

УДК 624.042:614.8:539.37

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.10>

ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ НА ЗАХИСНІ СПОРУДИ

Поляков Антон Павлович¹, Лапенко Олександр Іванович²

¹ аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
e-mail: 4672349@stud.kai.edu.ua, orcid: 0009-0002-1312-8858

² доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
e-mail: oleksandr.lapenko@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0002-2029-0792

Анотація. Мета. Дослідження спрямоване на чисельне моделювання динамічного впливу вибухової хвилі на захисні споруди. Основною метою є порівняння трьох підходів до розрахунку вибухових навантажень: аналітичного методу, емпіричної моделі Кінгері – Булмаша та моделювання в програмному середовищі Ansys AUTODYN із метою вивчення різних методик моделювання й аналізу поведінки конструкцій під дією вибуху.

Методологія. У роботі використано три методи чисельного аналізу: (1) аналітичний розрахунок за методикою, описаною в наукових джерелах, (2) онлайн-калькулятор, що базується на емпіричних рівняннях Кінгері – Булмаша, та (3) моделювання в Ansys AUTODYN із використанням моделей матеріалів RHT та JWL EOS. Для кожного методу побудовано розрахункові моделі, проведено симуляції та зібрано дані про тиск, імпульс, швидкість фронту та тривалість позитивної фази.

Результати. Отримано детальні розрахунки параметрів вибухової хвилі на різних відстанях від епіцентру для кожного методу. Установлено, що найбільші розбіжності між методами спостерігаються в оцінках відбитого тиску (до 91,5%) та тривалості позитивної фази (до 120%).

Наукова новизна. Уперше виконано системне порівняння трьох методів чисельного моделювання впливу вибуху на залізобетонну конструкцію з оцінкою розбіжностей між результатами та аналізом причин цих відхилень. Запропоновано методику порівняння кожного підходу на основі відносного відхилення від середнього значення.

Практична значущість. Результати дослідження є корисними для інженерів і проєктувальників захисних споруд. Зроблено висновок, що застосування AUTODYN доцільне для точного аналізу складних об'єктів, тоді як аналітичні методи можна використовувати на попередніх етапах.

Ключові слова: вибухова хвиля, захисні споруди, чисельне моделювання, ANSYS AUTODYN, Kingery – Bulmash, імпульс тиску, відбитий тиск, динамічне навантаження.

ВСТУП

У сучасних реаліях, коли збройні конфлікти, терористичні загрози та техногенні аварії стають усе частішими, питання забезпечення надійного захисту людей та об'єктів

інфраструктури набуває особливої ваги [1]. Одним із найбільш небезпечних чинників ураження є вибухова хвиля, що виникає унаслідок детонації вибухових речовин. Вона спричиняє значне динамічне навантаження

на будівельні конструкції, що може призвести до їх часткового або повного руйнування, а також до значних людських жертв і матеріальних утрат. У таких умовах надзвичайно важливими стають розроблення та вдосконалення конструкцій захисних споруд, які здатні ефективно протистояти дії вибухової хвилі [13]. Через складність, небезпеку і високу вартість проведення натурних вибухових експериментів усе більшого значення набувають чисельні дослідження динамічного впливу вибухової хвилі на захисні споруди. Такі дослідження здійснюються за допомогою сучасних комп'ютерних методів, зокрема методу кінцевих елементів, який дає змогу точно моделювати процеси взаємодії вибухової хвилі з різними типами конструкцій та матеріалів.

Чисельне моделювання дає змогу враховувати складну геометрію споруд, фізико-механічні характеристики матеріалів, особливості взаємодії хвилі з ґрунтовою основою, динамічну поведінку елементів конструкцій, а також нелінійні ефекти, зокрема пластичні деформації, поширення тріщин та локальні руйнування. Завдяки цьому дослідники та інженери можуть оцінити ефективність різних типів захисту ще на етапі проектування, що значно економить ресурси та підвищує безпеку.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Упродовж останніх десятиліть проблема динамічного впливу вибухових хвиль на захисні споруди привертає значну увагу дослідників у зв'язку з актуальністю як у воєнному, так і в цивільному контексті. Сучасні чисельні методи моделювання дають змогу поглиблено досліджувати складні процеси взаємодії хвиль із різними типами конструкцій, матеріалів та ґрунтів.

Одним з основоположних аспектів є вивчення взаємодії вибухової хвилі з ґрунтовим середовищем, оскільки саме через ґрунт імпульс передається до підземних або заглиблених конструкцій. Дослідження М. Абір та ін. (2017) зосереджене на моделюванні поширення хвилі в шаруватому ґрунті з урахуванням взаємодії «ґрунт – споруда», що дало змогу краще зрозуміти поведінку підземних конструкцій під дією вибуху та заклало основу для подальших досліджень у цій галузі [2].

З іншого боку, загальні закономірності взаємодії вибухової хвилі з будівельними елементами систематизовано в огляді О.С. Ісаак та ін. (2022), де розглянуто як механізм формування надлишкового тиску, так і сценарії його впливу на будівельні елементи різної геометрії та матеріалу [7]. Це дослідження

забезпечує контекст для інтерпретації локальних навантажень на споруди.

На основі цього контексту А. Катовіч, Е. Ключо (2021) виконали порівняння аналітичних і чисельних підходів до оцінки надлишкового тиску. Їхні результати свідчать про перевагу чисельних моделей за складної геометрії об'єктів, де аналітичні формули можуть дати занижені або спрощені оцінки [4].

Особливу увагу в дослідженнях приділено локальним ефектам, зокрема підсиленню хвилі у вузлових зонах. Так, С. Лі та ін. (2022) виявили явище кутової конвергенції ударної хвилі, за якого тиск у кутах перевищує середні значення в 1,5–2 рази, що має принципове значення для проектування вибухостійких приміщень [11].

Для експериментальної перевірки чисельних моделей А. Морсел та ін. (2025) розробили установку miniBLAST, яка дає змогу тестувати матеріали та елементи конструкцій у лабораторних умовах із реалістичним навантаженням. Такий підхід забезпечує високу точність валідації чисельних моделей [12].

У напрямі оптимізації розрахунків М. Кракко та ін. (2022) запропонували методику використання глибинного навчання для побудови редукованих моделей, що дає змогу значно зменшити обчислювальні витрати за збереження високої точності у моделюванні швидкоплинних процесів [6].

Ще один важливий напрям досліджень – порівняння математичних моделей. А. Кумар і Р. Раджеш (2022) показали, що для реалістичного опису вибухових хвиль у 3D-просторі використання рівнянь Нав'є – Стокса є більш адекватним, аніж класичні рівняння Ейлера, особливо за обліку в'язкості та теплообміну [8].

Національний внесок у цю тематику зроблено українськими дослідниками М.С. Барабаш та О.В. Башинським (2024), які продемонстрували можливості програмного комплексу LIRA-FEM у чисельному моделюванні вибухових впливів. Їхній підхід базується на апроксимації хвильового фронту з використанням заданих імпульсних навантажень [3].

