єктів потрібне окреме інженерне обґрунтування. У будівлях із постійним перебуванням людей головне — обмежити небезпеку від вторинних фрагментів. Запропонована диференціація визначає напрям для розвитку вимог, а не встановлює обов’язковий клас для всіх будівель певного типу [7; 62].

Для попереднього розрахунку навантаження можна використати аналітичну модель Кінгері, Балмаша у її базовому вигляді. Чисельний розрахунок дає змогу уточнити вплив перешкод у межах перевіреної моделі. У розділі 2 крок 5 мм показав відхилення приблизно 4,9 % для відбитого піка на вертикальній стінці щодо аналітичного орієнтира, а не щодо незалежного експерименту. Такий крок не дає універсальної точності просторового поля і не підходить як готове правило для дискретизації тонких деталей вікна. Також не варто поширювати збіг результатів сферичної та циліндричної форм на стінці на всі точки траси [4; 83].

Одночасна реєстрація падаючого тиску у вільному полі і відбитого тиску біля зразка дає змогу окремо описати хвилю і її місцеву взаємодію з перешкодою. Така схема дає додаткову інформацію про фактичний вплив, але сама не визначає масу заряду чи чинність всієї процедури. Для такого висновку потрібні точні калібрування, правильна геометрія датчиків, повні часові записи і перевірка відповідних критеріїв. Оцінювання за редакцією 2025 року вимагає також врахування відбитого питомого імпульсу [28; 62; 64].

У проєктній документації треба окремо вказувати локальні вимірювання і розподілене навантаження на площину вікна. Пікове значення, яке фіксує один датчик біля прорізу, не показує тиск у всіх точках заповнення одночасно. Помножити це значення на всю площу можна тільки у випадку, коли це

спрощення явно прийнято; такий підхід не дає часової реакції кожного кріплення окремо. Для точнішого аналізу треба узгодити просторовий розподіл навантаження, умови опирання і механічну модель конструкції [4; 66].

Розрахунковий супровід варто оформляти так, щоб з кожної рекомендації можна було перейти до її вихідних даних. Для локального результату на стінці вказують контрольну точку і крок сітки. Для випробуваного блока пишуть код зразка і специфікацію. Для нормативного зіставлення зазначають редакцію документа і перевірені показники. Це допомагає уникнути непомітної зміни змісту твердження, коли, наприклад, відхилення одного відбитого піка на 4,9 % починають подавати як точність розрахунку всієї конструкції чи всіх можливих сценаріїв [4; 96].

### 4.2 Пропозиції щодо розвитку національної нормативної бази

У листопаді 2025 року CEN опублікував нові версії стандартів полігонного методу: EN13123-2:2025 (вимоги та класифікація) і EN 13124-2:2025 (метод випробування). Їх затвердили 29 вересня 2025 року, підготував технічний комітет CEN/TC 33. За Внутрішнім регламентом CEN-CENELEC національні члени мають зробити ці документи національними стандартами, а чинні суперечливі національні стандарти мають скасувати до травня 2026 року. Так само оновили стандарти ударної труби: EN 13123-1:2025 та EN 13124-1:2025. [61–64].

Натурну програму цієї дисертації виконали за ДСТУ EN 13123-2:2006 і ДСТУ EN 13124-2:2006, які повністю збігаються з відповідними версіями EN 2004 року. Після оновлення європейських документів потрібно перевірити, чи можна й далі використовувати ці результати. Коли CEN ухвалює нову редакцію, це не означає, що національний ДСТУ в Україні одразу змінює свій статус або що раніше виданий протокол автоматично скасовується. Статус

національного документа визначає відповідний орган стандартизації, а прийнятність певного результату залежить від обраної процедури [16; 18; 62; 64].

Потрібно прийняти EN 13123-1:2025, EN 13123-2:2025, EN 13124-1:2025 та EN 13124-2:2025 як національні стандарти. Найкраще це зробити перекладом; підтвердження тут не підходить з двох причин. Перша — у редакції 2006 року є термінологічні помилки, які треба виправити: англійський range test переклали як «діапазон випробування», хоча має бути «полігонне випробування», англійський shutters — як «жалюзі», а правильно — «віконниці». Друга — у нових редакціях з'являються поняття, для яких потрібна стала українська термінологія: «навісний фасад» (curtain walling), «атакована та тильна поверхня», «контрольна панель» (witness panel), «внутрішній та зовнішній клас небезпеки». В Україні ці стандарти приймає технічний комітет стандартизації ТК 300 «Двері та вікна», а фінансування забезпечує галузева асоціація, яка має досвід оплати впровадження європейських стандартів як національних. [62; 64].

Порівняльний аналіз редакцій 2004 і 2025 років, виконаний у цій роботі, показав, що редакція 2025 року повністю змінює методологію оцінювання. Для нормативного застосування найважливішими є такі зміни. [62; 64].

По-перше, для класифікації навантаження використали виміряні піковий позитивний відбитий тиск і відбитий питомий імпульс. У редакції EN 13123-2:2025 є родини PXR і VXR, а також класи користувача PXRU та VXRU. Класифікацію треба визначати за всіма параметрами відповідного класу, а не лише за номінальною масою чи окремим піком. Схожість структури класифікацій у різних нормативних системах не дає підстав автоматично переносити результат [62].

По-друге, фактично зареєстроване навантаження потрібно для класифікаційного висновку. Вимірювальні канали мають точно визначати пік і питомий імпульс. Кількість і розташування датчиків, частоту запису,

калібрування та правила обробки треба встановлювати за повним текстом обраного процедурного стандарту і зазначати у програмі випробування. Припущення щодо форми хвилі не заміняє потрібного первинного запису [62; 64].

По-третє, клас навантаження розглядають разом із класом небезпеки результату. Це розділяє інтенсивність впливу та наслідки для захищеного простору. Старі позначення S/NS і нові показники небезпеки потрібно порівнювати за встановленими правилами та фактичними документованими пошкодженнями. Збереження рами або руйнування скла самі по собі не визначають повного нового класифікаційного позначення [62; 64].

По-четверте, тепер це стосується елементів навісних фасадів разом з рамами, заповненнями і кріпленнями.

Методичний зв’язок проведених дослідів із новою редакцією полягає в тому, що фактичні параметри хвилі використовували разом із номінальним сценарієм уже в програмі 2023–2024 років, тобто до оприлюднення редакції 2025 року, яка закріпила саме такий підхід. Інструментальні вимірювання виконано не в усіх одинадцяти дослідах, а в частині з них, тому розвиток методики треба пов’язувати з окремим аналізом виміряних і розрахованих величин та збереженням первинних сигналів [28; 62; 96].

Логіку одночасної перевірки тиску та імпульсу можна подати у нормованих координатах без визначення конкретного класу. На рисунку 4.2 показано співвідношення Pr/Pr,min та Ir/Ir,min до умовних мінімальних меж. Точки A, B, C і D — це спеціально підібрані приклади для пояснення, а не результати експериментів. Область праворуч і вище від одиничних меж показує, що виконано тільки дві потрібні нижні умови. Тут не враховано верхні допуски, часову форму навантаження, монтаж і критерії небезпеки [62; 64].

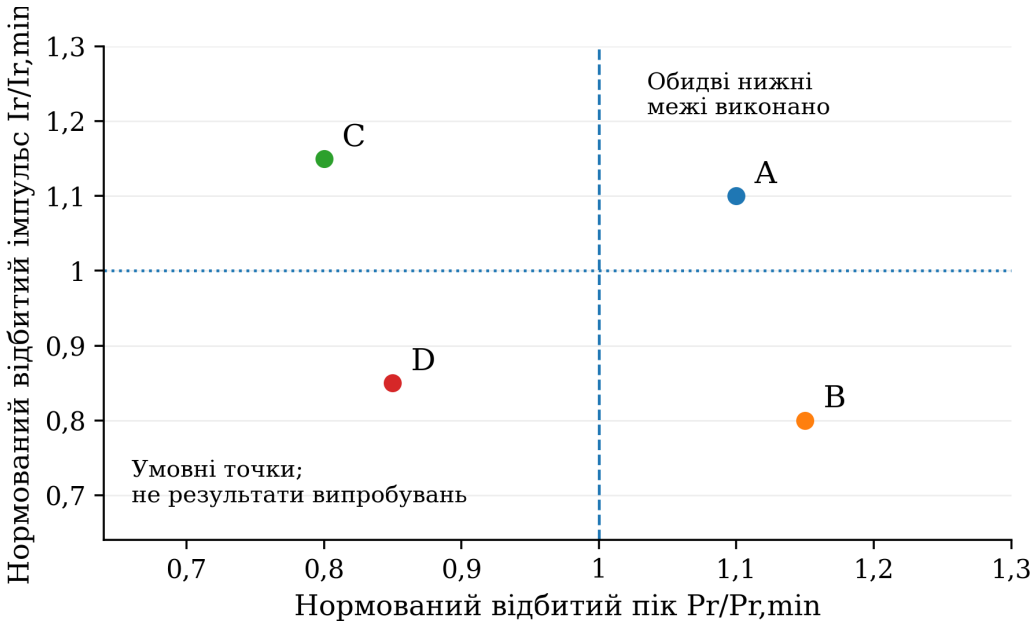



Рисунок 4.2. Методична ілюстрація спільної перевірки нижніх меж відбитого піка та відбитого питомого імпульсу

Для умовної точки A обидва відношення дорівнюють 1,10, тому дві нижні умови виконані. Для B відношення тиску 1,15, а імпульсу тільки 0,80. Для C навпаки: тиск 0,80, імпульс 1,15. Точка D з координатами 0,85; 0,85 не доходить до жодної нижньої межі. Приклад показує, що якщо методика ставить окремі вимоги до кожної величини, то перевищення одного показника не компенсує недостатнє значення іншого.

Навіть пункт A не дозволяє написати «випробування пройдено». Після навантаження потрібно оцінити допустимі відхилення, чи підходить вимірювальна схема та які реальні наслідки для зразка і захищеного простору. У технічному висновку слід окремо вказати як мінімум два рішення: чи правильно визначили й зафіксували потрібний вплив та чи конструкція відповідає результату за такого впливу. Це робить процедуру прозорою і не дає підмінити оцінку небезпеки перевіркою тільки одного числового порога [62; 64].

Порівняння отриманих результатів із новою класифікацією показує, що формальної зміни позначень недостатньо. Виміряні відбиті піки для дослідів

на відстані 3 м лежать у межах 802–1117 кПа; серед цих зразків є як позитивні, так і негативні результати. Для відстані 5 м у таблиці наведено розрахований, а не виміряний відбитий пік 228 кПа. Тому перевищення певного порога тиску або недосяжність цього рівня за розрахунком самі по собі не визначають новий клас. Потрібно перевірити відбитий імпульс, критерії небезпеки та чи достатньо первинної документації. Поки такої перевірки не проведено, початкові результати залишають позначення EXR [28; 62; 96].

