

УДК 624.1

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/75.055>

© Н.В. Зуєвська<sup>1</sup>, О.О. Вовк<sup>1</sup>, Р.Ф. Харченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ РУЙНУЮЧОЇ ДІЇ ВИБУХУ В УРБОПРОСТОРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ANSYS AUTODYN

© N. Zuievskaya<sup>1</sup>, O. Vovk<sup>1</sup>, R. Kharchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## MODELING DESTRUCTIVE EFFECTS OF AN EXPLOSION IN AN URBAN ENVIRONMENT USING ANSYS AUTODYN

**Мета:** дослідження полягає у вивченні впливу вибухових хвиль у міському середовищі з використанням комплексного чисельного моделювання. За допомогою програмного забезпечення ANSYS AUTODYN було проведено серію симуляцій, що дозволило нам точно відтворити динаміку взаємодії вибухових хвиль з міськими конструкціями.

**Методика** яка використовувалась: розрахунок здійснюється за допомогою моделювання і аналізу результатів.

**Результати.** Отримані результати досліджень показують, що застосування чисельного моделювання за допомогою ANSYS AUTODYN дозволяє з високою точністю прогнозувати вплив вибухових хвиль на міські структури. Ці методи ефективно моделюють складні взаємодії між вибуховими хвилями та міським середовищем, надаючи цінну інформацію для розробки заходів безпеки та проектування міських структур. Новизна дослідження полягає у поєднанні 2D та 3D моделювання для детального аналізу вибухових подій у міських умовах, розширюючи існуючі знання про взаємодію вибухових хвиль із міською інфраструктурою. На основі отриманих даних можуть бути розроблені заходи для підвищення безпеки та стійкості міської інфраструктури у випадку вибухових подій, а також для покращення планування та захисту міського середовища..

**Наукова новизна.** Наукова новизна дослідження полягає у розробці та застосуванні передових методів чисельного моделювання для аналізу взаємодії вибухових хвиль з міськими структурами, що дозволяє з значною точністю визначати потенційні ризики та впливи. Особливість полягає у використанні комплексного підходу, що включає як 2D, так і 3D моделювання, що забезпечує глибше розуміння динаміки вибухових процесів і їх впливу на урбанізовані території. Це дослідження вносить значний вклад у сферу безпеки міських середовищ, пропонуючи новітні стратегії для мінімізації наслідків вибухових подій.

**Практичне значення.** На основі отриманих даних може бути розроблені заходи по захисту споруд урбопростору від можливих вибухових подій, що включають проектування стійких до вибухів конструкцій, оптимізацію міських планів з урахуванням потенційних ризиків, вдосконалення систем евакуації, та підвищення безпечності для цивільного населення в густонаселених місцях.

**Ключові слова:** ANSYS AUTODYN, численне моделювання, вибух, міське середовище, вибухове навантаження.

**Вступ.** Дослідження останніх років акцентує на важливості розуміння впливу вибухових хвиль у міських умовах, зокрема через їх здатність

взаємодіяти з міськими структурами та породжувати унікальні складнощі в прогнозуванні навантажень від вибухів. Таке розуміння стає особливо важливим у світлі швидкого зростання урбанізації та збільшення частоти вибухових подій у міських середовищах, що часто пов'язано з терористичними атаками або промисловими аваріями. Вибух у Бейруті у 2020 році та військові конфлікти. Так, як війна в Україні, ще більше підкреслила необхідність розуміння безпекової ситуації в містах та населених пунктах потребує використання швидких чисельних інструментів для оцінки їх наслідків, щоб обмежити супутні збитки та підвищити безпеку населення. Таким чином, глибоке розуміння впливу руйнуючої дії вибуху на споруди та будівлі, а також їх елементи є ключовим для розробки більш вдосконалених методів захисту від вибухових хвиль.

В цьому контексті, чисельне моделювання, зокрема за допомогою таких програм, як ANSYS AUTODYN, відіграє ключову роль, дозволяючи імітувати вибухи в міських умовах із високою точністю. Це допомагає не тільки в проектуванні більш безпечних міських середовищ, але і в розробці заходів реагування на надзвичайні ситуації та стратегії мінімізації наслідків вибухів. Інтеграція цих моделювань з експериментальними даними та їх порівняння з реальними вибуховими подіями дозволяють підвищити надійність та точність прогнозів впливу вибухів.

