

УДК 534.2:519.6:624.042

ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ В СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

І.І. Солодей,

д-р техн. наук, професор

Г.А. Затилюк,

д-р філософії в прикладній механіці, доцент

Е.Ю. Петренко,

канд. техн. наук, доцент

В.В. Шовківська,

канд. економічних наук, доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.76-82

Розглянуто сучасний стан проблеми побудови математичних моделей поширення вибухових хвиль навантажень та підходів до дослідження динамічної реакції конструкцій і споруд, що знаходяться під їх впливом. Наведена класифікація динамічних процесів різної інтенсивності відносно швидкості деформації та рекомендації по вибору найбільш ефективних методів інтегрування розрахункових рівнянь руху за часовою координатою. Проведено огляд робіт по дослідженню динамічних хвиль в анізотропних і ізотропних середовищах, ґрунтових масивах.

Ключові слова: динамічні навантаження, вибухові впливи, ударна хвиля, пластичні деформації, швидкість деформації, модель вибуху, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів.

Вступ. Конструкторські розрахунки при проектуванні будівель та споруд нерозривно пов'язані з дослідженням міцності та стійкості будівельних конструкцій, аналізом їх напружено-деформованого стану (НДС). На сьогоднішній день значно зросла роль розрахунку будівельних конструкцій на особливі навантаження та впливи. Однак, часто виконання такого розрахунку є ускладненим у зв'язку з недостатньою розробленістю математичного апарату, а також недостатньою обізнаністю про природу виникнення та характер поширення навантажень. З цієї причини, створення адекватних розрахункових моделей є майже неможливим. Окреме місце серед розрахунків на особливі навантаження займають динамічні розрахунки на сейсмічні, імпульсні впливи різної природи, ударні навантаження, в тому числі вибухові. Крім того, вібрації можуть виробляти великі промислові підприємства, траси, залізничні колії, метрополітен, що веде до пошкодження чи навіть руйнування конструкцій. Екстремальні навантаження від вибухових хвиль на сьогодні стали реальністю, що вимагає проектування елементів захисту наземних і підземних споруд. Невід'ємним, і чи не найважливішим кроком є оцінка зовнішнього впливу, який сприймає споруда. Для того, щоб зробити розрахунок будівлі, необхідно враховувати наявність джерела вібрації або виникнення імпульсу, швидкість його приросту, фізико-механічні властивості ґрунту, його поведінку при зміні напрямку зрушень, специфічні особливості території, на якій знаходиться споруда.

Метою серії запропонованих робіт є розробка нових ефективних моделей, методів та алгоритмів аналізу розповсюдження ударних хвиль напружень в суцільних середовищах методом скінченних елементів (МСЕ), створенні на цій основі чисельних засобів, що будуть спроможні давати швидко оцінку впливу надзвичайного перехідного навантаження імпульсного або вибухового характеру на наземні або підземні будівельні та інженерні споруди.

Огляд сучасного стану проблеми вивчення динамічної реакції суцільних середовищ, конструкцій і споруд на інтенсивні еволюційні навантаження. Сучасний розвиток техніки призводить до інтенсивного росту статичних та динамічних навантажень. Протягом останнього десятиріччя вивчення динамічної поведінки конструкцій та основ розвивається дуже стрімко,

що відображено в чисельних монографіях, дисертаціях, статтях, доповідях на наукових форумах різного рівня. Це пояснюється багатьма причинами: збільшенням динамічних впливів, що викликані машинами, кранами та іншим устаткуванням; широким застосуванням вібрацій, ударів та промислових вибухів як елементів технологічного процесу.

Багато інженерних задач можуть бути вирішені тільки на основі методів динаміки споруд. Спроби обмежитися статичним розрахунком і враховувати динамічні впливи деякими, по суті, апріорними динамічними коефіцієнтами вже давно визнані непереконливими. Динаміка споруд отримала за останній час широке розповсюдження і представлена великим числом робіт, але головним питанням залишається правильний та доцільний вибір не тільки методів розрахунку, але і, що ні в якому разі не менш важливо, розумний вибір розрахункових схем.

