

Б.І. Басок^{1,2}, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8935-4248

О.М. Недбайло^{1,2}, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ORCID 0000-0003-1416-9651

Д.Б. Давиденко¹, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ORCID 0009-0003-5791-1980

Н.Г. Беспала², магістрант, ORCID 0000-0002-4466-6491

¹Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФІЗИЧНІ ЧИННИКИ ВПЛИВУ ВИБУХУ НА ОГОРОДЖУВАЛЬНІ СВІТЛОПРОЗОРИ КОНСТРУКЦІЇ. ОГЛЯД МЕТОДІВ ТЕСТУВАННЯ

В статті розглянуті основні фізичні параметри вибухової хвилі, властивості вибухових навантажень, а також особливості розповсюдження хвиль у просторі та їхній динамічний вплив на огороджувальні конструкції, в т.ч. світлопрозори. Розглянуті часові та просторові умови, за яких має місце формування квазіплоского фронту вибухової хвилі та вибухові навантаження можна розглядати як розподілені рівномірно за вертикальною площиною. Якщо відстань до вибухового заряду перевищує половину значення ширини та висоти споруди або її елемента (за умови, що заряд розташовано по центру конструкції або елемента), то навантаження на них можна вважати наближено усередненими за площею. Проаналізовані теплофізичні чинники впливу, яким повинна протистояти будівельна конструкція. Описані основні відмінності вибухових і ударних впливів від статичних навантажень, що враховуються під час будівельного проектування.

Розглянуті основні натурні методи визначення параметрів вибухової хвилі у режимі реального часу та чинники її руйнівного впливу на елементи огороджувальних конструкцій будівель.

Ключові слова: вибух, детонація, вибухова хвиля, вибухове навантаження, огороджувальна світлопрозора конструкція.

Вступ

Для того, щоб розробити критерії визначення конструктивних характеристик, а згодом і критерії випробувань для вибухостійкого скління, необхідно визначити фактори, що слід враховувати під впливом вибуху.

Окрім системних досліджень руйнівного впливу вибухів під час ведення воєнних дій також актуальною є потреба в розробленні вибухостійкого скла для захисту від випадкових аварійних газових або нафтохімічних вибухів. Однак у цьому випадку вибухові хвилі матимуть значно нижчий тиск і більшу тривалість, ніж вибухові хвилі від фугасних подій. Вибухові навантаження найчастіше прийнято розглядати як похідні екзотермічних реакцій, що відбуваються наслідок детонації, втім ударні хвилі в повітрі можуть виникати також у результаті розриву посудин під тиском і високої швидкості розповсюдження фронту полум'я під час згоряння.

Міські сценарії детонації можуть призвести до різних і більш складних профілів навантаження. Можливі ефекти посилення або затінення можна розглядати в рамках методів тестування.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є аналіз фізичних чинників руйнівного впливу вибухових ударних хвиль на огороджувальні (в т.ч. світлопрозори) конструкції будівель.

Основним завданням при цьому є визначення оптимальних до використання в лабораторних умовах методів досліджень відповідних параметрів вибухових хвиль, а також їхнього динамічного впливу на огороджувальні конструкції (в т.ч. світлопрозори).

Матеріал і результати дослідження

Властивості ударних хвиль. Зазвичай клас вибуху в разі миттєвого займання або детонації встановлюється в залежності від виходу наявної енергії. Це зазвичай відбувається у вигляді потужного удару, що викликаний динамічним впливом (імпульсом), детонацією первинної вибухової речовини або ж внаслідок нагрівання середовища від тертя поверхонь. Під час вибуху ініціюється детонатор із чутливою первинною вибухівкою, що створює ударну хвилю, яка поширюється з надзвуковою швидкістю через основний вторинний заряд вибухової речовини, викликаючи відповідну швидку та стабільну хімічну реакцію. Швидкість детонації при цьому може досягати значення до 8000 м/с для високоякісних військових вибухівок. Детонаційна хвиля (стрибок ущільнення середовища) перетворює вибухівку на суміш гарячих газів під високим тиском, що спричиняють ударний фронт в повітрі та продовжують розширюватися для підтримання вибухової хвилі.