Окремої уваги заслуговує дослідження Т. Ю та ін. (2024), присвячене аналізу розповсюдження вибухової хвилі в тунельному просторі. Застосування методики bench-method дало змогу виявити ефекти відбиття та фокусування хвилі, які суттєво впливають на тиск у замкнених об'ємах [19].

Таким чином, існуючі наукові праці утворюють послідовну систему знань – від загальних закономірностей і аналітичних оцінок

до точних чисельних і експериментальних методів моделювання. Зі зростанням обчислювальних потужностей та інтеграції інтелектуальних алгоритмів відкриваються нові перспективи для ефективного та швидкого прогнозування впливу вибухів на захисні споруди в умовах реального часу.

МЕТА

Мета – чисельне моделювання динамічного впливу вибухової хвилі на захисні споруди за різних підходів до моделювання вибухових навантажень. У рамках дослідження буде проведено порівняння результатів, отриманих за допомогою трьох різних методик чисельного моделювання. Це дасть змогу визначити найбільш ефективні та точні методи для прогнозування поведінки конструкцій під час вибухових впливів, а також оцінити їх відповідність реальним умовам.

Основною метою є дослідження впливу вибухової хвилі на захисні споруди за допомогою різних методик моделювання, що дасть змогу отримати більш точні дані про динамічну поведінку конструкцій. Порівняння результатів допоможе з'ясувати, які підходи забезпечують найбільшу точність в оцінці напружень, деформацій та потенційних зон руйнування конструкцій за вибухових навантажень.

На основі отриманих результатів виконано комплексний аналіз ефективності кожного з підходів до моделювання, що дасть змогу зробити висновки щодо вибору найбільш оптимальних методів для розрахунку вибухових впливів на захисні споруди в майбутньому. Результати дослідження матимуть велике значення для вдосконалення методів проектування та підвищення безпеки захисних конструкцій в умовах потенційних вибухових загроз.

Методи та інструменти дослідження. У цьому дослідженні для аналізу динамічного впливу вибухової хвилі на захисні споруди використано три методи чисельного моделювання, кожен з яких дає змогу розрахувати навантаження на конструкції від вибухових навантажень. Порівняння результатів, отриманих за допомогою цих методів, дає змогу оцінити і порівняти різні підходи для оцінки стійкості захисних споруд щодо вибухових впливів. Нижче наведено детальний опис кожного з використаних методів та інструментів, що були застосовані для досягнення поставленої мети дослідження.

Метод 1: Метод, наведений в [1]

Першим методом, використаним у цьому дослідженні, є підхід обчислення, що

наведений в [1]. Цей метод застосовується для розрахунку динамічних навантажень від вибухів на конструкції. Підхід включає обчислення динамічних навантажень, які залежить від часу, що відображають наближені умови вибухових впливів, ураховуючи параметри вибуху, такі як тип вибуху та вибухової речовини, відстань від епіцентру, а також характеристики ґрунтів. Завдяки використанню цього методу можна отримати результати для подальшого визначення динамічної поведінки конструкцій, включаючи максимальні напруження, деформації та зони руйнування матеріалів.

Метод 1 дає змогу проводити оцінку стійкості різних типів захисних споруд, таких як укриття, стіни будівель, споруди на відкритих майданчиках тощо. Оскільки метод ґрунтується на перевірених і затверджених чисельних моделях, він є широко використовуваним у галузі інженерії для розрахунку вибухових навантажень на захисні споруди на території України.

Метод 2: Parameter Calculator [18]

Цей інструмент розраховує параметри вибухової хвилі, що виникає при напівсферичному вибуху на відкритій поверхні, на основі емпіричних рівнянь Кінгері – Булмаша.

Метод 3: Розрахунок впливу в Ansys AUTODYN

Третій метод, який було використано в дослідженні, базується на застосуванні Ansys AUTODYN – одного з найпотужніших інструментів для моделювання вибухових та ударних навантажень. AUTODYN дає змогу здійснювати розрахунки взаємодії вибухової хвилі з конструкціями в реальному часі, ураховуючи складні фізичні та механічні процеси, що виникають під час вибуху. Цей метод дає можливість створювати тривимірні моделі об'єктів і здійснювати детальний аналіз їхньої поведінки під час динамічних навантажень.

Однією з основних переваг використання Ansys AUTODYN є його здатність ураховувати нелінійні ефекти, такі як пластичні деформації матеріалів, тріщини та інші механізми руйнування. Цей інструмент також дає змогу моделювати процеси поширення вибухових хвиль через різні середовища (повітря, ґрунт, матеріали конструкцій) і враховувати їх взаємодію, що є критично важливим для оцінки точних результатів під час вибуху.

Розрахунки, проведені в Ansys AUTODYN, дають змогу отримати не лише дані про максимальні значення напружень і деформацій, а й здійснити точний прогноз пошкоджень, визначити зони руйнування та оцінити ефективність конструктивних рішень. Це дає змогу

проводити глибокий аналіз і оптимізацію захисних споруд для зменшення наслідків вибухових впливів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вихідні дані. Для всіх методів обчислення за основу взято одну геометричну модель. Розміри вказано в мм. Поверхня основи жорстка. Конструкція задана як суцільне залізобетонне тіло розмірами 19600х32200х16200(н) мм. Домен заповнений атмосферним повітрям, габарити домену – 45600х43200х21700(н) мм (рис. 1).

У вказаному розділі розглядаються основні принципи розрахунків елементів та перевірки несучих конструкцій на вплив основних факторів ураження від вибухових навантажень (вибухово-ударна хвиля – ВУХ).

Для ВУХ: Тиск від повітряної вибухової хвилі визначається переважно залежно від маси вибухового заряду, відстані до центру вибуху та умов середовища.

Метод 1. Ця методика наведена в [1].

Вплив повітряного вибуху залежить від так званої приведенної відстані, яка розраховується за формулою:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q_{ef}}},$$

де R – відстань точки вибуху від об'єкта, що досліджується; ефективна маса $Q_{ef} = (1 - \varepsilon)\alpha M_{ex}$,

ε – частка енергії вибуху, що витрачається на утворення воронки (для скельних порід $\varepsilon = 0,05$; для м'яких ґрунтів $\varepsilon = 0,2$; якщо вибух йде у повітрі без утворення воронки $\varepsilon = 0$);

α – відношення питомої енергії вибуху вибухової речовини до питомої енергії тротилу.

Надлишковий тиск на фронті вибухової хвилі визначається за формулою:

$$\Delta p_f \begin{cases} \left(\frac{0.92}{\bar{R}} + \frac{3.5}{\bar{R}^2} + \frac{10.6}{\bar{R}^3} \right) \text{ при } 1,2 \leq \bar{R} < 17,8 \text{ м/кг}^{1/3} \\ 4,2\bar{R}^{-1,45} \text{ м/кг}^{1/3} \text{ при } 17,8 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м/кг}^{1/3} \end{cases}$$

Наведені формули застосовні, якщо $R > 3$ м. На утворення ВУХ впливають також, чи є вибух повітряним чи наземним, форма заряду ВР, його заглиблення у ґрунт перед вибухом.

