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.