Існує ряд ефектів, що викликаються детонацією заряду фугасної речовини.

Бризанс (руйнівна здатність вибухівки), як вплив надлишкового тиску середовища. Якщо вибухівку підірвано в контакт з об'єктом (будівлею) або дуже близько до нього, високошвидкісна ударна хвиля пошириться безпосередньо до огорожувальних конструкцій. Це основний спосіб навантаження на конструкції після вибуху. Наслідки від цього залежатимуть від швидкості детонації вибухової речовини, що набагато вища для військових вибухових речовин, ніж для промислових вибухових речовин.

Тепловий вплив. Високотемпературні гази, що утворюються в результаті детонації вибухової речовини, випромінюють теплоту і можуть спричинити теплові пошкодження внаслідок утворення термічних напружень розширення матеріалів поблизу місця вибуху.

Якщо вибух відбувається у відкритому повітрі та поблизу землі, ударна хвиля поширюватиметься у півкулі. При внутрішніх вибухах ударна хвиля відбиватиметься від стін, підлоги та стелі. Це відбувається неодноразово зі зниженою інтенсивністю, створюючи складне поле тиску. Якщо немає отворів, через які гази виходять, вони зрештою досягнуть рівномірного та стабільного тиску. Такий стан простору характеризується як квазістатичний.

Якщо вибух відбувся на поверхні землі ударна хвиля, що спричиняє утворення кратера, буде проходити через ґрунт та спричинятиме його пружні коливання, що призводять передаються на об'єкти та можуть призводити до їхньої деформації та руйнування.

Поширення ударної хвилі в повітрі за межі вибухового матеріалу після детонації називається **вибуховою хвилею**.

Залежно від амплітуди та форми профілю хвилі, а також від властивостей середовища, в якому хвиля поширюється, слід розрізняти пружні та пластичні хвилі.

Хвилі стиснення на великій відстані від джерела демонструють якісно однакові характеристики, незалежно від сценарію (*Sauer та ін., 2020*) [1]. У випадках контактної детонації та близької детонації характеристики хвиль стиснення можуть сильно відрізнитися.

Ударні хвилі (у вигляді залежності тиску p від часу t) характеризуються *фазою стиснення* (позитивна фаза t_0^+) з високим (піковим) значенням тиску p_{s0}^+ і наступною *фазою розрідження* його до значення p_{s0}^- , що менший за атмосферний p_0 (негативна фаза t_0^-) (рис. 1).

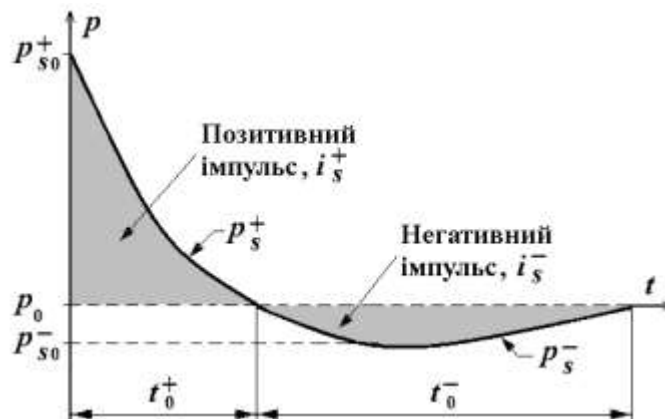


Рисунок 1 - Залежність тиску вибухової хвилі від часу її розповсюдження у вільному просторі

Фаза стиснення починається з ударного фронту.

Вибухи відрізняються швидкістю процесу горіння. У разі *детонації* вибухової речовини процес відбувається зі швидкістю *вищою за швидкість звуку* у вибуховій речовині, тоді як *швидкість дефлаграції є нижчою*.

В ідеальних умовах вибухові хвилі поширюються сферично, якщо немає перешкод, що здійснюють відбиття.