Щоб порівнювати результати розділу 3 ретроспективно, спочатку потрібно перевірити кожен рядок, а не дивитися на таблицю заміни позначень. Для тиску слід з’ясувати, чи його виміряли чи розрахували, і чи це падаючий або відбитий тиск. Для імпульсу треба дізнатися, чи його отримали прямим інтегруванням потрібного каналу, чи оцінили за припущеною формою. Значення I*so з таблиці 3.2 не можна використовувати для вимоги до Ir лише через те, що одиниці однакові — кПа·мс. Похідна діаграма τ* у розділі 3 показує, де треба перевірити, але не підміняє собою вихідні часові записи [28; 96].

Якщо потрібного параметра немає, у звіті аудиту пишуть «недостатньо даних для такого зіставлення». Не ставлять нуль і не дають випадкову оцінку. Далі окремо вирішують, чи можна отримати параметр, якщо ще раз обробити збережений сигнал, або чи треба провести нове випробування. Раніше опублікований висновок EXR залишають з посиланням на використану процедуру. Так можна використовувати попередні дослідження, не розширюючи їх нормативний статус без підстав [62; 64; 96].

Треба створити національні рекомендації для використання нових редакцій, які уточнять порядок документування монтажу, перевірки основи та пояснення поширення результатів. Форму документа потрібно узгодити з правилами національної стандартизації. Додаткові технічні вимоги не можна подавати як дослівний переклад EN, якщо вони змінюють зміст. Авторські пропозиції треба чітко відділяти від вимог європейського документа [62; 64].

1. Кількість зразків. Щоб перевірити, чи серійне рішення дає однакові результати, потрібно кілька разів випробовувати однакову комплектацію за подібного навантаження. Скільки разів повторювати і за яким правилом приймати рішення, визначають за обраною процедурою та ціллю програми. Два негативні результати серед семи у протоколі з різними конфігураціями у розділі 3 не показують частку браку однорідної продукції. Вони вказують на конструктивні відмінності, але не замінюють окреме дослідження повторюваності [96].

2. Правила поширення результатів. Стандарт дає лабораторіям право самостійно обирати спосіб поширення результатів і не прописує вимоги до розмірів, пропорцій або зміни комплектації. Національний додаток має вказати референтний зразок і встановити межі зміни розмірів, за яких результат залишається дійсним. Для штульпових і двостулкових систем слід зробити окреме застереження, оскільки їх чутливість до конфігурації розглянута в розділі 3.

3. Опис навантаження. Треба зберігати повну часову історію тиску й записувати тривалість позитивної фази разом із піком і питомим імпульсом. Так можна оцінити, як форма навантаження впливає на динамічну відповідь системи, і ще раз опрацювати дані за новою процедурою. Для окремих конструкцій додаткове нормування тривалості треба підтверджувати розрахунками та експериментами; у цій роботі це розглядають як напрямок для подальшого розвитку методики [28; 62].

4. Позначення класів у технічних документах. Рівні навантаження порівнюють за піком відбитого тиску і відбитим питомим імпульсом. Якщо один із цих показників зростає, а інший зменшується, такі впливи не можна впорядкувати лише за номером класу. У технічному завданні треба вказати конкретний клас або обидва параметри разом і допустиму небезпеку. Щоб поширити результат на менше навантаження, перевіряють обидва значення і звертаються до відповідного пункту стандарту [62].

5. Монтаж зразка та стіновий проріз. Гармонізований стандарт не перевіряє, чи може стіна витримати передані зусилля. Тому національний додаток має вимагати, щоб зразок ставили у проріз, який відповідає реальній опорній основі. У протоколі потрібно вказати матеріал стіни, тип і крок анкерування. Результат випробування стосується тільки таких самих умов спирання. Також у будівельних нормах треба окремо передбачити перевірку несучої здатності прорізу та вузла анкерування під час проєктування, бо цю частину захисного контуру не перевіряють під час випробування вікна.

Вимірювальна система має фіксувати очікувані піки без насичення і давати таку часову роздільність, щоб можна було визначити імпульс. Діапазон датчика, калібрування, частоту запису і розміщення узгоджують із затвердженою програмою випробування. Прилади, в яких сигнал перевантажений або обрізаний, не дають підстав для класифікації. Якщо прогноз і запис різняться, треба перевірити первинні дані, а не змінювати умови впливу без підстав [28; 64].

Зменшити ризик від вторинних фрагментів — окреме завдання пасивного захисту будівлі. Це важливо для приміщень, де люди перебувають постійно. Тут не допоможе можливість швидко змінити конфігурацію вікна під час загрози. Вибухостійке скління тут працює разом з укриттями та іншими захисними засобами, але не може їх повністю замінити. У цій дисертації не підраховували кількість випадків травм у цьому контексті [7; 96].

Слід оцінювати нормативну пропозицію за тим, чи можна її реально виконати: чи існують підтверджені конструктивні рішення, чи є фахівці, які проведуть випробування, чи налагоджений виробничий контроль і правильний монтаж. Якщо вимогу встановити без цих умов, це не забезпечить потрібного захисту об’єкта. Спочатку треба перевірити технічну й економічну можливість виконання, і тільки після цього встановлювати загальні вимоги для великої групи будівель.

Через це пропонують змінити відповідні державні будівельні норми. У

проєктах мають обов'язково застосовувати світлопрозорі огороджувальні конструкції з підтвердженим класом вибухостійкості за дворівневим принципом:

- базова вимога для закладів освіти, медичних закладів та приміщень з великою кількістю людей: встановити обмеження на утворення вторинних фрагментів, забезпечити міцне кріплення скла по краях і механічне кріплення всієї системи. Для експериментів можна використати перевірені конфігурації EXR1 (NS) без автоматичного переходу до PXR 3/B; конкретний рівень навантаження визначають окремо [62; 96].

- підвищений напрям для відповідальних об’єктів: призначають навантаження за проєктним сценарієм, оцінюють допустиму небезпеку і спільну роботу вікна з опорною основою. Вибір між фіксованими класами та класами користувача залежить від пари тиск, імпульс, а не тільки від категорії будівлі [7; 62].

Пропозиції можна враховувати під час перегляду вимог до закладів освіти, лікарень, громадських будівель і захисних споруд. Треба вказувати конкретні документи та їх версії за офіційними реєстрами на дату підготовки нормативної пропозиції. Окремо ведуть роботу з узгодження термінів і показників вибухостійких світлопрозорих виробів у технічній документації та під час закупівель. Така уніфікація спрощує чітке визначення навантаження, допустимої небезпеки і меж застосування результату, але не скасовує його протокольне підтвердження.

Потрібно чітко вказати, де застосовують запропоновані заходи, щоб не виникло неправильних уявлень. Клас вибухостійкості показує, як конструкція витримує повітряну ударну хвилю. Він не захищає від прямого влучання боєприпасу чи уламків; ці питання регулюють інші стандарти. Термобаричні бойові частини створюють інше навантаження. Вибухостійке скління лише доповнює систему укриття, але не замінює її. Тому пропозицію подали як спосіб знизити рівень небезпеки для людей (класи небезпеки A–F) без гарантії,

що сама конструкція залишиться цілою.

Класи користувача PXRU і VXRU вже описані в EN 13123-2:2025 для навантажень, які задає користувач. На етапі національної адаптації потрібно розглянути сценарії, які не входять до цих класів, зокрема інтервал 20–100 кг, який у цій роботі запропоновано для прийнятої моделі еквівалентного джерела. Цей інтервал не збігається з масою бойової частини: маса конструкції, маса вибухової речовини і тротиловий еквівалент — це різні показники. Для кожного сценарію потрібно обґрунтувати навантаження на огородження за тиском і імпульсом та перевірити, чи підходить модель. У цій роботі пропонується систематизувати національні сценарії та процедуру їх підтвердження з використанням передбачених стандартом позначень PXRU/VXRU, без запровадження нових позначень класів. Дослідження заряду 3 кг не підтверджує автоматично весь зазначений діапазон [4; 62; 83].

Чисельне моделювання варто використовувати як додаток до натурної перевірки, якщо виконані та задокументовані верифікація і валідація. Щоб обґрунтувати поширення результатів, потрібно описати геометрію і матеріали, провести аналіз сіткової чутливості, визначити моделі контактів і критерії пошкодження. Перевірки сітки тільки за газодинамічним піком недостатньо для обґрунтування моделі віконного блока. Окрема національна настанова може встановлювати мінімальні вимоги до розрахункової документації, але це не робить розрахунок універсальною заміною випробування [4; 64; 70].

### 4.3 Досвід запровадження результатів дослідження у будівництво

Упровадження результатів підтверджено довідками трьох підприємств, що представляють різні ланки захисного контуру: виробника комплектних конструкцій ТОВ «Компанія Вікна-Стар», виробника склопакетів ТОВ «Глас Трьош Київ» та постачальника фурнітурних рішень ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА». Довідки підтверджують використання результатів у відповідних

видах діяльності; вони не замінюють протоколів випробування [42–44].

Результати дослідження використали у виробництві ТОВ «Компанія Вікна-Стар» (м. Київ), це підприємство виготовило і встановило зразки для натурних випробувань розділу 3. За протоколом № 4317/2023 випробували вікно, яке надало саме це підприємство. У роботу підприємства впровадили: [44] (додаток А).

конструктивні рішення вибухостійких віконних конструкцій за підрозділом 4.1: склопакети з внутрішнім ламінованим склом класу Р4А, алюмінієві профільні системи, ПВХ-системи зі сталевим армуванням і зовнішнім алюмінієвим підсиленням, протизламна фурнітура з потрібною кількістю точок замикання;

технологія монтажу як частина захисної системи: поєднання механічного кріплення турбошурупами і анкерними пластинами, перевірка стану стінового прорізу й анкерних вузлів, облаштування монтажного шва з паропроникними стрічками;

порядок підтвердження класу стійкості протоколом натурного випробування комплектної конструкції (підрозділ 4.1).

Конструкції цих типів виготовили та встановили, зокрема, на об'єктах критичної інфраструктури. На рисунку 4.3 показано конструкції, змонтовані на одному з таких об'єктів, які зроблені з алюмінієвої профільної системи та закріплені анкерними пластинами до сталевих елементів прорізу. Це приклад практичного використання одержаних результатів. Щоб підтвердити відповідність вузла на об’єкті випробуваній специфікації, потрібно перевірити виконавчу документацію. З міркувань безпеки на фотографіях приховали ідентифікуючі елементи об'єкта, як і в усіх матеріалах з об'єктів критичної інфраструктури в цій роботі [44].