Тривалість фази стиснення t , у секундах при цьому дорівнює

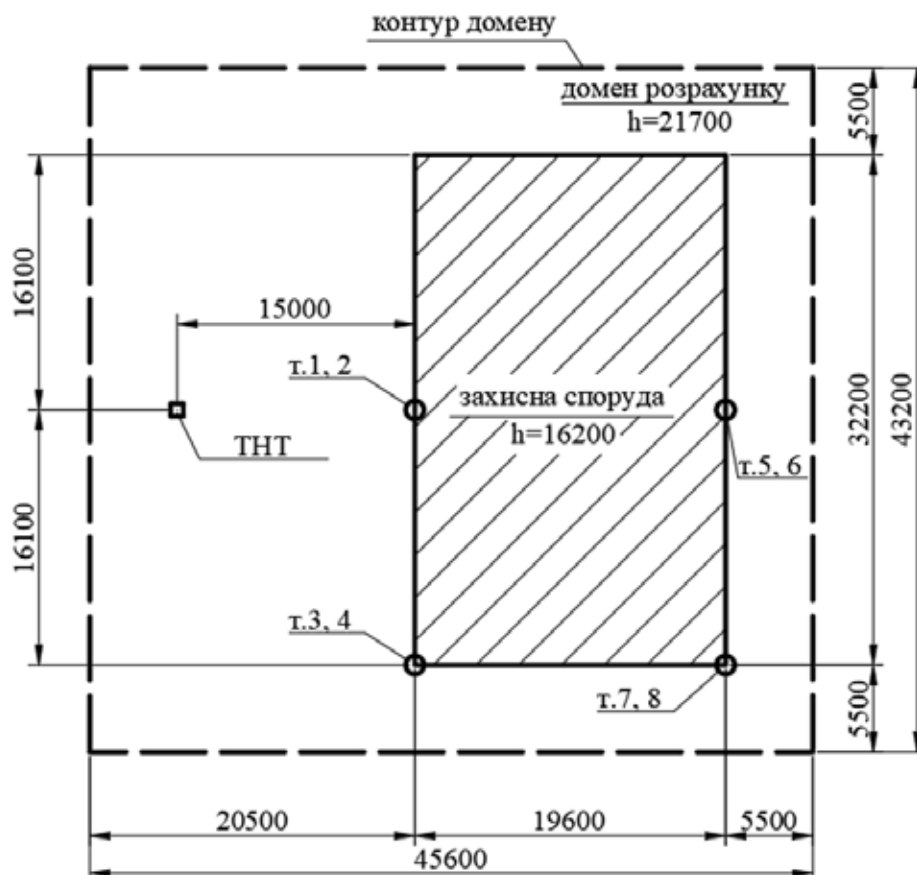


Рис. 1. Геометрична модель

$$\tau_+ \begin{cases} 1,7 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{Q_{ef} \sqrt{\bar{R}}} \text{ при } 1,2 \leq \bar{R} < 10 \text{ м/кг}^{1/3} \\ 6,594 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{Q_{ef} [\lg 0,4 \bar{R}]^{0,4}} \text{ при } 10 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м/кг}^{1/3} \end{cases}$$

Оскільки тривалість дії ВУХ у разі детонаційних вибухів зазвичай укриває мала, коливання і міцність конструкцій можна визначати за допомогою теореми імпульсів [1], для чого використовується питомий імпульс фази стиснення і +, який чисельно рівний площі під кривою тиску у цій фазі (рис. 5.7). При $12 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м/кг}^{1/3}$

$$i_+ = 350 \frac{\sqrt[3]{Q_{ef}}}{\bar{R}}, \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Розподіл у фазі τ_+ може бути спрощено прийнятий за трикутним законом (рис. 1). Негативна фаза τ_- , як правило, менш руйнівна для масивних інженерних захисних конструкцій, тому може не враховуватися. Для більш точних розрахунків поширеними є залежності, відомі як формули Кінгері – Балмаша.

Вихідні дані Метод 1. Значення цих параметрів взято для розрахунку впливу від вибуху, який розміщений на відстані 15 м від споруди (табл. 1). Еквівалент поверхневого вибуху прийнятий виходячи з характеристик бойової частини найпоширеніших крилатої ракети Р-500 у тротиловому еквіваленті становить 718,2 кг.

Результати розрахунків Метод 1. У межах проведеного розрахунку було здійснено оцінку впливу повітряного вибуху на об'єкт, розташований на відстані 15 м від епіцентру вибуху і більше. Розрахунки базувалися на методичних підходах до визначення параметрів вибухово-ударної хвилі (ВУХ) з урахуванням геометричних і фізичних

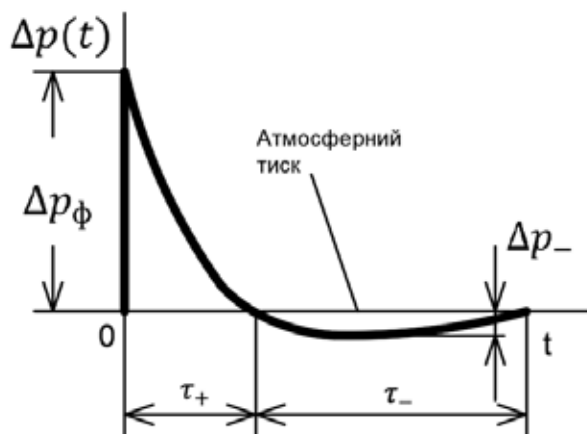


Рис. 2. Параметри часу і тиску детонаційної ВУХ у повітрі [1]

Таблиця 1
Вихідні дані для розрахунку Метод 1

Найменування	Значення
ε, частка енергії вибуху, що витрачається на утворення воронки	0
α, відношення пит. енергії ВВ до енергії тротилу TNT	1,14
Маса ВР Мех, кг	630
Ефективна маса, Q _{ef} , кг	718,2
R, відстань точки вибуху від об'єкта, що досліджується, м	див. Таблиця 1.2

характеристик вибуху. Обчислення показали залежність надлишкового тиску від відстані до вибуху (табл. 2).

Найбільше значення надлишкового тиску спостерігається на відстані 15 м від епіцентру вибуху – 405 кПа. Зі збільшенням відстані тиск стрімко зменшується: на 22 м він уже знижується до 167 кПа, а на 41,46 м – до 47 кПа.

Це відповідає типовому експоненційному затуханню сили ударної хвилі з відстанню.

Питомий імпульс фази стиснення відображає загальний «ударний ефект» хвилі за час стиснення: найбільший імпульс – 1871 Па·с при 15 м; мінімальний – 677 Па·с при 41,46 м. Це важливий показник за оцінки динамічної дії на захисні споруди: що більший імпульс, то вища ймовірність перевищення меж деформацій чи руйнування конструкції.