Зі збільшенням відстані між навантаженою конструкцією і джерелом вибуху ударна хвиля стає близькою до плоскої. Це призводить до квазіплоского навантаження, що характеризується певним значенням тиску в момент часу в будь-якій точці огорожувальної (в т.ч. світлопрозорі) конструкції.

Міські сценарії детонації можуть призвести до різних і більш складних профілів навантаження (*Gebbeken та ін., 2012*) [2]. Можливі ефекти посилення або затінення можна розглядати в рамках методів тестування (NATO 2008, STANAG 2280) [3].

Ударні хвилі сильно відрізняються від лінійних пружних хвиль щодо їх розширення та поширення. Дуже високі амплітуди тиску характеризують стан середовища у нелінійній області кривої залежності тиск – щільність (*Riedel та ін., 2004*) [4].

Оскільки швидкість поширення хвилі залежить від градієнту кривої залежності тиск - щільність (рис. 2), пік хвилі **b** поширюється швидше, ніж її передній **a** і задній фронти, що призводить до формування крутого ударного фронту (зображено праворуч), що характеризується розривом функції тиску та щільності у напрямку поширення.

Ліворуч: співвідношення тиск – щільність, праворуч: утворення фронту ударної напруги (*Riedel ma in., 2010*) [5].

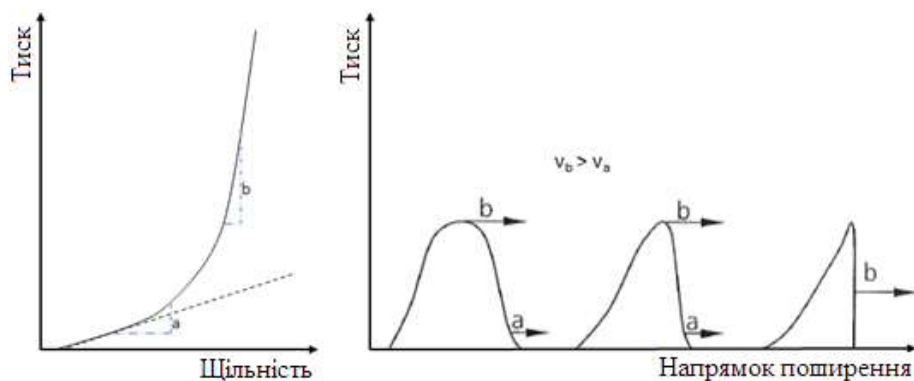


Рисунок 2 – Схема утворення та розповсюдження ударних хвиль

Найвищий тиск виникає на близькій відстані від джерела детонації. Зі збільшенням відстані від джерела детонації тиск сильно знижується. Піковий тиск у контактному сценарії детонації досягає значення в декілька ГПа за дуже короткий час (мікросекунди). Повітряний вибух від детонації з великою дистанцією поміж джерелом і структурою призводить до значного зниження тиску (кПа) і тривалості навантаження в мілісекундах. Через це існує різниця між сценаріями навантаження на огорожувальні конструкції.

Класифікація детонаційного сценарію можлива через застосування масштабованої відстані Z , що визначена як

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

де R – відстань від джерела детонації до навантаженої (в т.ч. світлопрозорої) конструкції, м;
 W – маса заряду вибухівки (в тротиловому еквіваленті), кг.

Відповідно до (*Riedel ma in., 2010*) [5], таблиця 1 нижче узагальнює деякі сценарії класифікації навантажень і відповідні масштабовані відстані для залізобетонних і легких конструкцій.

Таблиця 1 – Класифікації навантажень і відповідні масштабовані відстані для залізобетонних і легких конструкцій під впливом вибуху

Навантажена конструкція	Масштабована відстань Z	Сценарій
Залізобетонні конструкції	$Z < 0,5$	Близька детонація
	$Z > 0,5$	Вибух
Легкі конструкції	$Z < 2-6^*$	Контактна детонація
	$Z > 2-6^*$	Вибух

Контактна детонація характеризується високим тиском, що навантажує структуру лише на мікросекунди. Вплив на структуру локальний. Активується руйнування при зсуві та продавлюванні, що, залежно від міцності та пластичності навантаженого матеріалу, призводить до фрагментації як з боку навантаження, так і з тильної сторони конструкції.

