

Методи розрахунку фортифікаційних та спеціальних захисних споруд на дію вибухово-ударної хвилі

Олег Комар, аспірант¹ (ORCID: 0009-0004-4507-9178), Артур Журба, магістр¹ (ORCID: 0009-0006-0988-5556),
Денис Михайловський, проф., д-р техн. наук, професор¹ (ORCID: 0000-0003-3151-8630)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

Проведено аналіз існуючих методів розрахунку фортифікаційних та спеціальних захисних споруд на дію вибухово-ударної хвилі. Визначено три основні методи розрахунку та проведено їх короткий аналіз використання при розрахунку фортифікаційних та спеціальних захисних споруд на дію вибухово-ударної хвилі.

Ключові слова: вибухово-ударна хвиля, фортифікаційні споруди, спеціальні захисні споруди, надлишковий тиск, відбитий тиск, імпульс.

1. ВСТУП

З повномасштабним вторгненням РФ на територію України у лютому 2022 року, наша держава постала перед новими викликами, такими як високоточні засоби повітряного нападу противника (далі – ЗПНП) – ракет та безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА). Ключовими характеристиками високоточних засобів повітряного нападу є їх різноманітність та інтенсифікація застосування; вибіркове ураження боєприпасами найбільш важливих об'єктів або їх елементів; мінлива комбінована тактика застосування їх країною-агресором, спроби введення в оману тощо. Военна агресія РФ має ознаки тривалої, а перемога України у війні означає не тільки повернення усіх загарбаних територій, але і створення системи безпеки, що мінімізує фактори виникнення можливих загроз в майбутньому.

Враховуючи наявні масштаби та різноманітність об'єктів які потребують зведення спеціальних захисних споруд, кількість та потужність атак на них, а вони не мають аналогів за масштабами, демонструючи тенденції та виклики війни майбутнього, можна впевнено стверджувати, що задача захисту національної інфраструктури в Україні має загальносвітове значення. З перших днів повномасштабного вторгнення, над її вирішенням працюють різноманітні установи, організації, визначені відповідальні органи, створені відповідні робочі групи тощо.

Найкращі системи активного захисту, протиповітряної оборони (далі – ППО), розроблені до цього часу в Світі, мають технологічний поріг ефективності свого застосування при знешкодженні високоточних, далекобійних і потужних ЗПНП. Не менш важливим, з цієї позиції, є і пасивний захист, який має включати не лише фізичний захист об'єктів, але й їх децентралізацію, дублювання пунктів керування та обов'язкове резервування. Під цим розуміється сукупність заходів з інженерного обладнання об'єктів з метою підвищення їх живучості, безпеки персоналу та стійкого функціонування держави в інтересах забезпечення життєвих потреб суспільства.

У даній роботі проведено аналіз існуючих методів розрахунку фортифікаційних та спеціальних захисних споруд на дію вибухово-ударної хвилі (далі – ВУХ).

2. МЕТА РОБОТИ

Мета цієї роботи полягає в аналізі існуючих методів розрахунку фортифікаційних та спеціальних захисних споруд на дію вибухово-ударної хвилі.

3. ІСНУЮЧІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ФОРТИФІКАЦІЙНИХ ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ЗАХИСНИХ СПОРУД НА ДІЮ ВИБУХОВО-УДАРНОЇ ХВИЛІ

Наразі застосовується кілька методів розрахунку будівельних конструкцій на дію ВУХ, які детальніше розглянуто нижче.

Квазістатичний метод розрахунку ґрунтується на розгляді каркасу будівлі, як системи із одним ступенем вільності, та гіпотезі, що найбільше динамічне переміщення пропорційне статичному при дії максимального навантаження. Такі припущення дають змогу встановити коефіцієнти динамічності і весь подальший розрахунок виконувати на еквівалентні квазістатичні навантаження. В цьому випадку встановлюються еквівалентні квазістатичні навантаження які приймають з досвіду проектування та розрахунку споруд на ударні хвилі різних засобів ураження. Використання даного методу дає задовільні результати у випадку попереднього розрахунку каркасів будівель і споруд більш точними методами.

Розрахунок квазістатичним методом передбачає наступні передумови при формуванні розрахункової схеми:

- еквівалентні статичні навантаження приймаються рівномірно розподіленими із максимальним значенням, відповідного знаку;

- еквівалентні статичні розподілені навантаження прикладаються перпендикулярно до поверхні конструкції.

У випадку потреби розрахунку споруди на вибух довільного заряду (ваги тротилового еквіваленту) на заданій відстані, рекомендовано прикладати навантаження від надлишкового тиску ВУХ зі збереженням законів розподілу по фронту. На бічні та задню поверхні споруди дозволяється прикладати усереднені значення надлишкового тиску ВУХ у вигляді рівномірно розподілених навантажень.