*а* *б*

Рисунок 4.3 — Світлопрозорі конструкції на основі алюмінієвої профільної системи, встановлені на об’єкті критичної інфраструктури: а — загальний вигляд з боку приміщення; б — вузол механічного кріплення анкерними пластинами (фото автора; ідентифікувальні елементи об’єкта приховано)

ТОВ «Глас Трьош Київ» у довідці від 13.10.2026 № 35 підтвердило, що результати використали під час проєктування і виготовлення склопакетів підвищеної стійкості. Підприємство врахувало роль внутрішнього ламінованого скла 44.4 класу Р4А, комплектацію зовнішніх шарів і конструктивне утримання заповнення. Рекомендації щодо загартованого скла та плівок застосували в межах комплектної системи. Довідка показує напрям впровадження, але не дає даних про кількість виготовленої продукції чи

незалежну оцінку економічного ефекту [43] (додаток Б).

Окремо практично використовують підготовку пропозицій для нормативно-методичного забезпечення галузі. Профільні організації можуть брати результати щодо монтажного вузла, класифікації та документування для роботи. Щоб підтвердити фактичну участь у конкретному рішенні технічного комітету або розробці професійного стандарту, потрібні відповідні документи.

ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» підтвердило, що використовує практичні результати дослідження під час технічного супроводу встановлення віконної фурнітури. Довідка від 13.10.2026 № 110 пов’язує вибір і перевірку вузлів замикання та петель із роботою профільної системи, армування і монтажного вузла. Внесок фурнітури розглядають як частину роботи повного захисного контуру [42] (додаток В).

Практично це означає, що треба перевіряти не тільки маркування фурнітури, а й як її закріпили та чи повний комплект у цій конструкції. Клас RC2 не дає результату вибухового випробування. Упровадження відбувається через дотримання системних рекомендацій під час технічного супроводу виробників, а не через надання вибухостійкості окремій фурнітурній деталі [42; 96].

Для роботи на виробництві потрібно мати узгоджені документи для конкретної конфігурації: специфікацію склопакета, креслення рамного контуру, відомість фурнітури та монтажне рішення. Кожну зміну документа потрібно відстежувати, щоб виробник, постачальник скла і монтажник використовували одну й ту саму версію виробу. Такий підхід продовжує системну роботу: якщо один учасник виконує рекомендації, це не виправляє помилки в іншій ланці [6; 42–44].

Довідки про впровадження підтверджують, що підприємства використали результати в зазначеному ними обсязі. Вони не заміняють протоколи випробувань змінених виробів і не збільшують кількість незалежних експериментальних спостережень. Тому при подальшому

узагальненні потрібно відділяти сам факт застосування рекомендацій від повторного підтвердження їх захисного ефекту. Для нових варіантів виробництва варто зберігати зв’язок із конкретною випробуваною конфігурацією і документувати всі відмінності.

### 4.4 Запровадження результатів у методичну літературу та освітній процес

Поширення результатів у методичній літературі та їхнє застосування в освіті розглядаються окремо від виробничого впровадження. Подана монографія є документованим джерелом матеріалів. Фактичне включення результатів у певну дисципліну, посібник або професійну програму має бути підтверджене відповідними документами закладу чи організації [6].

Основним навчальним виданням із питань світлопрозорих конструкцій у КНУБА є навчальний посібник «Світлопрозорі огородження будинків» (О. Л. Підгорний, І. М. Щепетова, О. В. Сергейчук, О. М. Зайцев, В. П. Процюк; за редакцією О. Л. Підгорного; Київ, 2005). Міністерство освіти і науки України рекомендувало його як навчальний посібник для студентів архітектурних і будівельних спеціальностей (лист МОН України від 01.12.2004 № 14/18.2-2527). У посібнику докладно розглядають проєктування та використання світлопрозорих огороджень. Безпеку цих конструкцій при вибухових впливах у виданні 2005 року не розглядали, це відповідало передвоєнним умовам їх використання [37].

Матеріали дисертації можуть становити основу розділу «Забезпечення ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій» оновленого навчального видання. До такого розділу доцільно включити класифікацію загроз, розмежування захисних властивостей, системний аналіз скла, профілю, фурнітури та монтажу, а також приклади інтерпретації протоколів EXR. Особливу навчальну цінність має порівняння позитивних і негативних

результатів без підміни фактичного висновку загальною характеристикою матеріалу. Такий виклад пов’язує теоретичні поняття з перевірюваними інженерними ситуаціями [28; 96].

Результати можна використати у навчальних матеріалах кафедри архітектурних конструкцій та інтегрованого проєктування КНУБА, наприклад, під час вивчення безпеки світлопрозорих конструкцій у курсі «Ефективні сучасні матеріали», у курсовому та дипломному проєктуванні. В якості навчальних завдань підходять порівняння специфікацій, аналіз механізмів пошкодження, відмінність між падаючим і відбитим тисками та перевірка, чи достатньо даних для класифікації.

Документ, що підтверджує фактичне використання, повинен містити назву дисципліни, тип навчальної роботи, період і точний зміст використаних матеріалів. Поки такого підтвердження немає, наведені положення описують можливість використання в освіті, а не кількісний результат впровадження.

Положення про механічне кріплення, контроль кутів, вузол імпосту і стан прорізу можна застосовувати для навчання монтажників віконно-дверних конструкцій. Навчання варто будувати на виконавчій документації та контролі прихованих робіт. Монтажник має повторювати перевірене рішення, а не змінювати його несучі елементи самостійно. Використання цих результатів у розробці конкретного професійного стандарту треба підтвердити окремо [6; 44].

Матеріали дослідження викладені в монографії М. М. Бондаренка, М. О. Орленка та Д. В. Фірсова «Сучасні аспекти проєктування та технології монтажу світлопрозорих конструкцій». У цій книзі зібрані питання монтажу, навантажень і засобів кріплення, а також відокремлено первинну уламкову дію і ризик вторинного руйнування скління. Це пов’язує конструктивні рішення з умовами їхнього розташування в будівлі [6].

Монографічний виклад дає змогу ширше використовувати результати у науково-методичній роботі. Це не розширює меж експериментального

підтвердження. Огляд уламкостійкості не показує, що в дисертаційній програмі провели комбіновані випробування хвилею і первинними уламками. Треба чітко відокремлювати ці рівні як для академічного викладу, так і для підготовки практичних рекомендацій [6; 96].

Графічні матеріали з розділів 1–3 можна використовувати під час навчання як послідовність пов’язаних задач: пояснити різницю між піком і імпульсом, перевірити розмірності, відрізнити міжмодельне відхилення від похибки чисельного розв’язку, тлумачити результати неоднорідної експериментальної програми. При цьому здобувач має не лише обчислити показник, а й вказати, якого висновку з нього робити не можна. Такий підхід допомагає зв’язати будівельну механіку з практикою документування захисних властивостей.

Окремо потрібно навчити перевіряти, чи достатньо даних для зробленого висновку. Наприклад, діаграма з двома піками не підміняє діаграму «тиск, імпульс». Позитивний результат одного блока не дає статистичної впевненості для всієї серії. У методичних матеріалах варто залишати позначення умовних прикладів і джерела таблиць, щоб пояснювальні графіки не сприймали як ще одні натурні випробування. Це допомагає тримати єдиний підхід до доказів у дисертаціях, монографіях і професійному навчанні.

## 4.5 Організаційно-технічне забезпечення відтворення захисних властивостей

Результати дослідження доцільно впроваджувати у практику через паспорт випробуваного конструктивного рішення. У цьому документі треба вказати ідентифікацію виробу, складники, схему монтажу та дати посилання на результат випробування. Паспорт не замінює сертифікат, а зберігає зв’язок між зразком, для якого отримано доказ, і виробом, який виготовляють для

певного об’єкта. Якщо цього немає, навіть правильно визначений клас у технічному завданні не забезпечує повторення перевіреної конфігурації [6; 28].

У паспорт варто включити геометрію рами і окремих секцій, схему відкривання, склад склопакета, тип і місце армування, виконання кутових з’єднань, спосіб утримання скла та комплектацію фурнітури. Монтажну частину треба описати окремо: матеріал основи, спосіб обпирання, схему механічних кріплень і функціональні шари примикання. Якщо змінити будь-який з цих параметрів, проєктувальник має це побачити. Формулювання «аналогічний профіль» або «скло не гіршої якості» без чітких критеріїв не дають такої простежуваності.

Результат випробування потрібно вказувати разом із позначенням стандарту та його редакції. Для цієї дисертації слід зберегти оригінальні позначення EXR1 (NS) і EXR2 (NS). Можливість їх подальшого порівняння з новими класами треба розглядати окремо. Якщо записати два класи через косу риску без пояснення, це можуть сприйняти як подвійне підтвердження. Тому інформаційне зіставлення і формально присвоєний клас потрібно розділяти як у паспорті, так і в комерційній чи проєктній документації [62; 96].

Паспорт варто доповнювати списком дозволених і непідтверджених змін. До не підтверджених відносяться зміна схеми відкривання, вибір іншого способу кріплення заповнення, суттєва зміна пропорцій секцій і використання іншої опорної основи. У списку не треба вказувати довільні відсоткові межі, які дослідження не перевірило. Список потрібен для визначення випадків, коли треба додаткове інженерне обґрунтування, погодження лабораторії чи повторне випробування.

На етапі проєктування спочатку потрібно визначити цільовий результат: який рівень небезпеки допустимий у приміщенні при заданому навантаженні і які функції має зберегти конструкція. Далі обирають перевірене конструктивне рішення і перевіряють, чи можна його встановити у наявний

проріз. Ця послідовність відрізняється від поширеного підходу, коли спочатку беруть стандартний віконний блок, а потім намагаються досягти потрібних захисних властивостей тільки заміною скла або наклеюванням додаткової плівки [7; 96].

Перевірка прорізу — це окреме проєктне завдання. Треба враховувати матеріал і стан стіни, наявність пошкоджень, форму країв і чи можна встановити кріплення. Вікно, яке перевірили у масивній залізобетонній стіні, не можна вважати таким самим, як у послабленій кладці, якщо немає додаткових підстав. Оновлений метод випробування не перевіряє, чи може стіна навколо витримати прямі або передані навантаження. Тому цей пункт не входить у документ на віконний блок [64].