Вибухове навантаження призводить до навантаження великої або повної площі задіяної конструкції. Тиск значно нижчий, що призводить до менших пошкоджень (таблиця 2). Це призводить до глобальної структурної реакції, наприклад до пошкодження через вигин.

Видно, що в динамічному навантаженні елементів конструкції бризантними вибуховими речовинами домінує маса заряду та відстань поміж джерелом детонації та елементом.

Європейські та міжнародні стандарти почали забезпечувати класифікацію «вибухобезпечної стійкості» скляних конструкцій, вікон і дверей. Наприклад, європейський стандарт EN13123-1 [6] визначає

типову історію вибухового навантаження від тиску та часу, що повинна бути реалізована в класифікаційних випробуваннях з ударними трубами та детонаціями у вільному полі (CEN) [7].

Таблиця 2 – Параметри окремих сценаріїв вибухових подій

Сценарій	Тиск, МПа	Швидкість деформації, s^{-1}	Пошкодження
Контактна детонація	5000	$10^6 \dots 10^8$	Місцевий
Близька детонація	500	$10^7 \dots 10^8$	Локальний/ глобальний
Вибух	1	$10^7 \dots 10^8$	Глобальний

Повномасштабні випробування на арені з використанням вибухових речовин проводяться для оцінки ефективності елементів конструкції та будівельних компонентів проти вибухових навантажень. Один або кілька тестових зразків розміщують на відповідній відстані від заряду на рівній площі без перешкод (рис. 3).

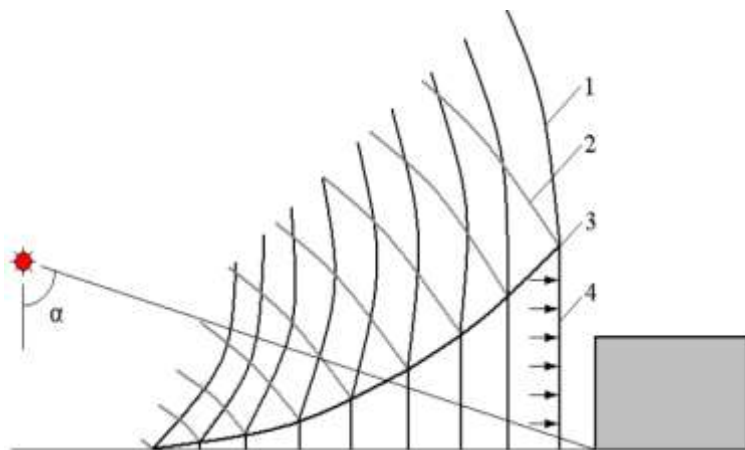


Рисунок 3 - Спрощена схема розповсюдження в просторі ударної хвилі від повітряного вибуху:
1 – падаюча ударна хвиля; 2 – відбита ударна хвиля; 3 – траєкторія потрійної точки (інтерференція хвиль); 4 – фронт основної ударної хвилі (хвилі Маха); ☼ – епіцентр вибуху.

Випробувальні зразки слід поміщати в міцні камери, щоб гарантувати, що поведінка випробовуваного зразка не змінюється впливом вибухової хвилі, що навантажує задню частину зразка. Тестова арена має бути покрита бетоном або асфальтом для зниження ризику пошкодження об'єктів досліджень вторинними уламками.

Це також гарантує, що кількість енергії, що поглинена при утворенні кратерів, мінімізується, і випробування наближається до умов повітряного вибуху напівсферичної поверхні Kingery-Bulmash (Kinney та ін., 1985) [8]. Гладка поверхня землі також зменшує вплив на розповсюдження хвиль, що може бути спричинений будь-якими нерівностями поверхні або рослинністю.