**Актуальність дослідження.** Питання безпеки в містах та населених пунктах потребують аналізу та оцінки існуючих надзвичайних ситуацій та техногенних катастроф, що виникають від руйнуючої дії вибуху, та призводять до великої кількості жертв. Події, такі як вибухи в Оклахомі 1995 року [1], теракт у Всесвітньому торговому центрі в Нью-Йорку (2001 р.), напади на Мумбаї (2008 р.) [2, 3], а також непередбачені промислові вибухи можуть призвести до руйнування міської інфраструктури в такому масштабі, як це сталося після події в Бейруті у 2020 році [4, 5], вибухи в соборі Джоло (Філіппіни, 2019) [6], багато нападів у Пакистані (Кветта, 2020) [7, 8], а також у більшій частині Афганістану (Кабул, Куз-Кунар, 2020) [9, 10] та напад на Україну державою-терористом росією 24.02.2022 [11] використанням терористичних засобів проти цивільного населення, вразили світову спільноту своєю руйнівною силою та наслідками для життя людей і міської інфраструктури.

У зв'язку з цим, застосування методів моделювання та аналізу вибухів в міському середовищі стали важливими завданнями для науковців та фахівців у галузі безпеки. У цьому контексті використання програмного забезпечення ANSYS AUTODYN надає можливість детального чисельного моделювання вибуху та його наслідків у різних умовах.

В даній статті ми розглянемо методику чисельного моделювання вибуху в міському середовищі з використанням ANSYS AUTODYN та дослідимо отримані результати, які дозволять визначити методи конструктивного захисту споруд та будівель, нададуть візуалізацію розповсюдження вибухової хвилі в складному об'ємно-просторовому міському середовищі.

### Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів.

Комплексний підхід до моделювання вибухових процесів з використанням AUTODYN включає наступні етапи, по-перше - налаштування та виконання 2D симуляцій з осовою симетрією, що дозволяє ефективно моделювати початкову стадію вибуху; по друге – 2D моделі адаптуються для створення більш складної 3D моделі міського середовища в якому відтворюється динаміка вибухових хвиль.

На першому етапі для формування моделі задаються числові характеристики матеріалів AIR (повітря) і TNT (тротил) вибрані в бібліотеці AUTODYN наведені на рис. 1.