Під час виготовлення потрібно стежити за параметрами, які забезпечують роботу захисного контуру. Зовнішню алюмінієву накладку слід розглядати як частину перевіреного рішення, а не як декоративну деталь із довільним способом монтажу. Фурнітуру потрібно відтворювати разом із її кріпленням до несучих частин профілю та розміщенням елементів, а не орієнтуватися тільки на торговельну назву. Позитивний результат зразка № 10 не підтверджує, що будь-яка накладка буде ефективною на будь-якому ПВХ-вікні [96].

На етапі монтажу треба фіксувати приховані роботи до того, як закриють укоси. Фото і виконавча схема мають показувати фактичні місця механічного кріплення, опорні підкладки та стан основи. Герметизувальні і теплоізоляційні матеріали виконують свої функції, але не замінюють механічний спосіб передавання навантаження. Оцінка готового виробу тільки за виглядом шва не дає повної інформації про роботу анкера чи його кріплення в стіні [6; 12].

Приймання варто організувати як перевірку відповідності між проєктом, паспортом випробуваного рішення та тим, що виконано. Відмінності потрібно фіксувати до того, як вирішувати, чи використовувати конструкцію. Деякі відхилення стосуються лише оздоблення, інші впливають на крайові умови

або несучу роботу. Відповідальний проєктувальник має оцінювати перелік відхилень. Рішення про збереження заявленої характеристики потрібно підтверджувати документально.

Варто окремо проводити приймання захисної комплектації і перевірку звичайних експлуатаційних властивостей. Працююча ручка, щільне прилягання стулки і належна герметизація важливі, але цього недостатньо для підтвердження вибухостійкості. Навіть якщо підтвердили клас за динамічним навантаженням, все одно треба перевіряти вимоги до щоденної експлуатації. Такий поділ не дає замінити спеціальну характеристику стандартними показниками якості вікна [6; 62].

Після вибуху конструкцію треба розглядати як таку, що могла отримати пошкодження, навіть якщо склопакет залишився на місці. Огляд має включати кріплення, кути, вузол імпосту, утримання заповнення і роботу рухомих частин. Якщо конструкція витримала один вплив, це не гарантує, що вона витримає повторне навантаження. У цій роботі не перевіряли повторну вибухостійкість пошкоджених виробів, тому рішення про їх подальше використання потрібно приймати за результатами окремого обстеження.

Ремонт треба розглядати як зміну конструкції. Якщо замінити тільки склопакет, це не відновить властивості рами, яка вже деформована, або кріплення, яке стало слабшим. Після ремонту потрібно перевірити, чи система відповідає специфікації, яку вже підтвердили, і чи не змінилася опорна основа. Якщо це неможливо підтвердити, не можна заявляти про захисні властивості системи тільки на основі попереднього протоколу. Це особливо стосується відновлення будівель після повторних пошкоджень.

Довідки підприємств показують три різні способи впровадження. ТОВ «Глас Трьош Київ» підтверджує використання результатів під час проєктування і виготовлення склопакетів. ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» застосовує їх у технічному супроводі фурнітури. ТОВ «Компанія Вікна-Стар» використовує їх у проєктуванні, виготовленні та монтажі повних конструкцій.

Разом ці документи відповідають системному підходу, бо охоплюють різні етапи захисного контуру, а не лише один матеріал [42–44].

У довідці ТОВ «Глас Трьош Київ» від 13.10.2026 № 35 вказано вимоги до внутрішнього ламінованого скла та рекомендації щодо складу склопакета. Довідка ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» від 13.10.2026 № 110 описує добір і контроль вузлів фурнітури з урахуванням профілю та монтажу. Довідка ТОВ «Компанія Вікна-Стар» від 14.10.2026 № 14 підтверджує застосування комплексних рішень і перевірку стінового прорізу. Реквізити подано згідно з наданими документами [42–44].

Водночас довідка про впровадження і протокол випробування мають різні доказові ролі. Перша підтверджує, що результати використали в роботі підприємства, другий фіксує результат випробування певного зразка за певною процедурою. Тому довідки не можна використовувати замість первинних записів тиску або як підставу для нового класу стійкості. Вони також не дають достатньо даних для обрахунку зменшення травматизму, економії коштів чи ймовірності відмови; ці ефекти тут не оцінюють.

На цьому етапі можна якісно оцінити практичну доцільність запропонованих рішень. Це залежить від того, чи можна відтворити перевірену комплектацію, проконтролювати монтаж і уникнути заміни системного захисту окремою неперевіреною ознакою. Для кількісної економічної оцінки потрібні зіставні кошториси, а також дані про витрати на випробування, монтаж, обслуговування і заміну після впливу. Якщо таких даних немає, твердження про меншу вартість комбінованої системи лишається питанням для подальшого аналізу, а не підтвердженим економічним результатом.

Запропонований підхід до впровадження нових стандартів на національному рівні має зберігати різницю між вимогами європейського документа і додатковими рекомендаціями дослідження. Позначення PXRU і VXRU вже включені до EN 13123-2:2025; автор пропонує використовувати їх

для обґрунтованих сценаріїв, а не вводити нові міжнародні позначення. Національні правила щодо контролю монтажу, комплектності документів і підготовки виконавців треба формувати так, щоб вони не створювали уявлення про повну відповідність стандарту, якщо його технічні вимоги насправді змінилися [62].

Матеріали дослідження можуть бути використані в навчанні як послідовність перевірюваних інженерних задач: від визначення об’єкта захисту до оцінювання протоколу та контролю монтажу. Надана монографія містить окремі блоки з технології встановлення конструкцій і розмежування хвильової та уламкової дії. Вона утворює самостійний канал викладення результатів і не повинна ототожнюватися з підготовкою іншого навчального посібника. Факт включення матеріалів до конкретної дисципліни або програми потребує відповідного документа закладу освіти [6].

Практичний результат дисертації — це створення узгодженого зв’язку між дослідженим навантаженням, перевіреною конструкцією і її відтворенням у будівлі. Запропонований порядок документування дає змогу помічати зміни, які можуть порушити цей зв’язок, і визначати, коли потрібне додаткове підтвердження. Він не розширює автоматично класи випробуваних зразків і не замінює оцінку всієї будівлі. Він уточнює умови, за яких можна відповідально застосовувати отримані результати у проєктній, виробничій і монтажній роботі.

## Висновки до розділу 4

1. На основі натурних результатів сформовано конструктивно-технічні рекомендації для перевірених конфігурацій EXR1 (NS) і EXR2 (NS). Вибір скла, профілю, фурнітури та кріплень має розглядатися як єдиний захисний контур. Представлені комплектації не є універсально мінімальними для всіх виробів.

2. Уточнено умови застосування результатів на об’єкті: необхідно відтворити випробувану специфікацію, задокументувати монтаж і перевірити несучу здатність опорної основи. Протокол на віконний блок не підтверджує автоматично здатність навколишньої стіни сприймати передані зусилля.

3. Сформульовано пропозиції щодо впровадження нових редакцій EN: розмежування класу навантаження та небезпеки, перевірка відбитих пікових і імпульсних навантажень, а також контроль достатності архівних даних. Формальне прирівнювання EXR1 до PXR 3 або EXR2 до PXR 4 без відповідної перевірки не допускається.

4. Обґрунтовано напрям використання класів користувача PXRU/VXRU для національних сценаріїв. Ці позначення вже передбачені EN; запропоновано процедуру задання та підтвердження навантажень. Навантаження для інтервалу 20–100 кг задано розрахунково; експериментальну базу становить конфігурація із зарядом 3 кг.

5. Документовано три напрями виробничого впровадження: виготовлення та монтаж комплектних конструкцій — ТОВ «Компанія Вікна-Стар»; проєктування та виготовлення склопакетів — ТОВ «Глас Трьош Київ»; технічний супровід фурнітурних рішень — ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА». Підтвердженням слугують надані довідки від 13–14.10.2026 [42–44].

6. Запропоновано паспорт випробуваного конструктивного рішення, порядок контролю змін, приймання та післяподієвого обстеження. Матеріали викладено у наданій монографії; можливості їх освітнього застосування відокремлено від фактів, які потребують документального підтвердження. Кількісний економічний ефект і зменшення травматизму в межах роботи не визначалися [6].

# ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації зібрано результати теоретичного аналізу, аналітичного і чисельного визначення параметрів повітряної ударної хвилі та натурних випробувань світлопрозорих огороджувальних конструкцій. На цій основі запропоновано підхід до підвищення їх ударної стійкості, де параметри навантаження, роботу всієї конструкції та умови її монтажу розглядають разом. Основні результати дослідження такі.

1. Упорядковано теоретичні та нормативні підходи до оцінки захисних властивостей світлопрозорих огороджувальних конструкцій і розмежовано об’єкти оцінки: матеріал скління, готовий віконний блок і конструкцію, встановлену в будівлі. Потрібно розрізняти контактний удар, повітряну ударну хвилю та дію первинних і вторинних уламків. Якщо матеріал витримав один вид випробування, це не гарантує іншої захисної властивості всієї системи. Наприклад, характеристика ламінованого скла P4A не означає, що віконний блок вибухостійкий. Щоб порівнювати результати, потрібно враховувати об’єкт випробування, фізичний зміст вимірюваних величин, умови навантаження і критерії небезпеки.

2. Виконано порівняльне оцінювання п’яти аналітичних моделей параметрів повітряної ударної хвилі у дослідженому діапазоні. Відношення найбільшого до найменшого розрахованого падаючого піка становить 2,91 на відстані 0,5 м та 1,58 на відстані 3,0 м. Наведені значення характеризують міжмодельну розбіжність, а не експериментально встановлену похибку кожної залежності. Зіставлення моделей із чисельними результатами дало змогу конкретизувати умови їх використання як розрахункових орієнтирів. Розмежовано міжмодельну розбіжність, вплив дискретизації та валідацію за натурними даними; зближення окремих значень не є підставою вважати моделі тотожними або універсально застосовними [4].

3. У ANSYS LS-DYNA із використанням 2D ALE виконали числове

моделювання поширення повітряної ударної хвилі та її взаємодії з вертикальною перепоною. Визначили, як змінюються розраховані піки тиску залежно від кроку скінченно-елементної сітки. За кроку 5 мм відбитий пік для сферичного заряду у контрольній точці на стінці дорівнює 998 кПа, тоді як аналітичний орієнтир становить 951 кПа; відхилення — 4,9 %. Для циліндричного заряду при такому ж кроці отримали 971 кПа, а різниця між двома формами на стінці — близько 2,7 %. Ці значення є локальними: в інших точках траси відмінності можуть бути значно більшими. Крок 5 мм виправданий для цього цільового показника, але не для повної моделі руйнування вікна чи всіх часових характеристик хвилі [4].