Заряд формують у сферу та розміщують на підставці з крихкого матеріалу, наприклад, пінополістиролу (рис. 4). Оскільки заряд трохи піднятий, це являє собою повітряний вибух на низькій висоті. При цьому неминучим є відбиття від землі ударної хвилі, що наздожене прямий фронт хвилі, утворюючи фронт хвилі Маха (рис. 3). Для діапазонів, що зазвичай розглядаються, якщо світлопрозора конструкція не є надзвичайно високою, хвиля Маха буде вищою за тестовий зразок. Подібним чином, якщо зразок не є надзвичайно широким, сферичний ударний фронт фактично стане квазіплоскою хвилею до моменту, коли він досягне поверхні, що досліджується. На практиці припущення, що заряд є напівсферичним поверхневим вибухом, дає адекватне фізичне наближення.

Найпростішим пристроєм для фізичного моделювання спрямованої повітряної ударної хвилі є відкрита ударна труба з постійною площею поперечного перерізу (рис. 5).

Для створення імпульсу тиску на початку труби встановлюється заряд вибухівки. При детонації заряду утворюється напівсферичний фронт ударної хвилі. В контакт з стінками труби він стає все більш рівномірним за профілем. Приблизно через п'ять значень діаметрів труби фронт удару утворює приблизно плоску поверхню за винятком невеликого прогину в тонкому шарі поряд із внутрішньою поверхнею.

Під час руху тунелем крива профілю тиску стає плоскішою. Через відповідну відстань крива має типову форму вибухової хвилі. На цій відстані можна облаштувати вікно для спостереження та проведення

вимірювань параметрів хвилі. Якщо зафіксувати параметри зміни тиску в часі, можна визначати типову форму вибухової хвилі, що зображена в нижній частині схеми.



Рисунок 4 - Фото розташування тестових світлопрозорих конструкцій та вибухового заряду на арені для вибухів