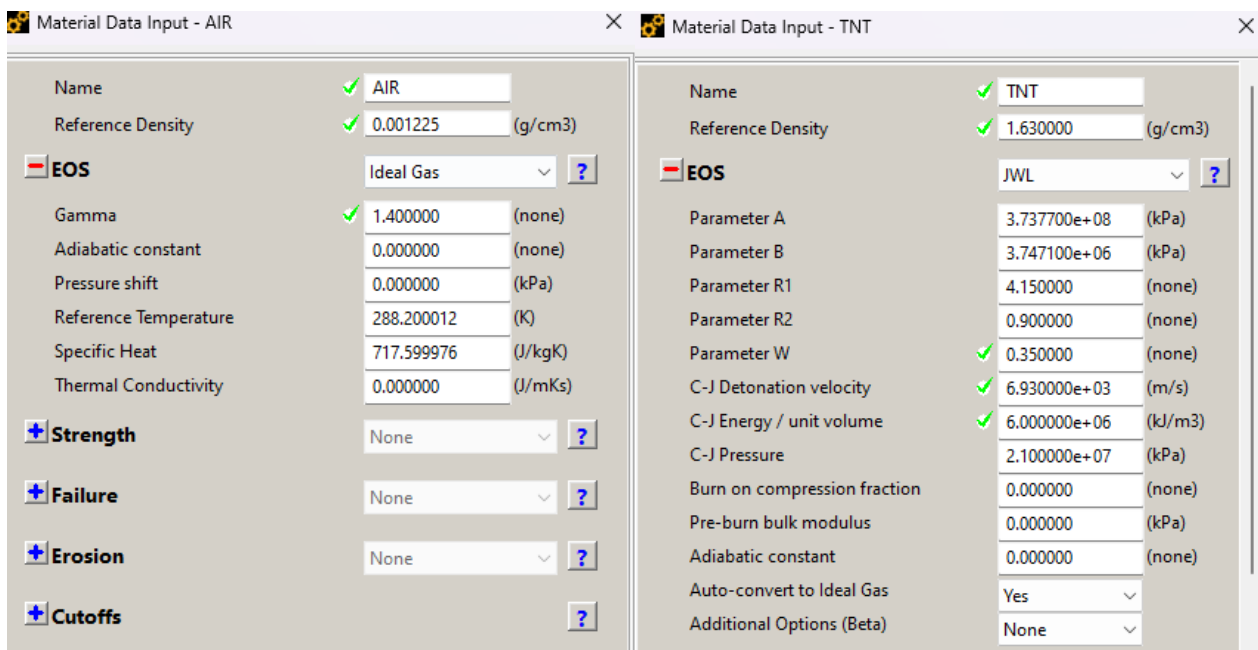


Рис. 1. Числові характеристики матеріалів AIR і TNT вибрані в бібліотеці AUTODYN

А також налаштується 2D Multi-material Euler клину, який має наступні параметри: мінімальний радіус: 100 мм; максимальний радіус: 45 000 мм; внутрішня енергія повітря:  $2,068 \times 10^5$  (1 атм); розмір еліпса (по x та y): 1000 мм. Геометричне зображення клину наведено на рис. 2.



Рис. 2. 2D Multi-material Euler з геометричними параметрами

В 2D для закріплення координат вихідної точки в якій формується вибух та точки, що відповідає максимально можливій відстані розповсюдження фронту ударної хвилі. Координати фіксуються в сітці Ейлера, що наведено на рис. 3.

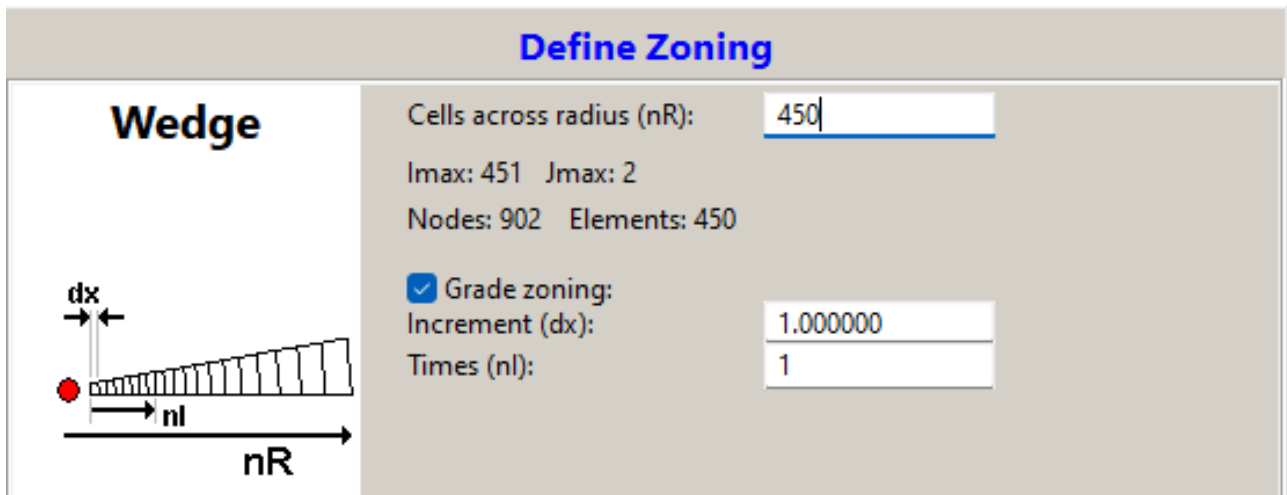


Рис.3. Визначення геометрії в Ейлера , що повторю геометрію вибухової хвилі (r- 100, R- 45000,0 , nR-450)

На рис. 4 представлено сітку Ейлера з обранням еквіваленту вибухівки, в даному випадку ТНТ з начальними умовами.