4. Програму з одинадцяти натурних дослідів поділили на пошукову і кваліфікаційну частини. За протокольними результатами з публікацій п’ять із семи кваліфікаційних зразків відповідають цільовим класам: зразки 231 і 796-В/3 — EXR1 (NS), а 345-В/1, 345-В/2 і 796-В/2 — EXR2 (NS). Зразки 345-В/3 та 796-В/1 не підтвердили цільовий клас EXR2. Для механічної інтерпретації використали всю програму спостережень, а висновки щодо класів сформували окремо за способом документування. Кількість зразків обмежена, комплектації розподілено нерівномірно, тому цей розподіл не можна розглядати як статистичну оцінку надійності серійної продукції [28; 96].

5. Виявили, що з’єднання і монтажний вузол мають вирішальне значення для роботи захисного контуру. У дослідженій конструкції на армованому ПВХ-профілі втрата цілісності неармованої кутової зони зварного з’єднання призвела до порушення роботи сусіднього кріплення. Зразок № 10 із зовнішньою алюмінієвою накладкою показав позитивний результат, що підтвердило користь підсилення цього вузла у випробуваній конфігурації. Відмова двостулкового алюмінієвого зразка № 9 у вузлі імпосту показала, що матеріал профілю і товщина зовнішнього скла самі по собі не визначають результат. Внутрішнє ламіноване скло 44.4 VSG утримувало фрагменти, якщо крайове закріплення залишалося цілим. Його роботу не можна прирівнювати

до використання плівки без достатнього утримання скла у рамі [28; 96].

6. Поліпшили інструментальний супровід і тлумачення натурних випробувань, провівши окремий аналіз падаючого надлишкового тиску у вільному полі та відбитого тиску біля зразка. Виміряні параметри пов’язали з поведінкою конкретної комплектації і характером її пошкоджень. Потрібно розділяти виміряні піки, розрахункові значення та апроксимаційні імпульси від результатів прямого інтегрування первинних сигналів. Щоб оцінити можливість використання архівних даних за EN 13123-2:2025, слід разом перевіряти відбитий пік, відбитий позитивний імпульс, критерії небезпеки та умови випробування. Тому залишили вихідні позначення EXR без автоматичного присвоєння нових класів, а інструментальний контроль доповнює, але не замінює всі вимоги процедури [16; 18; 62; 64; 96].

7. Запроваджено системний підхід до використання результатів у будівництві. Монтажний вузол і стіновий проріз розглядають як єдиний шлях для передавання динамічних зусиль. Протокол випробування віконного блока не підтверджує несучу здатність опорної основи, яка сприймає ці навантаження. Розроблено рекомендації для відтворення перевіреної специфікації, механічного кріплення, контролю важливих зон, документування прихованих робіт і приймання встановленої конструкції. Запропоновано паспорт випробуваного конструктивного рішення і порядок контролю змін. Щоб поширити результати на інші розміри, конфігурації, складники чи опорні основи, потрібне окреме обґрунтування, а інколи — додаткове випробування [6; 28; 64; 96].

8. Обґрунтовано національне застосування класів користувача PXRU/VXRU з європейської класифікації для сценаріїв, які не входять до фіксованих класів. Пропонують узгоджено задавати тиск і імпульс, документувати вихідний сценарій і підтверджувати фактичне навантаження. Навантаження для діапазону 20–100 кг задано розрахунково за моделлю Кінгері–Балмаша; експериментально підтверджено конфігурацію із зарядом 3

кг, тому для решти сценаріїв передбачено процедуру підтвердження. Практичне застосування результатів підтверджують три довідки від підприємств: ТОВ «Компанія Вікна-Стар», ТОВ «Глас Трьош Київ» і ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» (додатки А. 1 – А. 3). Впровадження включає виготовлення й монтаж готових конструкцій, проєктування склопакетів і технічний супровід фурнітурних рішень. Матеріали також подано в колективній монографії [6; 42–44; 62].

Отримані результати дають підстави вибрати перевірені конструктивні рішення і визначити, де їх можна застосовувати. Далі потрібно провести повторні контрольовані випробування, зібрати нові часові записи, перевірити змінені конфігурації та окремо дослідити спільну хвильову й уламкову дію. Ці завдання не замінюють уже проведені дослідження, а відділяють отримані результати від питань наступних етапів.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Басок Б. І., Недбайло О. М., Давиденко Д. Б., Беспала Н. Г. Фізичні чинники впливу вибуху на огороджувальні світлопрозорі конструкції. Огляд методів тестування. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 2 (76). С. 88–94. DOI: 10.20535/1813-5420.2.2024.303106.

2. Бісик С. П., Давидовський Л. С., Телепа М. В., Нагорський О. Г., Бісик С. В., Новосад А. А. Огляд математичних моделей оцінки параметрів ударної хвилі вибуху зарядів вибухової речовини. Озброєння та військова техніка. 2021. № 1 (29). С. 77–84. DOI: 10.34169/2414-0651.2021.1(29).77-84.

3. Бісик С.П. Дослідження поведінки та характеру руйнування зварних з’єднань зі сталі НВ 500Mod при навантаженні вибухом / С.П. Бісик, О.А. Сливінський, Л.С. Давидовський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № 3(32). – С. 102-112. DOI: https://doi.org/10.30748/nitps.2018.32.14.

4. Бісик С. П., Орленко М. О. Порівняльний аналіз математичних моделей параметрів повітряної ударної хвилі та збіжність чисельного моделювання при оцінці вибухостійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2026. № 5 (369). С. 137–143. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-369-17.

5. Бісик С.П. Підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів бойових броньованих машини з урахуванням зварних з’єднань / С.П. Бісик // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 3(28). – С. 121-127. https://doi.org/10.30748/nitps.2017.28.15.

6. Бондаренко М. М., Орленко М. О., Фірсов Д. В. Сучасні аспекти проєктування та технології монтажу світлопрозорих конструкцій : монографія. Київ : Ліра-К, 2026. 117 с. ISBN 978-617-9002-20-5.

7. Буравченко В. С., Овчинніков О. О., Орленко М. О. Раціональні конструктивні рішення світлопрозорих огороджувальних конструкцій у

системі інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури від вибухових навантажень. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2026. Вип. 217. С. 168–180. DOI: 10.18664/1994-7852.217.2026.371910.

8. Венгрин І. І. Енергоефективні геліосистеми інтегровані в світлопрозорі конструкції будівель : дис. .. д-ра філософії : 192 Будівництво та цивільна інженерія / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2022.

9. Давидовський Л.С., Бісик С.П., Корбач В.Г. Дослідження енергопоглинаючого елемента протимінного сидіння бойової броньованої машини // Озброєння та військова техніка : щокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2017. №1 (13). С. 24-33. DOI: https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1(13).24-33.

10. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ : Мінрегіон України, 2021.

11. Доступ до правди. Як відновлюють вікна у пошкоджених будинках столиці. 2024. URL: https://dostup.org.ua/news/publications/yak-vidnovliuiut-vikna-u-poshkodzhenykh-budynkakh-stolytsi (дата звернення: 04.08.2026).

12. ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010. Конструкції будинків і споруд. Настанова щодо проектування й улаштування вікон та дверей. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.

13. ДСТУ EN 356:2021. Скло в будівництві. Захисне скління. Випробування та класифікація стійкості до ручного нападу.

14. ДСТУ EN 12600:2019. Скло у будівництві. Маятникове випробування ударом. Метод випробування на удар і класифікація плоского скла.

15. ДСТУ EN 13123-1:2019. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Класифікація. Частина 1. Метод випробування в ударній трубі. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 12 с.

16. ДСТУ EN 13123-2:2006. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Класифікація та технічні вимоги. Частина 2. Діапазон випробування (EN 13123-2:2004, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2008.

17. ДСТУ EN 13124-1:2019. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Метод випробування. Частина 1. Ударна труба. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 11 с.

18. ДСТУ EN 13124-2:2006. Вікна, двері та жалюзі. Стійкість до вибуху. Метод випробування. Частина 2. Діапазон випробування (EN 13124-2:2004, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 11 с.

19. ДСТУ EN 13541:2014. Скло в будівництві. Захисне скління. Випробування та класифікація стійкості проти вибухового тиску. Київ, 2014.

20. Злоба В. В. Проблеми розрахунку опору теплопередачі нахилених світлопрозорих конструкцій. Енергоефективність в будівництві та архітектурі. 2014. Вип. 6. С. 101–106.

21. Карвацька Ж. К. Будівельні конструкції // Навчальний посібник. – 2021. URL: https://kipt.com.ua/wp-content/uploads/2025/02/Ж.К.-Карвацька-Будівельні-конструкції.pdf.

22. Коцюруба В. І., Білик А. С., Веретнов А. О. та ін. Методика розрахунків та обґрунтування вимог до інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури від БпЛА типу баражуючий боєприпас. Опір матеріалів і теорія споруд. 2022. № 109. С. 164–183. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.164-183.

23. Криворучко Д.В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д.В. Криворучко, В.О. Залога, В.Г. Корбач. – Суми : Видавництво СумДУ, 2010. – 209 с.

24. Лук’янченко О. О., Геращенко О. В., Костіна О. В. Моделювання дії ударної хвилі від вибухового пристрою на захисну оболонку. Опір матеріалів і теорія споруд. 2025. № 115. С. 33–42. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.33-42.

25. Мартинов В. Л. Оптимізація геометричних параметрів форми, світлових прорізів і утеплювача енергоефективних будівель. Будівельні конструкції. 2013. Вип. 77. С. 317–322.

26. Мустафа Махмуд Абдулгані Мустафа. Принципи архітектурно-планувальної організації об’єктів громадського обслуговування у складі транспортно-пересадочних вузлів : дис. .. д-ра філософії : 191 Архітектура та містобудування / Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ, 2025.

27. Нетеса К. М. Вдосконалення та визначення раціональних організаційно-технологічних рішень влаштування фасадних систем багатоповерхових цивільних будівель : дис. .. канд. техн. наук : 05.23.08 / Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна; ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Дніпро, 2021.

28. Орленко М. О., Буравченко В. С., Бісик С. П. Досвід натурних випробувань на стійкість до ударної хвилі віконних блоків різного складу. Опір матеріалів і теорія споруд. 2025. № 115. С. 383–395. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395.

29. Орленко М. О. Випробування світлопрозорих конструкцій на стійкість до ударної хвилі: аналіз міжнародних стандартів та перспективи їх застосування в Україні. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2025. Вип. 71. С. 658–669. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.71.658-669.

30. Панкевич В. В. Підтримка прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій житлових будівель з врахуванням безпекової ситуації : дис. .. д-ра філософії : 192 Будівництво та цивільна інженерія / Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2024.