Час дії позитивної фази збільшується з відстанню – від 20 мс на 15 м до 33 мс на 41,46 м.

Це очікуване явище, оскільки хвиля зменшується в амплітуді, але «розтягується» в часі зі збільшенням дистанції.

5. Порівняння з пороговим тиском для стін
Метод 2. Ця методика наведена у [18].

Калькулятор вибухових параметрів за Кінгері – Балмашем використовується для розрахунку характеристик повітряної вибухової хвилі, що виникає унаслідок напівсферичного вибуху на вільній поверхні. Цей інструмент ґрунтується на емпіричних формулах, розроблених Чарльзом Кінгері та Джеральдом Балмашем, і дає змогу визначити такі параметри, як:

- маса заряду для тиску (кг) – TNT Weight for Pressure (kg);
- маса заряду для імпульсу (кг) – TNT Weight for Impulse (kg);
- прямий тиск (кПа) – Incident Pressure (kPa);
- імпульс прямої хвилі (кПа·мс) – Incident Impulse (kPa-ms);

Таблиця 2

Результати розрахунків Метод 1

№ точки т	Віднесення від точки вибуху м	Приведена відстань, м/кг ^{1/3}	Надлишковий тиск на фронті ВУХ, кПа (кН/м ²)	Значення ΔРотр, для стін з пройомами менше 10%, кПа (кН/м ²)	Тривалість фази стиснення, мс	Питомий імпульс фази стиснення, кПа.мс
1	15	1,675	405	1685	20	1871
2	22,08	2,4656	166	519	24	1271
3	22	2,4566	167	523	24	1276
4	27,32	3,0507	105	290	27	1027
5	34,6	3,8636	66	165	30	811
6	38,2	4,2656	54	131	31	735
7	38,16	4,2611	55	133	31	736
8	41,46	4,6296	47	111	33	677

– відбитий тиск (кПа) – Reflected Pressure (kPa);
 – імпульс відбитої хвилі (кПа·мс) – Reflected Impulse (kPa·ms);
 – час прибуття (мс) – Time of Arrival (ms);
 – тривалість позитивної фази (мс) – Positive Phase Duration (ms);
 – швидкість фронту ударної хвилі (м/с) – Shock Front Velocity (m/s).

Формули, створені Кінгері та Балмашем, широко застосовуються в інженерній практиці для прогнозування надлишкового тиску вибуху та інших характеристик ударної хвилі на певній відстані від джерела. Вони визнані стандартом у сфері розрахунків впливу вибухів на конструкції у вільному полі. Ці рівняння базуються на результатах випробувань із зарядами масою від менше ніж 1 кг до понад 400 000 кг.

Слід зазначити, що калькулятор розрахований тільки на моделювання напівсферичних наземних вибухів.

Рівняння Кінгері – Балмаша було розроблено спеціально для вибухів тротилу (TNT). У зв'язку із цим широко використовується поняття «еквівалент тротилу», що дає змогу порівнювати вибухову потужність різних речовин. Для цього фактичну масу вибухової речовини множать на певний коефіцієнт, визначений теоретично або експериментально. У даному інструменті використано значення, рекомендовані в документі AASTP-1.

Вихідні дані Метод 2. Значення цих параметрів були взяті для розрахунку впливу від вибуху аналогічні Методу 1. Вихідні дані для Методу 2 див. таблицю 3.

Результати розрахунків Метод 2.

Розрахунки були виконані за допомогою

Таблиця 3

Вихідні дані для розрахунку Метод 2

Найменування	Значення
Charge Weight (kg):	718,2
Range (m):	див. Таблиця 2.2
Explosive Material	TNT

онлайн-калькулятора <https://unsafeguard.org/un-safeguard/kingery-bulmash>. Результати розрахунків див. у табл. 4.

Для оцінки впливу було прийнято еквівалентну тротилову масу заряду в 718,2 кг, аналогічну до тієї, що використовувалась у Методі 1. Обчислення виконувалися на різних відстанях від епіцентру вибуху, що дало змогу отримати комплексне уявлення про просторовий розподіл основних динамічних параметрів хвилі.

Зокрема, були визначені такі ключові величини: прямий (інцидентний) та відбитий тиск, імпульси хвиль, час прибуття ударного фронту до контрольної точки, швидкість розповсюдження хвилі, а також тривалість позитивної фази. Результати показують, що найбільші значення тиску та імпульсу спостерігаються на найменшій відстані (15 м), де інцидентний тиск перевищує 420 кПа, а відбитий – понад 1809.44 кПа.

У міру віддалення від джерела вибуху ці параметри закономірно знижуються. Наприклад, на відстані близько 38 м інцидентний тиск зменшується до 57–58 кПа, а швидкість фронту ударної хвилі становить приблизно 415 м/с. Також помітне поступове зростання тривалості позитивної фази, що досягає понад 30 мс на дальніх точках.

Метод 3: Розрахунок впливу в Ansys AUTODYN. Ansys AUTODYN – це

Таблиця 4

Результати розрахунку Метод 2

№ точки T	Range (m)	TNT Weight for Pres-sure (kg):	Incident Pressure (kPa):	Reflected Pressure (kPa):	Time of Arrival (ms):	Shock Front Velocity (m/s):	TNT Weight for Impulse (kg):	Incident Impulse (kPa-ms):	Reflected Impulse (kPa-ms):	Positive Phase Duration (ms):
1	15	718.2	427.05	1809.44	10.90	727.69	718.2	1427.84	4057.51	0.00
2	22.08	718.2	176.86	569.72	22.34	537.67	718.2	990.31	2530.99	0.00
3	22	718.2	178.29	575.69	22.19	538.95	718.2	993.60	2541.96	0.00
4	27.32	718.2	111.67	316.33	32.69	475.17	718.2	818.40	1969.78	25.70
5	34.6	718.2	69.37	175.72	48.91	429.17	718.2	665.81	1501.59	30.11
6	38.2	718.2	57.51	140.44	57.50	415.21	718.2	610.64	1342.73	31.66
7	38.16	718.2	57.62	140.76	57.40	415.35	718.2	611.20	1344.31	31.64
8	41.46	718.2	49.50	117.82	65.50	405.50	718.2	568.18	1225.02	32.85

потужний програмний інструмент, призначений для моделювання складних фізичних явищ із високою динамікою, таких як вибухи, удари, фрагментація та ударні хвилі. Під час моделювання вибуху TNT у повітрі та його подальшого впливу на залізобетонну конструкцію AUTODYN дає змогу об'єднати декілька чисельних методик у єдину обчислювальну схему для отримання точних результатів у режимі динамічного навантаження. Геометричний вигляд розрахункової моделі див. рис. 1 і 3.