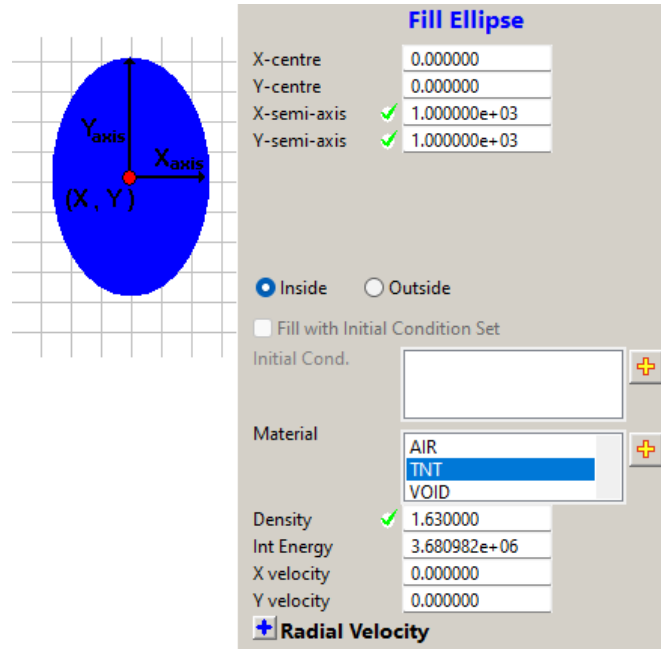


Рис. 4. Заповнена сітка Ейлера TNT з радіусом 1000,0

Вихідна точка детонації задається з початковими координатами (0.0, 0.0), потім встановлюється Time limit на 50 мілісекунд, а у Cycle limit обирається довільно велике число (999999) і після цього розпочинється розрахунок рис. 5. Результати формування клину для кращої візуалізації можливо переглянути в 3D форматі.