31. Протокол випробування №345-В/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 арк.

32. Протокол випробування №796-В/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 арк.

33. Протокол №4317/2023 випробувань вікна, наданого ТОВ «Компанія Вікна-Стар» від 22 травня 2023 р. / ВЛ Товариства з обмеженою відповідальністю «Науково-інженерний центр випробувань виробів та матеріалів захисту». – 5 арк.

34. Ратушняк Г. С., Панкевич В. В. Ідентифікація факторів, які визначають безпеку вікон при дії вибухової хвилі // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2023. – № 2(42). – С. 42–48. – Режим доступу: https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/download/839/778.

35. Ратушняк Г. С., Панкевич В. В., Панкевич О. Д. Фактори впливу на оцінку безпекової ситуації при виборі віконних конструкцій. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2024. Т. 37, № 2. С. 87–93. DOI: 10.31649/2311-1429-2024-2-87-93.

36. Садовский М. А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. — Москва: Наука, 2004. — 440 с.

37. Світлопрозорі огородження будинків : навч. посіб. / О. Л. Підгорний, І. М. Щепетова, О. В. Сергейчук, О. М. Зайцев, В. П. Процюк ; за ред. О. Л. Підгорного. Київ : КНУБА, 2005.

38. Семко В. О. Архітектурні конструкції малоповерхових будівель // Навчальний посібник. – 2020. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/4a310328-6e7e-4ed0-a290-2db2b9e832f2/content.

39. Солодей І. І., Затилюк Г. А. Дослідження процесів поширення вибухових та імпульсних навантажень у ґрунтових середовищах. Опір

матеріалів і теорія споруд. 2026. № 116. С. 67–74. DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.67-74.

40. Суспільне Харків. 220 тисяч вибитих вікон у Харкові: чи вистачає сил замінювати їх після атак? URL: https://suspilne.media/kharkiv/1065223-220-tisac-vibitih-vikon-u-harkovi-ci-vistacae-sil-zaminuvati-ih-pisla-atak/ (дата звернення: 04.08.2026).

41. Суханова О. І., Ларін О. О. Аналіз динаміки ламінованих композитних панелей із різною кривизною скла при ударному навантаженні. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. 2020. № 1. С. 47–52. DOI: 10.20998/2078-9130.2020.1.217466.

42. ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА». Довідка щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження Орленка Михайла Олександровича : від 13.10.2026 № 110. 2 арк.

43. ТОВ «Глас Трьош Київ». Довідка щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження Орленка Михайла Олександровича : від 13.10.2026 № 35. 2 арк.

44. ТОВ «Компанія Вікна-Стар». Довідка про впровадження у виробничу діяльність результатів дисертаційного дослідження Орленка Михайла Олександровича : від 14.10.2026 № 14. 2 арк.

45. Фаренюк Є. Г. Тепловий режим світлопрозорих огороджувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель : дис. … канд. техн. наук : 05.23.01 / Національний університет водного господарства та природокористування. Рівне, 2015. 172 с.

46. Чепков І.Б., Бісик С.П., Васьківський М.І., Давидовський Л.С., Корбач В.Г., Висоцький О.М., Захаревич Д.М. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2» // Озброєння та військова техніка: щокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2016. №1 (9). С.26-31. DOI: https://doi.org/10.34169/2414-0651.2016.1(9).26-31.

47. AAMA 510-14. Voluntary Guide Specification for Blast Hazard Mitigation for Vertical Fenestration Systems. American Architectural Manufacturers Association, 2014.

48. Abaqus Documentation. Dassault Systèmes. URL: https://help.3ds.com/ (дата звернення: 04.08.2026).

49. Adushkin V. V., Korotkov, A. I. Parameters of a shock wave near to HE charge at explosion in air. PMTF, 1961, Vol. 5, pp. 119-123.

50. Ahmad S., Elahi A., Pervaiz H., Rahman A., Barbhuiya, S. Experimental study of masonry wall exposed to blast loading. Materiales de Construccion, 2014, Vol. 64, No. 313, pp. 1-11, DOI: 10.3989/mc.2014.01513.

51. Ahmad S., Taseer, M., Pervaiz, H. Effects of impulsive loading on reinforced concrete structures. Tech. J., Univ. Eng and Technol. Taxila, Pakistan (Vibration analysis issue), 2012.

52. ASTM F1642/F1642M-17. Standard Test Method for Glazing and Glazing Systems Subject to Airblast Loadings. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2017.

53. ASTM F2248-19. Standard Practice for Specifying an Equivalent 3-Second Duration Design Loading for Blast Resistant Glazing Fabricated with Laminated Glass. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2019.

54. ASTM F2912-17. Standard Specification for Glazing and Glazing Systems Subject to Airblast Loadings. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2017.

55. Bajić Z. Determination of TNT equivalent for various explosives. Master's, University of Belgrade, Belgrade, Serbia., 2007.

56. Bennison S. J., Jagota A., Smith C. A. Fracture of glass/poly(vinyl butyral) (Butacite®) laminates in biaxial flexure. Journal of the American Ceramic Society. 1999. Vol. 82, no. 7. P. 1761–1770. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01997.x.

57. Bisyk S., Davydovskyi L., Hutov I., Slyvinskyi O., Aristarkhov O., Lilov I. Comparison of Numerical Methods for Modeling the Effect of Explosion on Protective Structures. Trans Motauto World. 2019. Vol. IV, no. 1. P. 20–23.

58. Bisyk S. P., Chepkov I. B., Vaskivskyy M. I., Davydovskyi L. S., Slyvinskyy O. A., Aristarkhov O. M. Methods for modelling air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis. Weapons and Military Equipment. 2019. No. 1 (21). P. 22–31. DOI: 10.34169/2414-0651.2019.1(21).22-31.

59. Brode H. L. Numerical solutions of spherical blast waves. J. Appl. phys., 1955, Vol. 26, No. 6, pp. 766-775, DOI:10.1063/1.1722085.

60. DIN 52290-4:1988. Angriffhemmende Verglasungen. Durchwurfhemmende Verglasungen. Anforderungen und Prüfung. Berlin : DIN, 1988 (замінено EN 356).

61. EN 13123-1:2025. Windows, doors, shutters and curtain walling — Explosion resistance — Requirements and classification — Part 1: Shock tube. Brussels : CEN, 2025.

62. EN 13123-2:2025. Windows, doors, shutters and curtain walling — Explosion resistance — Requirements and classification — Part 2: Arena test. Brussels : CEN, 2025.

63. EN 13124-1:2025. Windows, doors, shutters and curtain walling — Explosion resistance — Test method — Part 1: Shock tube. Brussels : CEN, 2025.

64. EN 13124-2:2025. Windows, doors, shutters and curtain walling — Explosion resistance — Test method — Part 2: Arena test. Brussels : CEN, 2025.

65. ETAG 002. Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems. European Organisation for Technical Approvals, 1998.

66. Feldmann M., Kasper R. et al. Guidance for European Structural Design of Glass Components: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2014. EUR 26439 EN. DOI: 10.2788/5523.

67. Fleckenstein E., Bornemann S., Salam M. A., Weiß J., Engelmann M. Influence of a multilayer interlayer with a stiff core on the performance of laminated glass. Glass Structures & Engineering. 2024. Vol. 9. P. 251–264. DOI: 10.1007/s40940-024-00262-3.

68. Freddi F., Mingazzi L. Phase-Field Simulation of Laminated Glass Beam. Materials. 2020. Vol. 13, no. 14. Art. 3218. DOI: 10.3390/ma13143218.

69. GSA-TS01-2003. Standard Test Method for Glazing and Window Systems Subject to Dynamic Overpressure Loadings. U.S. General Services Administration, 2003.

70. Hallquist J. O. LS-DYNA Theory Manual. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006. URL: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2026/08/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf (дата звернення: 15.09.2026).

71. Hazell P.J. Armour. Materials, Theory and Design. / P.J. Hazell Canberra, Australia : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. – 380 p.

72. Held M. Blast waves in free air. Propellants, Explos., Pyrotech., 1983, Vol. 8, No. 1, pp. 1-7, DOI:10.1002/prep.19830080102.

73. Henrych J., Major R. The dynamics of explosion and its use, Elsevier, Amsterdam, 1979.

74. Hooper P. A., Sukhram R. A. M., Blackman B. R. K., Dear J. P. On the blast resistance of laminated glass. International Journal of Solids and Structures. 2012. Vol. 49, no. 6. P. 899–918. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2011.12.008.

75. Hopkins-Brown M. A., Bailey A. Chapter 2 (Explosion Effects) Part 1., AASTP-4 Royal Military College of Science, Cranfield University, 1998.

76. Insulate Ukraine. How to save Ukraine’s broken windows : відео. YouTube, 2024. URL: https://www.youtube.com/watch?v=AZ3eprDmUd4 (дата звернення: 04.08.2026).

77. Iqbal J., Ahmad S. Improving safety provisions of structural design of containment against external explosion. Proc. International conference on

opportunities and challenges for water cooled reactors in the 21st century, Intenational Atomic Energy Agency (IAEA), 2011.

78. ISO 16933:2007. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification for arena air-blast loading. Geneva : ISO, 2007.

79. ISO 16934:2007. Glass in building — Explosion-resistant security glazing — Test and classification by shock-tube loading. Geneva : ISO, 2007.

80. ISO 16936-1:2005. Glass in building — Forced-entry security glazing — Part 1: Test and classification by repetitive ball drop. Geneva : ISO, 2005.

81. Izadifard R., Foroutan M. Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation. Turk. J. Eng. And Environ. Sci., 2010, Vol. 34, No. 1, pp. 25-42, DOI: 10.3906/muh-0911-39.

82. Jeremić, R., Bajić, Z. An approach to determining the TNT equivalent of high explosives. Sci. Tech. Rev., 2006, Vol. 56, No. 1, pp. 58-62.

83. Kingery C. N., Bulmash G. Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. Aberdeen Proving Ground : Ballistic Research Laboratory, 1984. Report ARBRL-TR-02555.

84. Kinney G. F., Graham K. J. Explosive shocks in air, Springer-Verlag, Berlin and New York, 1985.

85. Konrád P., Hála P., Schmidt J., Zemanová A., Sovják R. Laminated Glass Plates Subjected to High-Velocity Projectile Impact and Their Residual Post-Impact Performance. Materials. 2022. Vol. 15, no. 23. Art. 8342. DOI: 10.3390/ma15238342.

86. Kowalczyk R. et al. Computational Modelling of VIG Plates Using FEM: Static and Dynamic Analysis. Materials. 2022. Vol. 15, no. 4. Art. 1467. DOI: 10.3390/ma15041467.