Рівняння стану матеріалу в його найбільш загальній формі повинно описувати поведінку досліджуваного об'єкта при всіх можливих значеннях швидкості деформації, але навіть у випадку одновісного напруженого стану введення таких розрахункових рівнянь представляє великі труднощі. Тому більшість рівнянь стану та методів як правило застосовані лише у вузькому діапазоні швидкостей деформацій, що є природним, оскільки в різних діапазонах швидкостей домінують різні фізичні механізми. Динамічна класифікація механічних процесів по діапазонам швидкостей деформацій (табл. 1) була запропонована Ліндхольмом [1].

Таблиця 1

Динамічна класифікація механічних процесів

Характерний час t , сек	Швидкість деформації $\dot{\varepsilon}$, сек ⁻¹	Механічні процеси	Урахування динамічних факторів
$10^6 \div 10^3$	$10^{-8} \div 10^{-4}$	Повзучість	Нехтування силами інерції
$10^3 \div 10^{-1}$	$10^{-4} \div 10^{-2}$	Квазістатичне навантаження	
$10^{-1} \div 10^{-3}$	$10^{-1} \div 10^2$	Проміжні швидкості деформації. Механічний резонанс в системі. Переважають пружні деформації.	Урахування сил інерції
$10^{-3} \div 10^{-6}$	$10^2 \div 10^4$	Імпульсне навантаження. Розповсюдження пружнопластичних хвиль. Переважають пластичні деформації.	
$10^{-6} \div 10^{-8}$	$10^4 \div 10^8$	Високошвидкісний удар. Тиск наближається або перевищує межу міцності. Проявляється в'язкість матеріалу.	

При швидкостях деформацій від 10^{-6} до 10^{-5} сек⁻¹ визначаючим фактором, особливо для металів при високих температурах, є повзучість, і відповідно, поведінка матеріалів у цьому діапазоні описується законами типу законів повзучості. При більш високих швидкостях деформацій (від 10^{-4} до 10^{-2} сек⁻¹) для опису поведінки матеріалів використовують квазістатичну залежність напружень від деформацій, яка отримана при постійній швидкості деформації.

Із збільшенням швидкості навантаження може змінитися сам характер зв'язку між напруженням і деформацією, що примушує використовувати інші види розрахункових рівнянь. Швидкості деформацій в діапазоні від 10^{-1} до 10^2 сек⁻¹ зазвичай визначаються як проміжні, або середні. Саме в цьому діапазоні стають помітними інерційні ефекти, хоча в деяких випадках їх впливом ще можливо знехтувати. При цьому, для полегшення аналізу, вводять додаткові гіпотези, які, як правило, звужують клас досліджуваних об'єктів і процесів. Важливими прикладами таких практичних задач є періодичні коливання елементів конструкцій або їх деформування під дією рухомого навантаження, для розв'язання яких розроблено окремі ефективні підходи [2, 3]. Найбільш загальним та розповсюдженим при аналізі перехідних процесів вважається метод розкладу розшукуваного рішення в ряд по лінійно незалежній системі координатних функцій у вигляді власних форм вільних коливань [4, 5].

Використовуючи властивість ортогональності власних форм такий підхід дозволяє перейти від системи диференційних рівнянь, що пов'язані з діагональними членами в матриці жорсткості, до системи незалежних рівнянь. Як показує досвід, в багатьох випадках практичних умов навантаження для отримання задовільної апроксимації реакції системи достатньо враховувати обмежену кількість розділених рівнянь. Для сейсмічного впливу в ряді випадків достатньо 10 нижчих форм, вітрового – $2\div 3$. Тому додаткові обґрунтовані початкові процедури зменшення розмірності динамічної моделі значно підвищують ефективність розрахунку. Обчислення власних значень відбувається за допомогою відомих алгоритмів лінійної алгебри [6].