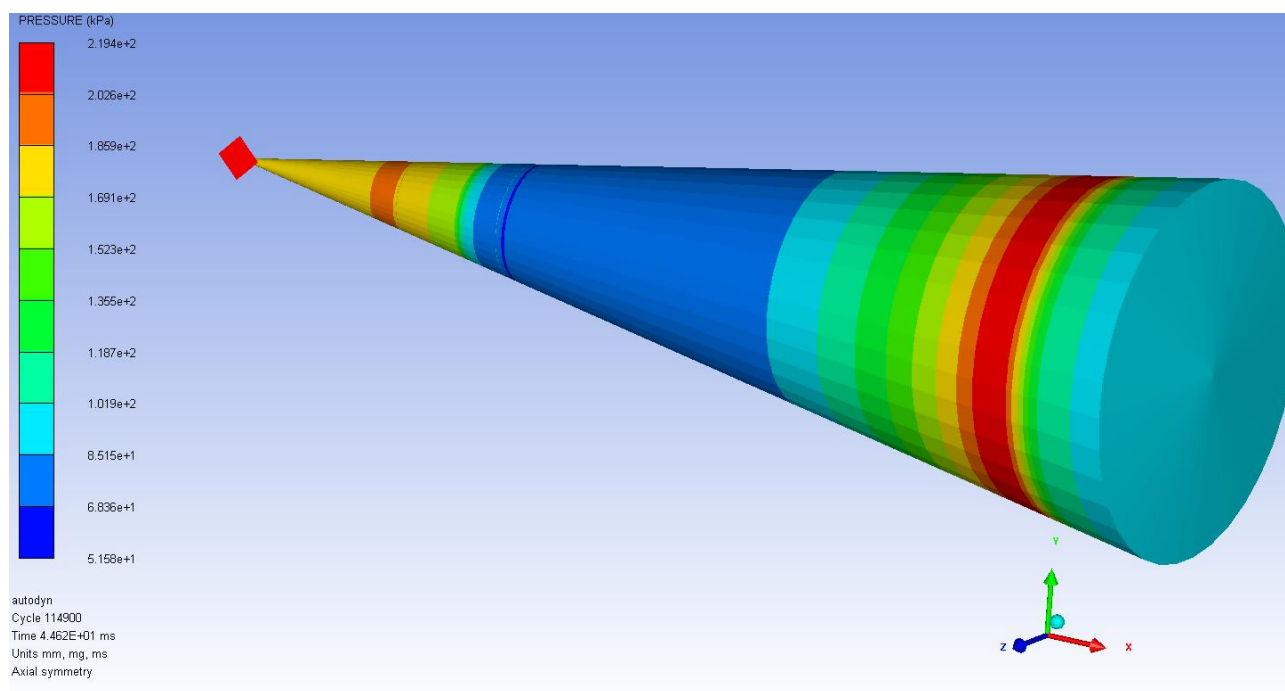


Рис. 5. Розподіл ударної хвилі клинової форми у середовищі

На другому етапі результати моделювання з 2D моделі перенесемо дані початкових налаштувань до 3D модель. Для чого по-перше в 3D моделі сформуємо модель початкового міського середовища (рис. 6), при цьому задана гранична умова "Euler boundary condition" для виходу з розрахункової області. Ця умова є важливою для визначення виходу продуктів вибуху з обчислювальної області.

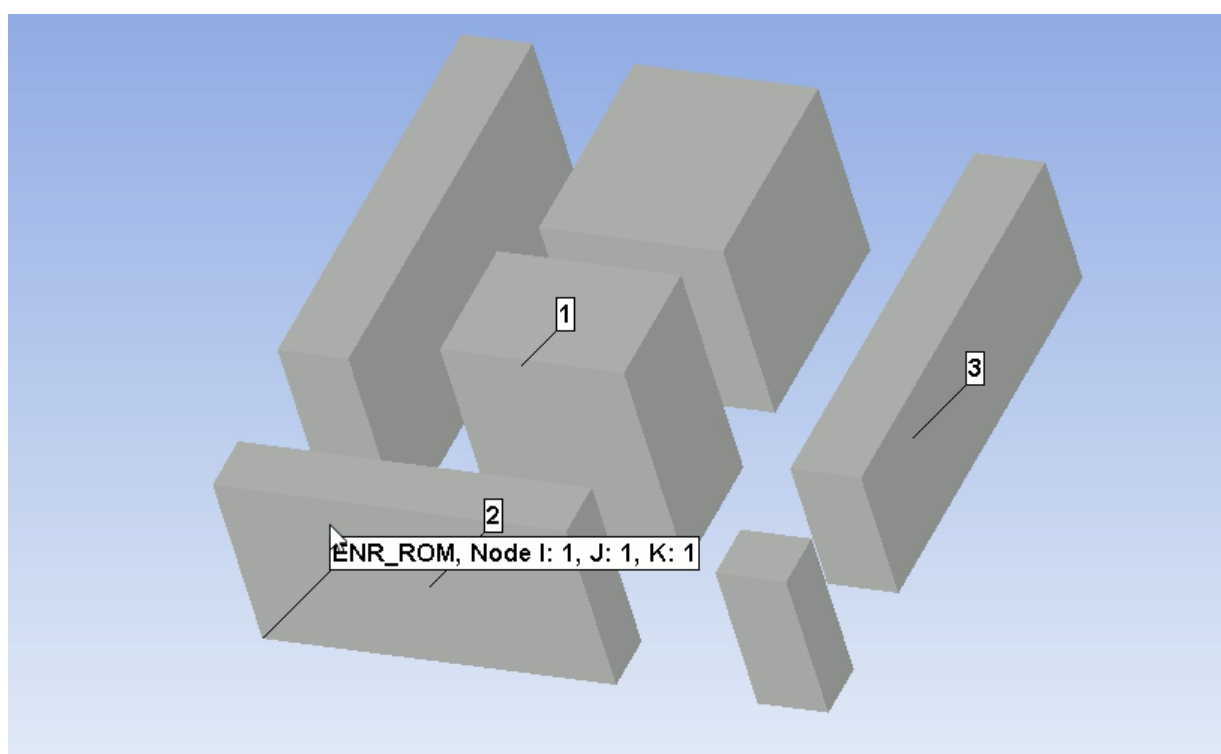


Рис. 6. Модель середовища у форматі 3D

На рис.6 зображено будівлі у вигляді об'ємних гометричних фігур. На яких довільно нанесено точки датчиків (манометрів), які в процесі симуляції вибуху будуть фіксувати тиск від вибухової хвилі.