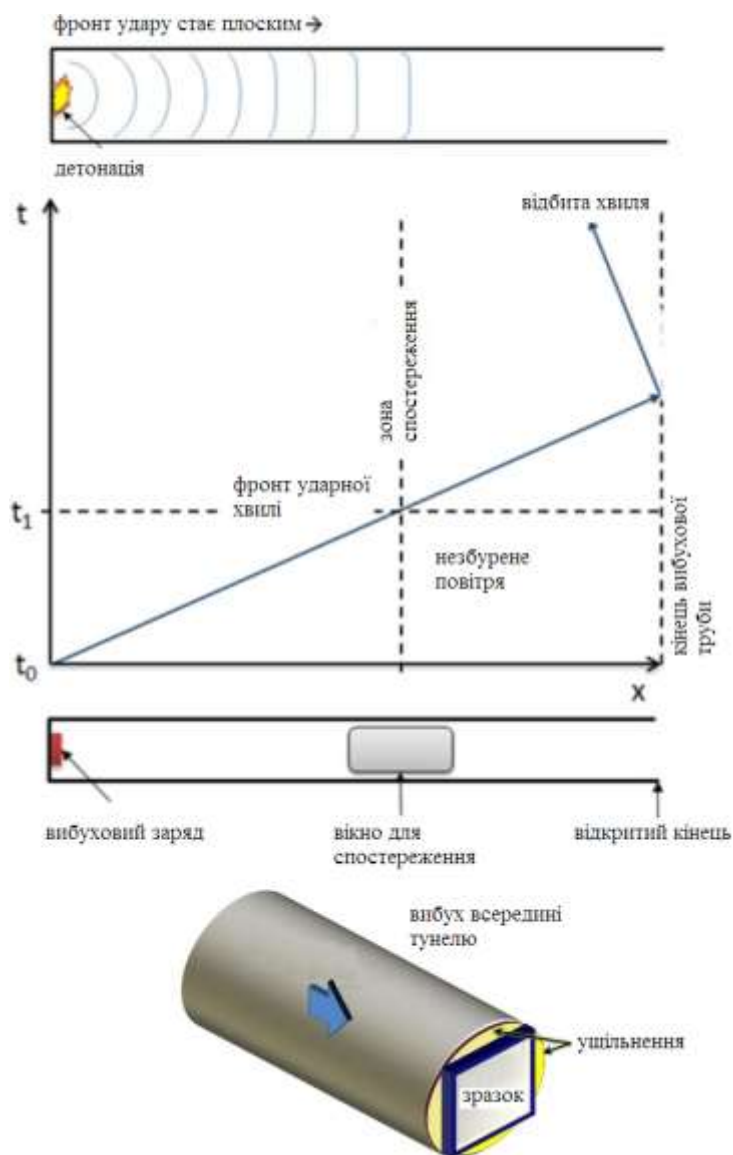


Рисунок 5 - Схема поширення хвилі в ударній трубі

На рис. 5 також наведена діаграма час t – траєкторія x рухомого фронту ударної хвилі.

Коли фронт досягає відкритого кінця ударної труби, створюється хвиля розрідження, що повертається вгору. Ця хвиля розрідження прискорює газ, що витікає, і тим самим призводить до того, що його тиск також падає нижче тиску довкілля. Потім у цій зоні низького тиску починається процес наповнення середовищем, що призводить до коливального повітряного потоку до труби та з неї.

У прикладі, що схематично наведений на рис. 5, хвиля розрідження не мала жодного впливу на ділянку спостереження. Швидкість, з якою тиск зменшується, і поява негативної фази залежить від технічних характеристик відкритого кінця та всієї конструкції ударної труби.

Через генерацію ударної хвилі ідеалізуються умови для одновимірної частини детонаційної хвилі, що фізично моделюється за допомогою випробувань з ударною трубою.

При попаданні ударної хвилі на конструкцію виникає відбиття, що описується коефіцієнтом відбиття $c_{ra} = p_r/p_i$, де p_r – тиск хвилі, що відбита від поверхні, кПа; p_i – тиск хвилі, що діє (падає) на поверхню, кПа.

Коефіцієнт відбиття c_{ra} є функцією падаючого надлишкового тиску, а також кута його дії α . Для поверхонь, паралельних напрямку поширення (кут падіння 90°), відбитий тиск дорівнює падаючому тиску, тому його також називають бічним тиском.

Пік надлишкового тиску відбитої хвилі визначає навантаження на конструкцію. Це явище викликане тим фактом, що молекули газів зі складу повітря, які знаходяться поряд із об'єктом, не можуть вільно рухатися при цьому (*Gebbeken та ін., 2012*) [2].

Висновки

Визначені основні теплофізичні чинники руйнівного впливу вибуху, яким повинна протистояти будівельна конструкція. Проаналізовані основні відмінності вибухових і ударних впливів від статичних навантажень на огорожувальні конструкції (в т.ч. світлопрозорі). Визначення критичного тиску для конкретної конструкції прив'язане до визначення критичної відстані, на якій конструкція не витримає руйнівного впливу ударної хвилі.

Розглянуті основні натурні методи визначення параметрів вибухової хвилі у режимі реального часу. Визначено, що використання методу ударної труби є раціональним для проведення досліджень в лабораторних умовах.

Робота виконана за сприяння Національного фонду досліджень України. Матеріали статті містять наукові результати, що отримані в рамках виконання проекту № 208/0172 «Аеродинаміка, теплообмін та інновації для підвищення енергоефективності віконних конструкцій і їх використання для відбудови пошкоджених війною будівель України» конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Список використаної літератури