При описі імпульсного деформування особливо важливим стає урахування сил інерції та ефектів розповсюдження пружних і непружних хвиль. Слід також відрізнити середні значення напружень і деформацій від локальних, що виникають в результаті проходження по матеріалу однієї або більше високоінтенсивних хвиль напружень. Математично, модель таких процесів реалізується у вигляді лінійних або нелінійних диференційних рівнянь другого порядку, для розв'язання яких рекомендовано прямі методи безпосереднього інтегрування по часовій координаті, яким присвячено численні дослідження питань збіжності та стійкості [7, 8, 9], залишаючи модальні методи для проблем, що пов'язані з використанням нижньої частини частотного спектра. Для більш повільних процесів переважно використовуються неявні схеми інтегрування за часом, які допускають у порівнянні з явними значно більший крок по параметру [7]. Найбільш відомими з них є методи Хаболта, Н'юмарка та θ -Вільсона. Порівняння цих методів по точності не дозволяє віддати перевагу будь-якому з них. Але необхідно підкреслити, що похибка у методі Н'юмарка, що пов'язана із штучним затуханням та подовженням періоду коливань, при збільшенні часового кроку є меншою, ніж у інших методів [8]. Про високу точність метода Н'юмарка свідчать також дослідження, які подаються в роботі [9].

Задачі з малими швидкостями (від 10^{-1} до 10^3 сек $^{-1}$) відносяться до області інтересів динаміки конструкцій. Механічні процеси тут тісно пов'язані із загальною деформацією конструкції, а характерний час навантаження і реакції складає мілісекунди. Швидкості деформацій від 10^4 сек $^{-1}$ та вище зазвичай характеризують високошвидкісне деформування, коли починає проявлятися в'язкість матеріалів. Широке розповсюдження тут отримали алгоритми, що базуються на використанні явних різницевих схем, які відповідають динамічним задачам з характерним часом $\approx 10^{-6} \div 10^{-8}$ сек.

Крім того, існують спроби створення більш точних альтернативних підходів до дослідження вищеописаних процесів із чотирьохвимірною скінченноелементною апроксимацією простору та часу на базі функцій високого ступеня [10]. Однак внаслідок складності реалізації та великих обчислювальних витрат, вони знаходять мале використання.

Зростаючі ризики техногенних і природних загроз призвели до зростання попиту на технології та інструменти оцінки вибухових впливів на об'єкти різноманітного цивільного та спеціального призначення: житлові та громадські будівлі, інженерні мережі, захисні наземні та підземні споруди, об'єкти транспортної та комунальної інфраструктури, тощо.

Наразі в Україні в більшості випадків при проектуванні враховують вплив вибухових навантажень, представляючи їх як квазістатичні навантаження. Значення цих навантажень визначаються згідно з будівельними нормами або приймаючи за різними методиками, після чого застосовуються у розрахункових схемах як статичні.

Однак, імпульсні або вибухові навантаження характеризуються швидким наростанням інтенсивності від нуля до максимального значення та швидким зменшенням до нуля, і фактично являють собою інтенсивні короткочасні імпульсні впливи, що супроводжуються великими зростаннями напружень та виникненням пластичних деформацій. Аналіз поширення вибухової хвилі аналізується в [11], однак досліджується розповсюдження та інтенсивність навантажень в залежності від різних вибухових речовин, не розглядаючи питання поширення в середовищах з різними характеристиками та враховуючи нелінійність, зокрема виникнення пластичних деформацій.

Моделювання процесів детонації є складним питанням, що потребує врахування численних параметрів та факторів. Для вирішення цієї проблеми було розроблено різноманітні моделі, які враховують різні умови детонації.