Для чого було застосовано граничні умови "Outflow" щодо регулювання виходу продуктів вибуху, що забезпечило контроль над процесом вибуху в обчислювальній моделі. Для подальшого аналізу встановлюємо ліміт часу на "End time" на 1000 мілісекунд, з циклом фіксації результатів кожні 25 мілісекунд. Ці параметри дозволяють контролювати тривалість симуляції та зберігати дані з регулярними інтервалами. Після натискання "Run" відбувається сама симуляція на рис. 7.

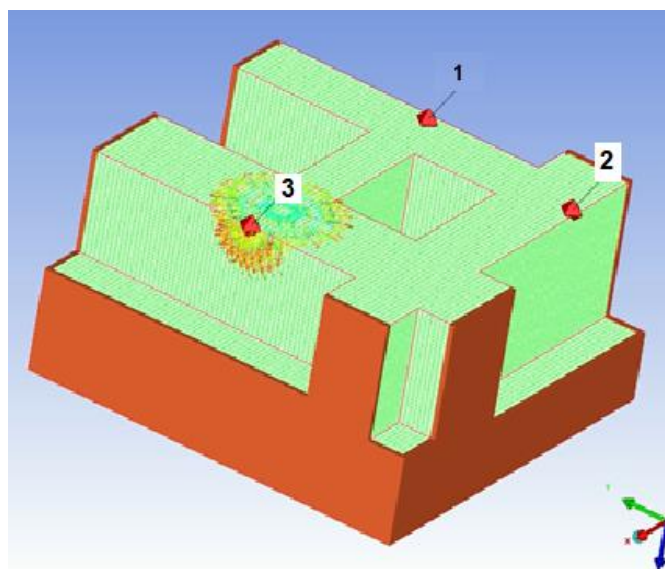


Рис. 7. Візуалізація симуляції вибуху у форматі 3D

В результаті були отримані залежності значень тиску в часі в точках 1, 2 та 3, де у нас умовно розташовані датчики що представлено на рис. 8–10.