Вихідні дані Метод 3. Математичні моделі матеріалів були задані відповідно

до [9; 10; 14–17]. Для моделювання вибуху вибухової речовини, такої як тринітротолуол (TNT), було використано спеціалізовану модель матеріалу типу High Explosive Burn у поєднанні з EOS (Equation of State) типу JWL (Jones – Wilkins – Lee). Вихідні дані для розрахунку Метод 3 див. табл. 5.

Початкова ініціація вибуху задавалася у вигляді точкового джерела, розміщеного над поверхнею землі.

Для просторового розповсюдження хвилі тиску в повітрі була застосована Eulerian-сітка, що забезпечує описання ударних хвиль, розповсюдження детонаційних газів

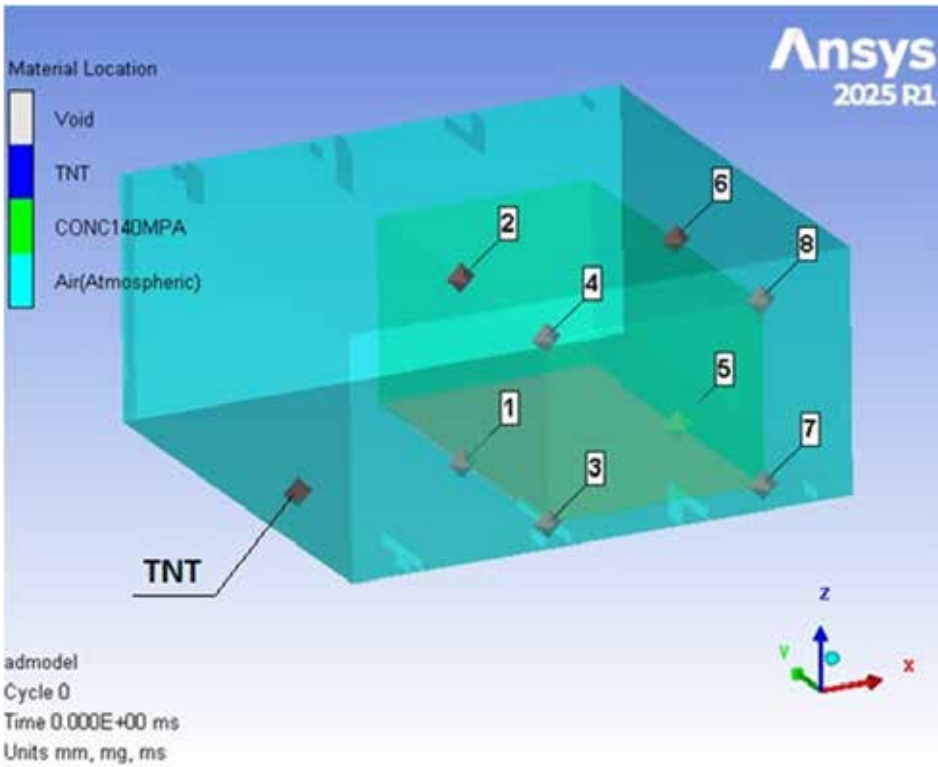


Рис. 3. Розрахункова модель в ANSYS AUTODYN

Таблиця 5

Основні вихідні дані для розрахунку Метод 3

Найменування	Показник
Вара ТНТ, кг	718,2
Контакти між елементами задані	Rough
Refresh – Text freq.	1
Save	
Start time, ms	0
End time, ms	330
Increment	0.001
Timestep Option	
Safety factor 0.667	0.667
Початковий тис повітря, kPa	98

та їх взаємодії з навколишнім середовищем. Чарунка просторової сітки становить 40 см.

Повітря в AUTODYN задано як ідеальний газ із параметрами атмосферного повітря з відповідною моделлю EOS, наприклад Ideal Gas EOS. Це дає змогу врахувати зміну тиску та температури внаслідок проходження ударної хвилі. Ейлерова сітка повітря взаємодіє з Lagrangian-об'єктами (тобто твердими тілами) через спеціальний Fluid-Structure Interaction (FSI)-інтерфейс.

Залізобетонні елементи моделюються у Lagrangian-формулюванні, де об'єкти мають фіксовану сітку, що переміщується разом із матеріалом. Для бетону часто використовується модель матеріалу RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) або Concrete Johnson-Holmquist (JH-2), яка враховує нелінійні ефекти пластичності, руйнування, тріщиноутворення і зниження міцності за динамічних навантажень.

Розрахунковий домен заданий як паралелепіпед розмірами 45,6x43,2x21,7(h).

Нижня грань (основа) задана Rigid, всі інші грані Flow Out.

Результати розрахунків Метод 3. Розміщення Gauge (точок) див. рис. 1 і 3.

Після обчислення розрахункової моделі були отримані такі результати розрахунків.

Результати показали (рис. 4 і 5).

1. Загальна тенденція ослаблення вибухової хвилі

Зі збільшенням відстані від епіцентру Reflected Pressure та Reflected Impulse значно зменшуються, що відповідає фізиці поширення ударної хвилі у повітрі:

На 15 м: Reflected Pressure = 620 кПа, Impulse = 4309 кПа·мс

На 41.46 м: Reflected Pressure = 20 кПа, Impulse = 346 кПа·мс

Це показує різке зниження навантаження вже на перших десятках метрів.

2. Непропорційне зменшення тиску й імпульсу

Хоча піковий тиск падає швидко, імпульс зменшується повільніше, що важливо для аналізу впливу на конструкції:

На 15 м: $P = 620$ кПа, $I = 4309$ кПа·мс

На 34.6 м: $P = 17$ кПа (зменшення ≈ 36 разів), $I = 351$ кПа·мс (зменшення ≈ 12 разів)

Імпульс пов'язаний із тривалістю дії, отже, навіть за низького тиску вплив може залишатися критичним.

3. Поведінка позитивної фази

Тривалість позитивної фази зменшується зі зростанням відстані до певного моменту, а потім знову збільшується:

15 м $\rightarrow$ 13.9 мс, 22 м $\rightarrow$ 8.7 мс

Це типовий ефект для повітряної ударної хвилі: хвиля розтягується, втрачає амплітуду, але збільшує тривалість