87. Larcher M. Pressure-time functions for the description of air blast waves, Technical note, JRC, 2008.

88. Larcher M., Solomos G., Casadei F., Gebbeken N. Experimental and numerical investigations of laminated glass subjected to blast loading. International

Journal of Impact Engineering. 2012. Vol. 39, no. 1. P. 42–50. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.09.006.

89. Lee E. L., Hornig H. C., Kury J. W. Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products. Livermore: University of California, Lawrence Radiation Laboratory, 1968. Report UCRL-50422. URL: https://doi.org/10.2172/4783904 (дата звернення: 15.09.2026).

90. Li J., Ma S. Explosion Mechanics. Beijing : Science Press, 1992.

91. Low H. Y., Hao H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading. Structural Safety. 2001. Vol. 23, no. 2. P. 157–178. DOI: 10.1016/S0167-4730(01)00011-X.

92. Makki E. et al. Coated Laminated Glass Under Combined Shock and Temperature. Journal of Dynamic Behavior of Materials. 2015. Vol. 1. DOI: 10.1007/s40870-015-0036-0.

93. Mariggiò G. et al. A probabilistic FEM approach for the structural design of glass components. Engineering Fracture Mechanics. 2023. Vol. 280. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794423001157.

94. Mills C. A. The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects. Proceedings of the 1st Int. Conference on Concrete for Hazard Protections, 1987, pp. 61-73.

95. Newmark N. M., Hansen R. J. Design of blast resistant structures, Shock and vibration handbook, Harris, and Crede, eds., McGraw-Hill, New York, USA., 1961.

96. Orlenko M. Analysis of structural factors affecting the compliance of window units with EXR1–EXR2 classes based on field blast test results. The Scientific Heritage. 2026. No. 185 (185). P. 9–15. DOI: 10.5281/zenodo.20455933.

97. Reuters. Ukrainians with windows shattered by war get cheaper, safer refits. 17.07.2024. URL: https://www.reuters.com/world/europe/ukrainians-with-

windows-shattered-by-war-get-cheaper-safer-refits-2024-07-17/ (дата звернення: 04.08.2026).

98. Sanchidrián J. A., Castedo R., López L. M., Segarra P., Santos A. P. Determination of the JWL Constants for ANFO and Emulsion Explosives from Cylinder Test Data. Central European Journal of Energetic Materials. 2015. Vol. 12, No. 2. P. 177–194. URL: https://oa.upm.es/36228/ (дата звернення: 15.09.2026).

99. Smith P. D., Hetherington, J. G. Blast and ballistic loading of structures, Butterworth-Heinemann Oxford, UK., 1994.

100. Swisdak Jr. M. M. Simplified Kingery airblast calculations, Minutes of the Twenty Sixth DOD Explosives Safety Seminar, DTIC Document, Maryland, 1994.

101. United Nations Office for Disarmament Affairs. UN SaferGuard: Kingery–Bulmash Blast Parameter Calculator. URL: https://unsaferguard.org/un-saferguard/kingery-bulmash.

102. Wei D., et al. Simulation Study of LowVelocity Impact on Polyvinyl Butyral (PVB) Laminated Glass Pane // Applied Sciences. – 2019. – 9(15). – 3204. – Режим доступу: https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3204.

103. Wu C., Hao H. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions. Int. J. Impact Eng., 2005, Vol. 31, No. 6, pp. 699-717, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.002.

104. Wurm J. Glass Structures: Design and Construction of Self-supporting Skins. Basel : Birkhäuser, 2007. 255 p. DOI: 10.1007/978-3-7643-8317-6.

105. Zemanová, A. et al. Modal analysis of laminated glass // arXiv. – 2018. URL: https://arxiv.org/abs/1801.01110.

106. Zemanová A., et al. Numerical model of elastic laminated glass beams under finite strain // arXiv. – 2013. – . – . – Режим доступу: https://arxiv.org/abs/1303.6314.

107. Zemanová A., Konrád P., Hála P., Sovják R., Hlůžek R., Zeman J., Šejnoha M. Experimental study on the gradual fracture of layers in multi-layer laminated glass plates under low-velocity impact. arXiv, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2107.12151.

108. Zhang X., Hao H. The response of glass window systems to blast loadings: An overview. International Journal of Protective Structures. 2016. Vol. 7, no. 1. P. 123–154. DOI: 10.1177/2041419615626061.

109. Zhu H., Khanna S. K. Dynamic response of a novel laminated glass panel using a transparent glass fiber-reinforced composite interlayer under blast loading. International Journal of Impact Engineering. 2016. Vol. 89. P. 14–24. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734743X15002225.

# ДОДАТОК А. 1

## Довідка про впровадження результатів дисертаційного дослідження від ТОВ «Компанія Вікна-Стар» від 14.10.2026 № 14

КОМПАНІЯ ВІКНА-СТАР, ТОВ
м. Київ, вул.. Братиславська,6; оф: 4
t +38 044 502-69-35 f +38 044 544-75-53
www.viknastar.ua info@viknastar.ua

Ми робимо якісні вікна для Вас з 2005 року.

**від 14.10.2026 №14**

**Ректору Київського національного університету будівництва і архітектури**
**О. С. Дніпрову**

**ДОВІДКА**
**у виробничу діяльність результатів дисертаційного дослідження**
**Орленка Михайла Олександровича**
**«Вдосконалення світлопрозорих огороджувальних конструкцій в частині стійкості до ударних навантажень»**

ТОВ «Компанія «Вікна-Стар»» підтверджує впровадження практичних результатів дисертаційної роботи Орленка Михайла Олександровича, здобувача ступеня доктора філософії кафедри архітектурних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури, у проєктування, виготовлення та монтаж світлопрозорих огороджувальних конструкцій підвищеної стійкості до дії повітряної ударної хвилі.

У діяльності компанії використано запропонований автором системний підхід, за яким склопакет, профільна система, армування, фурнітура, монтажний вузол і стіновий проріз розглядаються як єдиний несучий контур. Клас стійкості задається і підтверджується для конструкції в комплекті, а не для окремого елемента. Компанія виготовила та змонтувала дослідні зразки для натурних полігонних випробувань за ДСТУ EN 13124-2:2006 (зокрема за протоколом № 4317/2023). За результатами цих випробувань у виробництво запроваджено мінімальні комплектації конструкцій класів EXR1–EXR2: внутрішнє ламіноване скло 44.4 класу P4A, ПВХ-профіль 82 мм зі сталевим армуванням або алюмінієвий профіль 77 мм, а для класу EXR2 — алюмінієвий профіль або ПВХ-профіль із зовнішньою алюмінієвою накладкою.

Під час монтажу застосовується рекомендоване автором комбіноване механічне кріплення турбошурупами та анкерними пластинами з обов'язковою перевіркою стану стінового прорізу. Контроль якості зосереджено на зонах, визначених у дослідженні як найвразливіші: зварних кутових з'єднаннях ПВХ-профілів, вузлі кріплення імпосту та анкерному вузлі. Для визначення

НАШІ ПАРТНЕРИ:

Продовження додатка А. 1

КОМПАНІЯ ВІКНА-СТАР, ТОВ
м. Київ, вул.. Братиславська,6; оф: 4
t +38 044 502-69-35 f +38 044 544-75-53
www.viknastar.ua info@viknastar.ua

Ми робимо якісні вікна для Вас з 2005 року.

розрахункового навантаження на стадії проєктування застосовано обґрунтовану автором модель Кінгері–Балмаша. Конструкції зазначених типів виготовлено та встановлено на об'єктах замовників, зокрема на об'єктах критичної інфраструктури.

Практична цінність впровадження полягає в обґрунтованому призначенні комплектації конструкції за цільовим класом стійкості та відмові від рішень, які самостійно не забезпечують захисту: загартованого скла, захисних плівок без утримання скла в рамі, ПВХ-систем без підсилення контуру для класу EXR2. Це знижує ризик ураження людей уламками скла та елементами конструкції під час вибуху.

**Технічний директор**
**ТОВ «Компанія Вікна-стар»** **Запетляєв С.П.**

Україна * Товариство з обмеженою відповідальністю * м. Київ
"КОМПАНІЯ ВІКНА-СТАР"
Ідентифікаційний код 34483878
№1

НАШІ ПАРТНЕРИ:

# ДОДАТОК А. 2

## Довідка про впровадження результатів дисертаційного дослідження від ТОВ «Глас Трьош Київ» від 13.10.2026 № 35

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ГЛАС ТРЬОШ КИЇВ"**
03067, м. Київ, вул. Машинобудівна, 50
ЄДРПОУ 35519082
IBAN UA553808050000000026004440095
в АТ «Райффайзен Банк»
тел. +38 044 594 67 76
Поштова адреса: 04119, м. Київ, а/с 24
ІПН 355190810139

від «13» жовтня 2026 р. № 35

**ДОВІДКА**
щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження
Орленка Михайла Олександровича
«Вдосконалення світлопрозорих огороджувальних конструкцій в частині стійкості до ударних навантажень»

ТОВ «Глас Трьош Київ» підтверджує впровадження практичних результатів дисертаційної роботи Орленка Михайла Олександровича, здобувача ступеня доктора філософії кафедри архітектурних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури, у проєктування та виготовлення склопакетів для світлопрозорих конструкцій підвищеної стійкості до дії повітряної ударної хвилі.

У діяльності компанії використано експериментально обґрунтовані автором вимоги до складу склопакета вибухостійкої конструкції. Обов'язковим елементом склопакета для класів EXR1–EXR2 визначено внутрішнє ламіноване скло 44.4 класу P4A. Враховано встановлений автором вплив товщини зовнішнього скла: для класу EXR1 допустиме зовнішнє скло 4 мм (склопакет 43,52 мм), для класу EXR2 — скло 6 мм (склопакет 48 мм), а скло 4 мм — лише за умови підсиленого несучого контуру конструкції.

Компанія також використовує висновки дослідження щодо рішень, які самостійно не забезпечують вибухозахисту. Загартоване скло (ESG) за вибухового навантаження фрагментується на дрібні уламки з небезпечною кінетичною енергією і не має переваги над флоат-склом. Захисні плівки без конструктивного утримання скла в рамі змінюють характер руйнування в бік утворення великого і важкого скло-плівкового фрагмента. Ці положення покладено в основу технічних рекомендацій замовникам щодо комплектації склопакетів для об'єктів, до яких висуваються вимоги вибухостійкості, та виготовлення склопакетів відповідної структури.