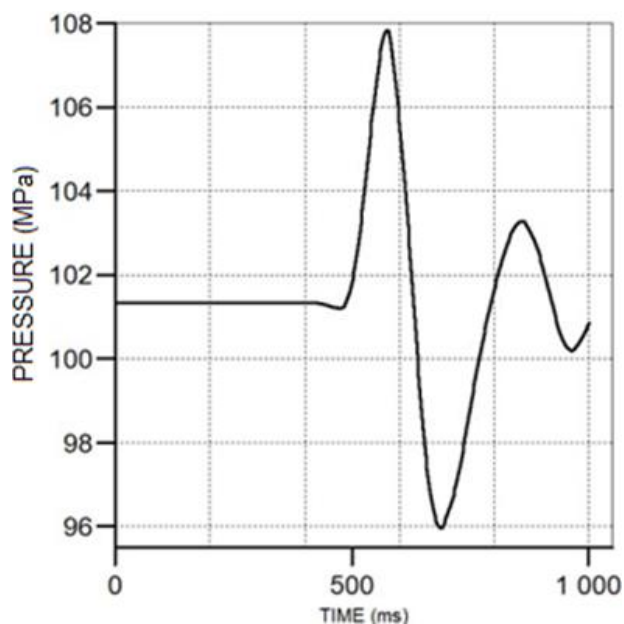


Рис. 8. Зміна тиску (MPa) в залежності від часу (ms) у датчику 1



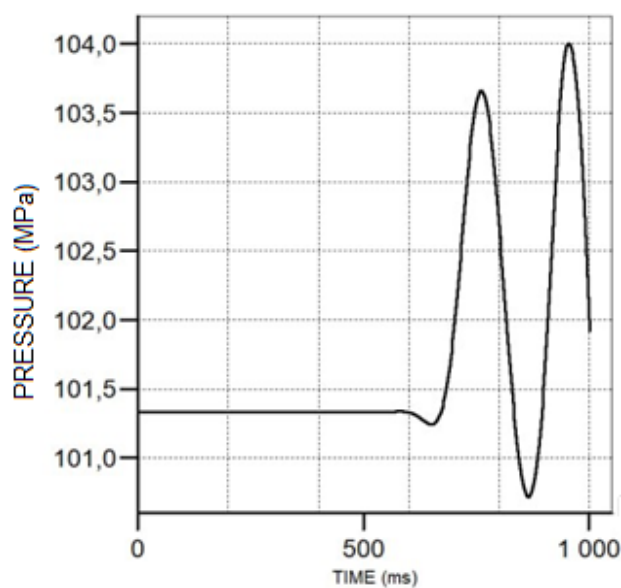


Рис. 9. Зміна тиску (МПа) в залежності від часу (мс) у датчику 2

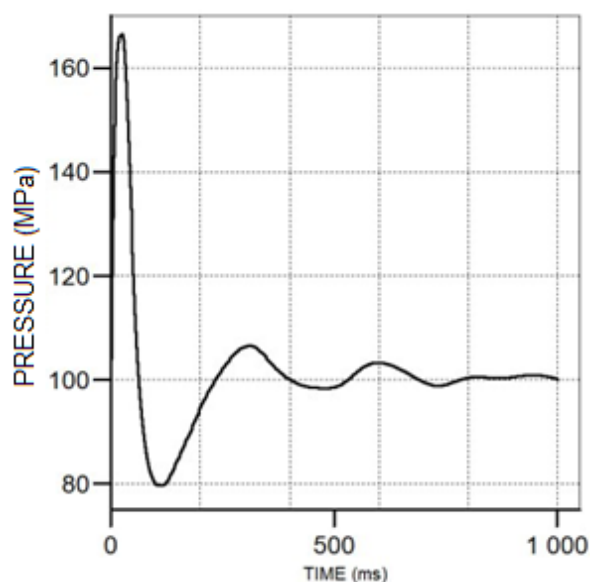


Рис. 10. Зміна тиску (МПа) в залежності від часу (мс) у датчику 3

В таблиці 1 всі ці значення представлені в зведеному вигляді для порівняння.

Таблиця 1

Характеристика датчиків після вибуху

Датчик	Максимальний тиск (МПа)	Мінімальний тиск (МПа)	Відсотокова різниця (%)	Час першого скачка тиску (мс)
Датчик 1	108	96	33.33	350
Датчик 2	104	101	35.80	250
Датчик 3	162	80	0	150

Відсоткова різниця тиску в порівнянні із датчиком 3 показує, що датчик 2 має ближче значення до пікового тиску, але обидва датчики 1 і 2 показують суттєвий спад тиску порівняно з датчиком 3. Що цілком зрозуміло, тому що датчик 3 має найближче розташування до місця вибуху.

Міське середовище характеризується наявністю численних будівель та інших конструкцій, які створюють свого роду захисний екран для проходження вибухової хвилі. Тому значення тиску пікових значень ударної хвилі на різних будинках різний і відповідно пошкодження теж відрізняються по ступеню інтенсивності. По значенням пікових тисків і враховуючи матеріал будівельної конструкції можна оцінити ступінь можливого руйнування.

**Висновки.** В результаті проведеного моделювання були отримані значення тисків у контрольних точках де у нас умовно розташовувались датчики 1, 2 та 3. Завдяки значенням тиску від вибухової хвилі на будівельні конструкції ми можемо оцінити можливі пошкодження та деформації. Отримані результати становлять інформацію для подальшого дослідження та розробки стратегій безпеки у відповідних областях.

Кінцевий аналіз даних дозволяє зробити наступні висновки та пропозиції:

1. Вибух в міському середовищі є складною та небезпечною подією, і результати дослідження підтверджують необхідність ретельного вивчення та планування заходів для зменшення ризику та наслідків подібних подій.

2. Розглядаючи результати, слід розглянути доречність встановлення захисних бар'єрів, розробки та впровадження ефективних евакуаційних планів та планування міських об'єктів з урахуванням можливих вибухів.

3. Дані дослідження будуть корисні для науковців і владних органів, що працюють у сфері безпеки, і можуть використовуватися для подальших досліджень та розробки стратегій зменшення ризику вибухів у міському середовищі.

В подальшому слід збільшити кількість контрольних точок з умовними датчиками, що дозволить отримати більше інформації про навантаження будівель під час вибуху.