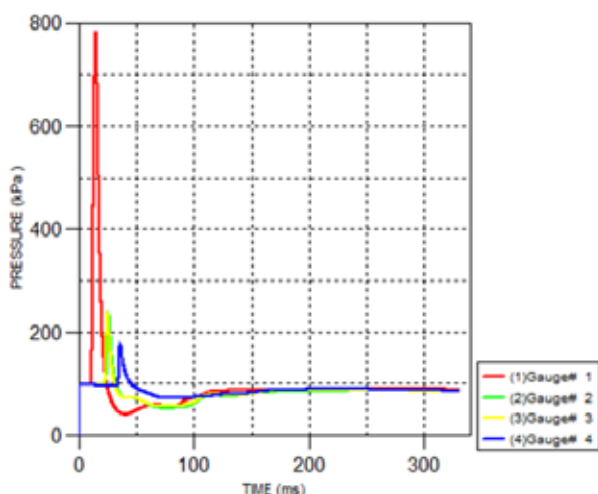


Рис. 4. Показники тиску на фасадному боці споруди

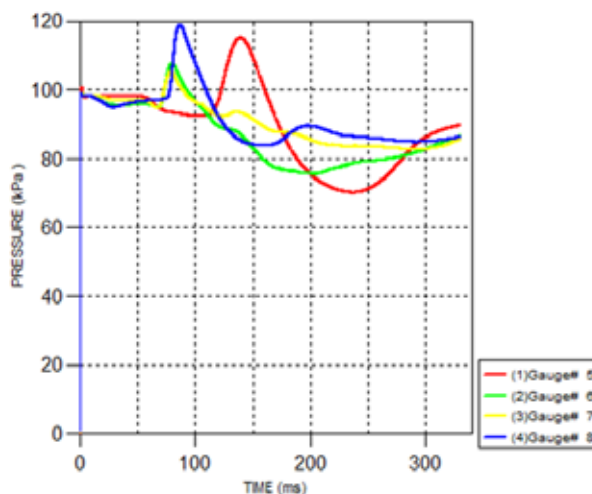


Рис. 5. Показники тиску на тильному боці споруди

дії – актуально під час аналізу довготривалих навантажень.

4. Швидкість ударного фронту

Зміна швидкості фронту ударної хвилі з відстанню:

15 м → 276 м/с, 22 м → 328 м/с, а потім, 41.46 м → 54 м/с

Така нерівномірна зміна швидкості виникає через те, що точки розміщуються з різних боків будівлі по відношенню до епіцентру вибуху і відстані від поверхні основи.

5. Показник тиску залежно від розміщення точок

Результати розрахунків на **фасадному боці** споруди показали різке зменшення тиску залежно від відстані до епіцентру (рис. 4 і 5). Також значення тиску в точках 2 і 3 майже однакове, це свідчить про те, що значення тиску не залежить від того, чи це середина верхнього ребра будівлі чи кутова. Результати на **тильному боці** будівлі показали, ефект «огинання» вибухової хвилі по поверхні конструкції і поступове зменшення показнику тиску залежно від довжини траєкторії огинання, а не прямої відстані від епіцентру вибуху (значення в табл. 6 Range).

Значення **Reflected Impulse (kPa-ms)** було розраховано формулою імпульсу як трикутна апроксимація:

$$I = \frac{1}{2} \cdot P_{max} \cdot t_p$$

де I – імпульс тиску, кПа·мс або кН·мс/м²;

P_{max} – піковий тиск, кПа;

t_p – тривалість позитивної фази, мс.

Оцінка результатів розрахунків трьох методів. Для оцінки узгодженості результатів, отриманих різними методами, застосовано аналіз відносного відхилення кожного значення від середнього арифметичного [20].

Цей підхід дає змогу кількісно визначити ступінь розбіжності між результатами розрахунків.

Середнє арифметичне для кожного результату обчислюється за формулою:

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + x_3) / 3,$$

де x – значення результату розрахунку.

Відносне відхилення кожного значення від середнього визначається як:

$$\delta_i = |x_i - \bar{x}| / x / \bar{x} \times 100\%,$$

для $i = 1, 2, 3$

Середнє відсоткове відхилення обчислюється як:

$$\delta_{avg} = (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) / 3.$$

Такий підхід забезпечує узагальнену чисельну оцінку відхилення між трьома методами розрахунку.

Аналіз результатів розрахунків (табл. 7) (рис. 6) показав таке:

Reflected Pressure (Відбитий тиск)

Середнє відхилення: ~61%, максимальне до 91,5%.

Причини: методи 1 і 2 не враховують геометрію споруди, орієнтацію, дифракцію хвиль. AUTODYN моделює реальні фізичні ефекти, включаючи накладення і відбиття хвиль.

Reflected Impulse (Відбитий імпульс)

Середнє відхилення: 40–60%, максимальне до 89,5%.

Причини: у методах 1–2 використовується спрощена апроксимація трикутника. AUTODYN ураховує криву тиску у часі, що відображає складну фізику вибуху.

Positive Phase Duration (Тривалість позитивної фази)

Середнє відхилення – 60–80%, максимальне – до 120%.

Таблиця 6

Результати розрахунку Метод 3

№ точки т	Range (m)	Range (m)	TNT Weight for Pressure (kg)	Incident Pressure (kPa)	Reflected Pressure (kPa)	Time of Arrival (ms)	Shock Front Velocity (m/s)	TNT Weight for Impulse (kg)	Incident Impulse (kPa-ms)	Reflected Impulse (kPa-ms)	Positive Phase Duration (ms)
1	15	15	718.2	–	620	10.2	276.06	718.2	–	4309	13.9
2	22.08	22.08	718.2	–	139	22.8	330.05	718.2	–	646.35	9.3
3	22	22	718.2	–	141	22.2	328.02	718.2	–	613.35	8.7
4	27.32	27.32	718.2	–	80	32.7	244.35	718.2	–	536	13.4
5	34.6	34.6	718.2	–	17	121.3	9.8	718.2	–	351.05	41.3
6	38.2	38.2	718.2	–	9.4	72.7	105.79	718.2	–	108.1	23
7	38.16	38.16	718.2	–	7.1	72.3	62.876	718.2	–	75.615	21.3
8	41.46	41.46	718.2	–	20	77.4	54.403	718.2	–	346	34.6

Таблиця 7

Результати порівняльних розрахунків

	№ точки Т	Середнє	Розбіж- ність 1 (%)	Розбіж- ність 2 (%)	Розбіж- ність 3 (%)	Сер. роз- біжність (%)
Reflected Pressure (kPa):	1	944,8	57,1	91,5	34,4	61,0
	2	291,6	43,1	95,4	52,3	63,6
	3	294,6	43,3	95,4	52,1	63,6
	4	167,1	37,2	89,3	52,1	59,5
	5	86,2	23,5	103,8	80,3	69,2
	6	67,9	20,5	106,7	86,2	71,1
	7	67,6	18,7	108,2	89,5	72,1
	8	61,6	23,7	91,2	67,5	60,8
Time of Arrival (ms):	1	10,6		3,3	3,3	3,3
	2	22,6		1,0	1,0	1,0
	3	22,2		0,0	0,0	0,0
	4	32,7		0,0	0,0	0,0
	5	85,1		42,5	42,5	42,5
	6	65,1		11,7	11,7	11,7
	7	64,9		11,5	11,5	11,5
	8	71,5		8,3	8,3	8,3
Shock Front Velocity (m/s):	1	501,9		45,0	45,0	45,0
	2	433,9		23,9	23,9	23,9
	3	433,5		24,3	24,3	24,3
	4	359,8		32,1	32,1	32,1
	5	219,5		95,5	95,5	95,5
	6	260,5		59,4	59,4	59,4
	7	239,1		73,7	73,7	73,7
	8	230,0		76,3	76,3	76,3
Reflected Impulse (kPa-ms):	1	3412,5	45,2	18,9	26,3	30,1
	2	1482,8	14,3	70,7	56,4	47,1
	3	1477,1	13,6	72,1	58,5	48,1
	4	1177,6	12,8	67,3	54,5	44,8
	5	887,9	8,7	69,1	60,5	46,1
	6	728,6	0,9	84,3	85,2	56,8
	7	718,6	2,4	87,1	89,5	59,7
	8	749,3	9,7	63,5	53,8	42,3
Positive Phase Duration (ms):	1	11,3	77,0	100,0	23,0	66,7
	2	11,1	116,2	100,0	16,2	77,5
	3	10,9	120,2	100,0	20,2	80,1
	4	22,0	22,5	16,6	39,2	26,1
	5	33,8	11,3	10,9	22,2	14,8
	6	28,6	8,6	10,9	19,4	13,0
	7	28,0	10,8	13,1	23,9	15,9
	8	33,5	1,4	1,9	3,3	2,2