1. Sauer, M., Klommfass, A. and Thoma, K. 2005, Interaktion von Detonationswellen und Gebäuden. Seminar Interaktionsprobleme im Ingenieurbau. Technische Universität Dresden.
2. Gebbeken N., Döge T., Larcher M., 2012. Safety and Security of Urban Areas through Innovative Architectural and Structural Concepts, Proceedings 7th Security Research Conference Future Security Sept. 4-6, 2012, Bonn, Germany.
3. NATO 2008, STANAG 2280 Ed.1, Design Threat Levels and Handover Procedures for Temporary Protective Structures.
4. Riedel, W. 2004. Beton unter dynamischen Lasten Meso- und Makromechanische Modelle und ihre Parameter. Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik, Heft 4.
5. Riedel, W., et al. 2010. Engineering and Numerical Tools for Explosion Protection of Reinforced Concrete. International Journal of Protective Structures.
6. CEN, 2001. EN 13123-1: Windows, Doors and Shutters – Explosion Resistance – Requirements and classification/ Part 1: Shock Tube.
7. CEN, 2001, EN 13123-2: Windows, Doors and Shutters – Explosion Resistance – Requirements and classification. Part 2: Range test.
8. Kinney, G.F. and Graham, K.J. 1985. Explosive Shocks in Air. Second Edition, Springer Berlin.

B. Basok^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8935-4248

O. Nedbailo^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0000-0003-1416-9651

D. Davydenko¹, Dr. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0009-0003-5791-1980

N. Bospala², master student, ORCID 0000-0002-4466-6491

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

²National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

PHYSICAL FACTORS OF THE INFLUENCE THE EXPLOSION ON ENCLOSURE GLASS STRUCTURES. OVERVIEW OF TESTING METHODS

The article examines the main physical parameters of an explosive wave, the properties of explosive loads, as well as the peculiarities of the propagation of waves in space and their dynamic influence on enclosing structures, including translucent. The considered temporal and spatial conditions under which the formation of the quasi-flat front of the blast wave takes place and the blast loads can be considered as uniformly distributed along the vertical plane. If the distance to the explosive charge exceeds half of the value of the width and height of the structure or its element (provided that the charge is located in the center of the structure or element), then the load on them can be considered approximately averaged by area. The thermophysical factors of influence, which the building structure must withstand, are analyzed. The main differences of explosive and shock effects from static loads, which are taken into account during construction design, are described.

The main real-time methods of determining the parameters of the blast wave in real time and the factors of its destructive effect on the elements of the enclosing structures of buildings are considered.

The determination of the critical pressure for a specific structure is tied to the determination of the critical distance at which the structure will not withstand the destructive impact of the shock wave.

The main real-time methods of determining the blast wave parameters in real time are considered. It was determined that the use of the shock tube method is rational for conducting research in laboratory conditions.

The work was carried out with the assistance of the National Research Fund of Ukraine. The materials of the article contain scientific results obtained as part of the implementation of the project No. 208/0172 "Aerodynamics, heat exchange and innovations to increase the energy efficiency of window structures and their use for the reconstruction of war-damaged buildings of Ukraine" of the competition "Science for the reconstruction of Ukraine in the war and post-war periods".

Keywords: explosion, detonation, explosive wave, explosive load, enclosing translucent structure.

References

1. Sauer, M., Klommfass, A. and Thoma, K. 2005, Interaktion von Detonationswellen und Gebäuden. Seminar Interaktionsprobleme im Ingenieurbau. Technische Universität Dresden.
2. Gebbeken N., Döge T., Larcher M., 2012. Safety and Security of Urban Areas through Innovative Architectural and Structural Concepts, Proceedings 7th Security Research Conference Future Security Sept. 4-6, 2012, Bonn, Germany.
3. NATO 2008, STANAG 2280 Ed.1, Design Threat Levels and Handover Procedures for Temporary Protective Structures.
4. Riedel, W. 2004. Beton unter dynamischen Lasten Meso- und Makromechanische Modelle und ihre Parameter. Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik, Heft 4.
5. Riedel, W., et al. 2010. Engineering and Numerical Tools for Explosion Protection of Reinforced Concrete. International Journal of Protective Structures.
6. CEN, 2001. EN 13123-1: Windows, Doors and Shutters – Explosion Resistance – Requirements and classification/ Part 1: Shock Tube.
7. CEN, 2001, EN 13123-2: Windows, Doors and Shutters – Explosion Resistance – Requirements and classification. Part 2: Range test.
8. Kinney, G.F. and Graham, K.J. 1985. Explosive Shocks in Air. Second Edition, Springer Berlin.

Надійшла: 18.03.2024

Received: 18.03.2024