#### **Перелік посилань**

1. Norville, H. S., Harvill, N., Conrath, E. J., Shariat, S., & Mallonee, S. (1999). Glass-Related Injuries in Oklahoma City Bombing. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 13(2), 50–56.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(1999\)13:2\(50\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(1999)13:2(50))
2. Iqbal, M. Z. (2014). The media–terrorism symbiosis: a case study of Mumbai attacks, 2008. *Asian Journal of Communication*, 25(2), 197–212.  
<https://doi.org/10.1080/01292986.2014.944924>
3. Mendonça, D., & Wallace, W. A. (2006). Impacts of the 2001 World Trade Center Attack on New York City Critical Infrastructures. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(4), 260–270.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2006\)12:4\(260\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2006)12:4(260))
4. Rufolo, P., Muraro, D. and Lorini, V. (2021). *Social Media Image Analysis in the Immediate Aftermath of the 2020 Beirut Blast*. Publications Office of the European Union  
<https://doi.org/10.2760/944555>



5. Ratcliff, A., Rigby, S., Clarke, S., & Fay, S. (2023). A Review of Blast Loading in the Urban Environment. *Applied Sciences*, 13(9), 5349.  
<https://doi.org/10.3390/app13095349>
6. Clarke, S., & Fay, S. (n.d.). *A review of blast loading in the urban environment*.
7. Majeed, G. (2020). Sectarianism in Pakistan: A Statistical Analysis of Problems of Shia Hazara Community of Quetta. *Journal of Business and Social Review in Emerging Economies*, 6(4), 1611–1620.  
<https://doi.org/10.26710/jbsee.v6i4.1526>
8. Nguyen-Dinh, M., Lardjane, N., Duchenne, C., & Gainville, O. (2017). Direct simulations of outdoor blast wave propagation from source to receiver. *Shock Waves*, 27(4), 593–614.  
<https://doi.org/10.1007/s00193-017-0711-2>
9. Network, A. A., Ali, O., & Gharanai, K. (2021). *Hit from Many Sides (2): The demise of ISKP in Kunar*. <https://www.ecoi.net/en/document/2047183.html>
10. Langran-Wheeler, C., Rigby, S. E., Clarke, S. D., Tyas, A., Stephens, C., & Walker, R. (2021). Near-field spatial and temporal blast pressure distributions from non-spherical charges: Horizontally-aligned cylinders. *International Journal of Protective Structures*, 12(4), 492–516.  
<https://doi.org/10.1177/20414196211013443>
11. Dijkstra, H., Cavelt, M. D., Jenne, N., & Reykers, Y. (2022). War in Ukraine. *Contemporary Security Policy*, 43(3), 464–465.  
<https://doi.org/10.1080/13523260.2022.2099085>

#### ABSTRACT

**Purpose** is to study the impact of explosive waves in an urban environment using comprehensive numerical modeling. A series of simulations were conducted using ANSYS AUTODYN software, allowing us to accurately replicate the dynamics of explosive wave interactions with urban structures.

**The methods** used involves calculations through modeling and analysis of results. The obtained research results demonstrate that the application of numerical modeling with ANSYS AUTODYN allows for highly precise prediction of the influence of explosive waves on urban structures. These methods effectively model complex interactions between explosive waves and the urban environment, providing valuable information for safety measures and urban structure design.

**Findings.** Results demonstrate that the application of numerical modeling with ANSYS AUTODYN allows for highly precise prediction of the influence of explosive waves on urban structures. These methods effectively model complex interactions between explosive waves and the urban environment, providing valuable information for safety measures and urban structure design.

**The originality** lies in the combination of 2D and 3D modeling for a detailed analysis of explosive events in urban conditions, expanding existing knowledge about the interaction of explosive waves with urban infrastructure. Based on the obtained data, measures can be developed to enhance the safety and resilience of urban infrastructure in the event of explosive events, as well as to improve urban environment planning and protection.

**Practical implementation.** Based on the obtained data, measures can be developed to protect urban structures from potential explosive events, including the design of blast-resistant structures, optimization of urban plans considering potential risks, improvement of evacuation systems, and enhancing safety for the civilian population in densely populated areas.

**Keywords:** ANSYS AUTODYN, numerical modeling, explosion, urban environment, explosive load.