Метод ударного імпульсу. Суть даного методу полягає у використанні теореми збереження імпульсів до визначення міцності та коливань несучого каркасу конструкції будівлі або споруди. До основних параметрів на які виконується розрахунок за методом ударного імпульсу відносять надлишковий тиск та час дії навантаження від ВУХ. У фронті ВУХ слід приймати відбитий тиск, значення якого можуть значно перевищувати значення надлишкового тиску. Для окремих конкретних сценаріїв та випадків їх можна визначати у залежності від основних параметрів, або приймати сталими наприклад для будівель певної конструктивної схеми з заданими параметрами несучих конструкцій. У даному випадку можна враховувати тиск обох знаків. Спрощено для більшості розрахункових схем навантаження приймають як ударний імпульс фази стиску з розподіленням за трикутною формою.

Метод ударного імпульсу можна застосовувати як для розрахунку каркасу всієї будівлі або споруди так і для її окремих конструктивних елементів.

Рекомендовано прикладати ударний імпульс фази стиску відбитого тиску ВУХ по фронту за сталими закономірностями зміни тиску ВУХ. На бічні та задню поверхні споруди дозволяється прикладати усереднені значення ударного імпульсу фази стиску надлишкового тиску ВУХ у вигляді рівномірно розподілених навантажень.

Метод прямого інтегрування рівнянь руху. Даний метод полягає у динамічному розрахунку споруди на дійсні закони зміни навантажень у часі. Даний метод є найбільш точним. За цим методом можна враховувати роботу залізобетонних конструкцій будівель та споруд із тріщинами.

При розрахунку даним методом необхідно отримати всі параметри динамічних впливів (графіки зміни надлишкових тисків вибухово-ударних хвиль) та виконати їх апроксимацію. Такий підхід дасть змогу отримати всі необхідні параметри зміни навантажень через рівні інтервали часу.

Метод прямого інтегрування рівнянь руху дозволяє також враховувати різні комбінації графіків зміни надлишкового тиску по фронту вибухово-ударних хвиль. Результати розрахунку встановлюється у відповідні моменти, які співпадають із точками інтегрування.

Так само, як і при застосуванні методу ударного імпульсу, при застосуванні цього методу слід у фронті ВУХ приймати значення для відбитого тиску.

ВИСНОВКИ

Провівши аналіз існуючих методів розрахунку фортифікаційних та спеціальних захисних споруд на дію вибухово-ударної хвилі, можемо підсумувати.

Квазістатичний метод найбільш простий у використанні, але показує наближені результати з досить великими запасами. Потребує удосконалення і проведення додаткових досліджень для кожного варіанту ураження противником.

Метод ударного імпульсу, як і метод прямого інтегрування рівнянь руху, дозволяє отримати більш точні результати розрахунку.

Наразі механізми проведення розрахунку останніми двома методами продовжують досліджуватись. Запропоновано, як найбільш реалізований метод в сучасних програмних розрахункових комплексах застосовувати математичний апарат “Динаміка в часі”, яка враховує розподіл тисків ВУХ та їх затухання у часі.

Список літератури

- [1] UFC 4-023-07 Unified Facilities Criteria. Design to Resist Direct Fire Weapons Effects. Change 1 / U.S. Army Corp of Engineers, Naval Facilities Engineering Comand, Air Force Civil Engineer Support Agency, 2017 – 66 p.;
- [2] Denys Mykhailovskiy, Ihor Skliarov. Methods of calculation and engineering protection of critical infrastructure objects and other strategic facilities against long-range projectiles // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. – Kyiv: KNUBA, 2023. – Issue 111. – P. 155-171. DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.155-171.;
- [3] Бирбраер А.Н. Экстремальні впливи на споруди / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер – СПб.: видавництво Політехнічного університету, 2009 – 594 с.;
- [4] Brode, H. L.: Numerical solution of spherical blast waves. *Journal of Applied Physics*, Bd. 26(6), 1995. – P. 766 – 775.;
- [5] 32. Henrych, J.: *The Dynamics of Explosion and Its Use*. Elsevier, Amsterdam, 1979. – 558 p.;
- [6] Динамический расчет зданий и сооружений (справочник проектировщика) Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.;
- [7] Kinney, G. F.; Graham, K. J.: *Explosive Shocks in Air*. Springer, New York, 1985 – 269 p. ISBN 978-3-642-86682-1.;
- [8] Косенко В.С., Волощенко О.І., Кушніренко М.Г. Визначення стійкості конструкцій польових фортифікаційних споруд закритого типу від ударної хвилі ядерного вибуху // *Опір матеріалів і теорія споруд*: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 387-402.;
- [9] Д. В. Михайловський, І. О. Склярів, О. А. Комар Порівняння методик розрахунку параметрів вибухово-ударної хвилі для розрахунку споруд інженерного захисту / Михайловський Д. В., Склярів І. О., Комар О. А. // *Будівельні конструкції, теорія і практика* № 16 КНУБА, 2025. – С. 110 - 122. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.110-122>.
- [10] Михайловський Д. В., Білик А. С., Склярів І. О. Розрахунок конструкцій будівель і споруд на дії основних факторів ураження засобів повітряного нападу: Монографія / Михайловський Д. В., Білик А. С., Склярів І. О. Київ: Каравела, 2024. – 92 с. ISBN 978-960-801-874-7