Продовження додатка А. 2

glaströsch

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ГЛАС ТРЬОШ КИЇВ"**
03067, м. Київ, вул. Машинобудівна, 50
ЄДРПОУ 35519082
IBAN UA553808050000000026004440095
в АТ «Райффайзен Банк»
тел. +38 044 594 67 76
Поштова адреса: 04119, м. Київ, а/с 24
ІПН 355190810139

Практична цінність впровадження полягає в обґрунтованому призначенні структури склопакета за цільовим класом стійкості конструкції та у зниженні ризику ураження людей уламками скла під час вибуху.

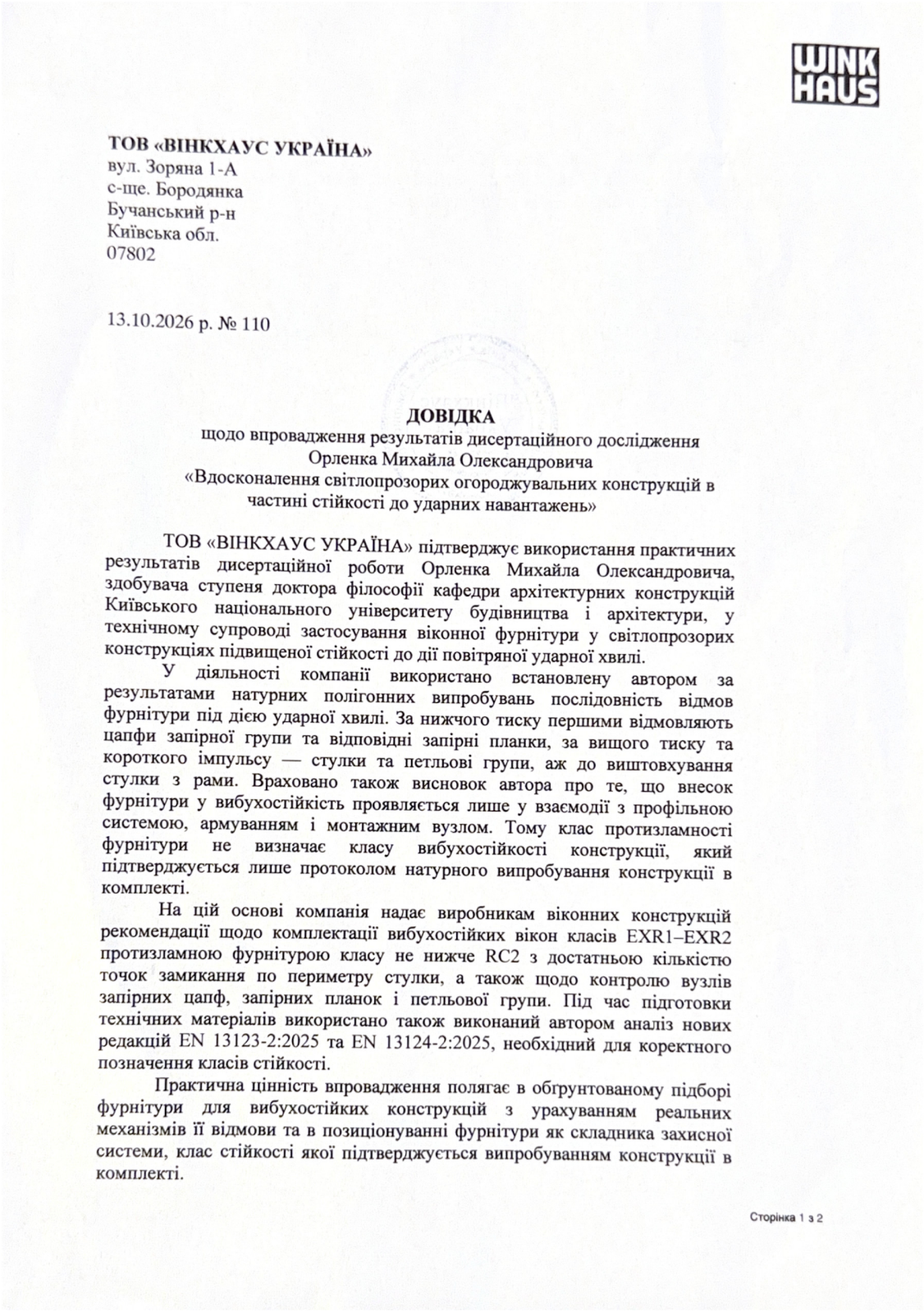
Довідку видано для подання до Київського національного університету будівництва і архітектури як підтвердження впровадження практичних результатів дисертаційного дослідження.

Директор
ТОВ «Глас Трьош Київ» _____ Сергій Сорокун

Україна · Товариство з обмеженою відповідальністю · «ГЛАС ТРЬОШ КИЇВ» · Ідентифікаційний код 35519082

# ДОДАТОК А. 3

Довідка про впровадження результатів дисертаційного дослідження від ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» від 13.10.2026 № 110



**ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА»**
вул. Зоряна 1-А
с-ще. Бородянка
Бучанський р-н
Київська обл.
07802

13.10.2026 р. № 110

**ДОВІДКА**
щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження
Орленка Михайла Олександровича
«Вдосконалення світлопрозорих огороджувальних конструкцій в частині стійкості до ударних навантажень»

ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» підтверджує використання практичних результатів дисертаційної роботи Орленка Михайла Олександровича, здобувача ступеня доктора філософії кафедри архітектурних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури, у технічному супроводі застосування віконної фурнітури у світлопрозорих конструкціях підвищеної стійкості до дії повітряної ударної хвилі.

У діяльності компанії використано встановлену автором за результатами натурних полігонних випробувань послідовність відмов фурнітури під дією ударної хвилі. За нижчого тиску першими відмовляють цапфи запірної групи та відповідні запірні планки, за вищого тиску та короткого імпульсу — стулки та петльові групи, аж до виштовхування стулки з рами. Враховано також висновок автора про те, що внесок фурнітури у вибухостійкість проявляється лише у взаємодії з профільною системою, армуванням і монтажним вузлом. Тому клас протизламності фурнітури не визначає класу вибухостійкості конструкції, який підтверджується лише протоколом натурного випробування конструкції в комплекті.

На цій основі компанія надає виробникам віконних конструкцій рекомендації щодо комплектації вибухостійких вікон класів EXR1–EXR2 протизламною фурнітурою класу не нижче RC2 з достатньою кількістю точок замикання по периметру стулки, а також щодо контролю вузлів запірних цапф, запірних планок і петльової групи. Під час підготовки технічних матеріалів використано також виконаний автором аналіз нових редакцій EN 13123-2:2025 та EN 13124-2:2025, необхідний для коректного позначення класів стійкості.

Практична цінність впровадження полягає в обґрунтованому підборі фурнітури для вибухостійких конструкцій з урахуванням реальних механізмів її відмови та в позиціонуванні фурнітури як складника захисної системи, клас стійкості якої підтверджується випробуванням конструкції в комплекті.

Сторінка 1 з 2

Продовження додатка А. 3

Довідку видано для подання до Київського національного університету будівництва і архітектури як підтвердження впровадження практичних результатів дисертаційного дослідження.

Генеральний директор
ТОВ «ВІНКХАУС УКРАЇНА» Іван БОГДАН



Додаток Б

*Список публікацій здобувача, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Орленко М. О. Випробування світлопрозорих конструкцій на стійкість до ударної хвилі: аналіз міжнародних стандартів та перспективи їх застосування в Україні. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2025. Вип. 71. С. 658–669. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.71.658-669.

2. Орленко М. О., Буравченко В. С., Бісик С. П. Досвід натурних випробувань на стійкість до ударної хвилі віконних блоків різного складу. Опір матеріалів і теорія споруд. 2025. № 115. С. 383–395. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.383-395.

*Особистий внесок здобувача: розроблення програми натурних випробувань, виготовлення та монтаж дослідних зразків, участь у проведенні випробувань, оброблення та інтерпретація результатів.*

3. Orlenko M. Analysis of structural factors affecting the compliance of window units with EXR1-EXR2 classes based on field blast test results. The Scientific Heritage. 2026. No. 185 (185). P. 9–15. DOI: 10.5281/zenodo.20455933.

4. Бісик С. П., Орленко М. О. Порівняльний аналіз математичних моделей параметрів повітряної ударної хвилі та збіжність чисельного моделювання при оцінці вибухостійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2026. № 5 (369). С. 137–143. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-369-17.

*Особистий внесок здобувача: постановка задачі порівняння аналітичних моделей повітряної ударної хвилі, участь в обробленні результатів чисельного моделювання.*

5. Буравченко В. С., Овчинніков О. О., Орленко М. О. Раціональні конструктивні рішення світлопрозорих огороджувальних конструкцій у системі інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури від вибухових навантажень. Збірник наукових праць Українського державного

університету залізничного транспорту. 2026. Вип. 217. С. 168–180. DOI: 10.18664/1994-7852.217.2026.371910.

*Особистий внесок здобувача: систематизація випробуваних конструктивних рішень та обґрунтування рекомендацій щодо їх застосування на об'єктах критичної інфраструктури.*

*Колективна монографія*

6. Бондаренко М. М., Орленко М. О., Фірсов Д. В. Сучасні аспекти проєктування та технології монтажу світлопрозорих конструкцій : монографія. Київ : Ліра-К, 2026. 117 с. ISBN 978-617-9002-20-5.

*Особистий внесок здобувача: розділ, присвячений уламкостійкості світлопрозорих конструкцій та розмежуванню хвильової й уламкової дії.*

*Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

7. Орленко М. О. Методи оцінки ударної стійкості світлопрозорих огороджувальних конструкцій. Scientific Collection «InterConf» : Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference «Challenges in Science of Nowadays» (Washington, USA, September 26–28, 2025). Washington : EnDeavours Publisher, 2025. № 265. С. 99–102. DOI збірника: 10.51582/interconf.2025.265.

8. Орленко М. О. Удосконалення світлопрозорих огороджувальних конструкцій у частині стійкості до ударних навантажень. Current Issues in the Design of Structures. CIDS 2025 : матеріали Міжнар. наук.-техн. симпозіуму (м. Київ, 30–31 жовтня 2025 р.). Київ, 2025. С. 70–73.
URL: https://scadsoft.com/Seminar/CIDS_Kyiv_2025.pdf.

9. Орленко М. О. Світлопрозорі конструкції для критичної інфраструктури: натурні випробування вікон на стійкість до ударної хвилі та практичні рішення для відновлення. Архітектура, Будівництво, Дизайн: Виробництво, Інформатизація, Менеджмент : програма та тези доп. Міжнар. наук.-техн. форуму (м. Київ, 24–25 листопада 2025 р.). Київ : Ліра-К, 2025. С. 170–171.