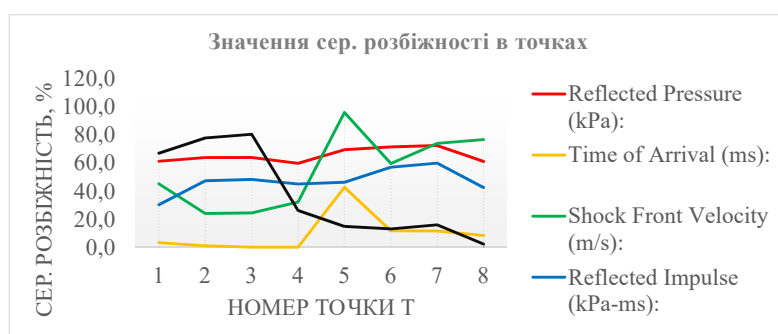


Рис. 6. Значення сер. розбіжності в точках

Причини: аналітичні моделі задають сталу тривалість. AUTODYN ураховує дифракцію, рефлексію, топологію конструкції.

Shock Front Velocity (Швидкість фронту ударної хвилі)

Середнє відхилення – 30–50%, максимальне – до 76%.

Причини: Метод 1 і 2 моделюють поширення у рівномірному середовищі. AUTODYN ураховує взаємодію хвиль з об'єктами, зміни швидкості внаслідок розсіювання.

Time of Arrival (Час прибуття ударної хвилі)

Середнє відхилення – 8–10%, в окремих точках – до 42,5%.

Причини: у складній геометрії траєкторія хвилі змінюється. AUTODYN ураховує огинання, затримку в тіньових зонах, рефракцію, що виникає внаслідок складної геометрії об'єкта.

ВИСНОВКИ

1. Метод, у якому застосовується ANSYS AUTODYN, має потенціал для обчислення впливу вибухової хвилі на більш складні конструкції. 2. Аналітичні методи можуть використовуватися на етапах попередньої оцінки, однак демонструють значні розбіжності в ускладнених параметрах. 3. Розбіжності між методами у параметрах імпульсу, тиску та тривалості дії можуть досягати понад 100%, що неприпустимо під час проектування відповідальних об'єктів. Дані дослідження показують, що ця галузь потребує більш глибокого і детальнішого експериментального та числового дослідження.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Для точного аналізу застосовувати AUTODYN за складних конфігурацій об'єктів.
2. Для верифікації результатів бажано комбінувати два методи: спрощений і повнофізичний.
3. Розробити коригувальні коефіцієнти для Методу 1 і 2 на основі емпіричних відхилень.
4. Упровадити контроль за допустимим рівнем розбіжності між методами.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника : монографія / М.В. Коваль та ін. ; за ред. А.С. Білика. Київ : Генеральний штаб Збройних сил України, 2023. 185 с.
- [2] Abir M., Arumugam D., Dhana Sekaran, Subash T.R. Numerical simulation of blast wave propagation in layered soil featuring soil-structure

interaction. *Eccomas Proceedia. Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering : 6th ECCOMAS Thematic Conference* (Rhodes Island, Greece, 15–17 June 2017) / eds. M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, 2017. P. 4752–4765.

[3] Barabash M.S., Bashynskiy O.V. Some approaches to modelling blast wave impact on structures in LIRA-FEM. *Опис матеріалів і теорія споруд*. 2024. № 113. С. 241–249. DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.241-249.

[4] Catovic A., Kljuno E. Comparison of analytical models and review of numerical simulation method for blast wave overpressure estimation after the explosion. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2021. Vol. 6, No. 1. P. 748–758. DOI: 10.25046/aj060187.

[5] Chapra S.C., Canale R.P. Numerical methods for engineers. 8th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 992 p.

[6] Cracco M., Stabile G., Lario A. et al. Deep learning-based reduced-order methods for fast transient dynamics [Електронний ресурс]. arXiv. 2022. 15 груд. Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2212.07737>.

[7] Isaac O.S., Alshammari O.G., Pickering E.G., Clarke S.D., Rigby S.E. Blast wave interaction with structures – An overview. *International Journal of Protective Structures*. 2022. Vol. 14(4) 584–620. С. 1–47. DOI: 10.1177/20414196221118595.

[8] Kumar A., Rajesh R. Blast waves in two and three dimensions: Euler versus Navier–Stokes equations. *Journal of Statistical Physics*. 2022. Vol. 188, No. 2. Article ID: 12. DOI: 10.1007/s10955-022-02933-3.

[9] Laine L., Sandvik A. Derivation of mechanical properties for sand. *Proceedings of the 4th SILOS Conference*. Singapore : CI-Premier, 2004. P. 361–367.

[10] Lee E.L., Finger M., Collins S.A. JWL equations of state coefficients for high explosives. Livermore (USA) : Lawrence Livermore National Laboratory, 1973. 17 p. (UCID-16189).

[11] Li X., Chen H., Yin J., Wang Z. Corner convergence effect of enclosed blast shock wave and high-pressure range. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 22. Article ID: 11341. DOI: 10.3390/app122211341.

[12] Morsel A., Masi F., Marché E. et al. miniBLAST: a novel experimental setup for laboratory testing of structures under blast loads. *Experimental Techniques*. 2025. DOI: 10.1007/s40799-024-00771-4.

[13] Resistance of structures to explosion effects: review report of testing methods / Kevin C., Ans van Doormaal, Christof Haberacker, Götz Hüsken, Martin Larcher, Arja Saarenheimo, George Solomos, Alexander Stolz, Laurent Thamie, Georgios Valsamos ; European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013. 78 p. (EUR 26449 EN). DOI: 10.2788/57271

[14] Riedel W. Beton unter dynamischen Lasten / W. Riedel ; Fraunhofer EMI. Stuttgart : IRB-Verlag, 2004. – 280 p.

[15] Riedel W., Schmolinske E., Thoma K. Numerical assessment for impact strength. *International Journal of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36. P. 283–293.

[16] Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., Schmolinske E. Penetration of reinforced concrete. *Proceedings of the International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures (ISIEMS'99)*. 1999. P. 315.

[17] Rogers G.F.C., Mayhew Y.R. Thermodynamic and transport properties of fluids: SI units. 4th ed. Oxford : Blackwell Science, 2000. 392 p.

[18] United States. Department of Defense. UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosions : technical report. Washington, D.C. : Department of Defense, 2008. Change 2, 1 Sept. 2014.

[19] Yu T., Sun J., Wang J. et al. Study on the propagation law and waveform characteristics of a blasting shock wave in a numerical simulation of blast wave propagation in layered soil featuring soil-structure interaction. *Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* : Proc. 6th ECCOMAS Thematic Conf., Rhodes Island, Greece, 15–17 June 2017 / за ред. M. Papadrakakis, M. Fragiadakis. 2017.

REFERENCES

[1] Koval, M.V., Koval, V.V., Bilyk, A.S., Kotsiuruba, V.I., & Kubrakov, O.M. (2023). *Osnovy inzhenernoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury enerhetychnoi haluzi Ukrainy vid zasobiv povitrianoho napadu protyivnyka [Fundamentals of engineering protection of critical infrastructure in Ukraine's energy sector from enemy air attacks]*. Kyiv: General Staff of the Armed Forces of Ukraine.

[2] Abir, M., Arumugam, D., Dhana Sekaran, & Subash, T.R. (2017). Numerical simulation of blast wave propagation in layered soil featuring soil-structure interaction. In M. Papadrakakis & M. Fragiadakis (Eds.), *Proceedings of the 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2017)*, Rhodes Island, Greece, June 15–17 (pp. 4752–4765). ECCOMAS.

[3] Barabash, M.S., & Bashynskiy, O.V. (2024). Some approaches to modelling blast wave impact on structures in LIRA-FEM. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 113, 241–249. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.241-249>

[4] Catovic, A., & Kljuno, E. (2021). *Comparison of analytical models and review of numerical simulation method for blast wave overpressure estimation after the explosion*. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(1), 748–758. <https://doi.org/10.25046/aj060187>

[5] Chapra, S.C., & Canale, R.P. (2014). *Numerical methods for engineers* (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

[6] Cracco, M., et al. (2022, December 15). *Deep learning-based reduced-order methods for fast transient dynamics*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2212.07737>

[7] Isaac, O.S., et al. (2022). *Blast wave interaction with structures – An overview*. *International Journal of Protective Structures*, 14(4) 584–620, 1–47. <https://doi.org/10.1177/20414196221118595>

[8] Kumar, A., & Rajesh, R. (2022). *Blast waves in two and three dimensions: Euler versus Navier–Stokes equations*. *Journal of Statistical Physics*, 188(2), Article 12. <https://doi.org/10.1007/s10955-022-02933-3>

[9] Laine, L., & Sandvik, A. (2004). *Derivation of mechanical properties for sand*. In *Proceedings of the 4th SILOS Conference* (pp. 361–367). Singapore: CI-Premier LTD.

[10] Lee, E.L., Finger, M., & Collins, S.A. (1973). *JWL equations of state coefficients for high explosives*. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory.

[11] Li, X., et al. (2022). *Corner convergence effect of enclosed blast shock wave and high-pressure range*. *Applied Sciences*, 12(22), Article 11341. <https://doi.org/10.3390/app122211341>

[12] Morsel, A., et al. (2025). *miniBLAST: A novel experimental setup for laboratory testing of structures under blast loads*. *Experimental Techniques*. <https://doi.org/10.1007/s40799-024-00771-4>

[13] Kevin, C., et al. (2013). *Resistance of structures to explosion effects: Review report of testing methods* (EUR 26449 EN). European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen. <https://doi.org/10.2788/57271>

[14] Riedel, W. (2004). *Beton unter dynamischen Lasten*. Stuttgart: IRB-Verlag.

[15] Riedel, W., Schmolinske, E., & Thoma, K. (2009). *Numerical assessment for impact strength*. *International Journal of Impact Engineering*, 36, 283–293.

[16] Riedel, W., et al. (1999). *Penetration of reinforced concrete*. In *Proceedings of ISIEMS'99* (p. 315).

[17] Rogers, G.F.C., & Mayhew, Y.R. (2000). *Thermodynamic and transport properties of fluids: SI units (4th ed.)*. Oxford: Blackwell Science.

[18] Department of Defense. (2008). UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosions (Change 2, 2014). Washington, D.C.: U.S. Department of Defense.

[19] Yu, T., et al. (2024). *Study on the propagation law and waveform characteristics of a blasting shock wave in a highway tunnel with the bench method*. *Buildings*, 14(9), Article 2802. <https://doi.org/10.3390/buildings14092802>

ABSTRACT

Polyakov A., Lapenko O. Numerical studies of the dynamic impact of the blast wave on protective structures

Purpose. The study is aimed at numerical modeling of the dynamic impact of a blast wave on protective structures. The main goal is to compare three approaches to calculating blast loads — the analytical method, the empirical Kingery-Bulmash

model, and modeling in the Ansys AUTODYN software environment — in order to study different modeling techniques and analyze the behavior of structures under the influence of an explosion.

Methodology. The work used three methods of numerical analysis: (1) analytical calculation according to the method described in scientific sources, (2) an online calculator based on the empirical Kingery-Bulmash equations, and (3) modeling in Ansys AUTODYN using the RHT and JWL EOS material models. For each method, calculation models were built, simulations were performed, and data on pressure, momentum, front velocity, and duration of the positive phase were collected.

Results. Detailed calculations of the blast wave parameters at different distances from the epicenter were obtained for each method. It was found that the largest discrepancies between the methods are observed in the estimates of the reflected pressure (up to 91.5%) and the duration of the positive phase (up to 120%).

Scientific novelty. For the first time, a systematic comparison of three methods for numerical modeling of the impact of an explosion on a reinforced concrete structure was performed with an assessment of the discrepancies between the results and an analysis of the causes of these deviations. A method for comparing each approach based on the relative deviation from the average value was proposed.

Practical relevance. The results of the study are useful for engineers and designers of protective structures. It was concluded that the use of AUTODYN is appropriate for accurate analysis of complex objects, while analytical methods can be used at the previous stages.

Keywords: blast wave, protective structures, numerical modeling, ANSYS AUTODYN, Kingery-Bulmash, pressure pulse, reflected pressure, dynamic loading.

AUTHOR'S NOTE:

Polyakov Anton, Postgraduate Student at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», e-mail: 4672349@stud.kai.edu.ua, orcid: 0009-0002-1312-8858.

Lapenko Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Computer Technologies in Construction, State University «Kyiv Aviation Institute», oleksandr.lapenko@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0002-2029-0792.

Стаття подана до редакції 26.05.2025