Найпоширенішими моделями для поверхневих вибухів є модель JWL (Jones-Wilkins-Lee), яка дозволяє точно описувати тиск, що створюється вибухом, враховуючи щільність та енергію продуктів детонації [12]; модель CONWER, яка є ефективним інструментом для моделювання деформацій і пошкоджень конструкцій під впливом вибухової хвилі [13]; модель сферичної падаючої хвилі, яка описує поширення хвиль від точкового джерела у вигляді концентричних сфер.

Питання моделювання вибухових навантажень викликає значний інтерес серед міжнародної наукової спільноти. Дослідження в цій сфері проводять численні наукові групи, серед яких варто відзначити вітчизняних та закордонних вчених: М.С. Барабаш, А.Н. Бирбраер, О.І. Волощенко, І.П. Даценко, А.С. Городецький, В.І. Коцюруба, А.В. Перельмутер, J.R. Gilmore, H. Powell., M. Ramsden, L. Wang тощо.

Важливо моделювати характер та механізм поширення вибухових хвиль у суцільних середовищах для майбутнього прогнозування впливу на будівельні конструкції. Поширення сейсмічних хвиль в анізотропних і ізотропних середовищах досліджувалось в [14]. Однак, імпульсні динамічні навантаження при вибухах призводять до швидкостей деформації порядку 10^2 - 10^4 сек⁻¹, що вказує на короткочасну динамічну поведінку конструкцій.

Також потрібно ретельно моделювати джерело імпульсного навантаження, адже його вплив залежить не лише від типу вибухових речовин, що досліджувалось в [11], а і від розміру та форми, а також розташування точки детонації [15].

Надійним методом оцінки поведінки споруд на інтенсивні імпульсні впливи є прямий експериментальний метод дослідження впливу вибухових навантажень на конструкції або елементи конструкцій [16, 17]. Однак натурні випробування часто складно проводити не тільки тому, що вони часто обмежені з міркувань безпеки, але й тому, що вони вимагають дорогого та вузькоспеціалізованого обладнання та навичок роботи з приладами. З розвитком комп'ютерних технологій та методів обчислювальної механіки вирішення поставлених задач стало можливе в рамках чисельних методів, найбільш розповсюдженим з яких є метод скінченних елементів (МСЕ), який може бути використано для моделювання нелінійної роботи конструкції під дією короткочасного імпульсного навантаження.

Важливим питанням є забезпечення ефективного захисту об'єктів від вибухів, проектуючи їх розміщення під землею або, для забезпечення додаткового захисту, використовуючи додаткові шари для «пом'якшення» вибуху, що складається з сипучих порід або інших пружно-пластичних матеріалів, ефективність яких досліджуються в роботах закордонних вчених [18, 19]. Незважаючи на дисперсність та дискретність ґрунтових середовищ, в механіці ґрунтів широко застосовується модель суцільного середовища, що значно спрощує математичне моделювання НДС. З іншої сторони, в такому випадку неможливо ігнорувати складні механізми деформування через анізотропію та нелінійність матеріалу, мінливість механічних властивостей, на що звертають увагу у [20]. Властивості ґрунту (тип, щільність, вологість тощо) істотно впливають на поширення ударних хвиль у ньому, а також на поведінку конструкцій, рівень та розподіл НДС в них [21]. Важливим питанням є обрання меж розрахункової області та вибір граничних умов [22], які потрібно моделювати таким чином, щоб запобігти відбиттю хвиль, забезпечивши їх гасіння [23], а також важливо моделювати характер та механізм поширення вибухових хвиль у ґрунті [24] для майбутнього прогнозування впливу на конструкції, що взаємодіють із ґрунтовим середовищем [25].

Висновки. Очікувані результати фундаментальних наукових досліджень створюють ефективний базис для побудови нових технологічних рішень, на базі яких планується удосконалення існуючих розрахункових комплексів розв'язання задач міцності і стійкості, їх ретельного теоретичного та методологічного обґрунтування, що має забезпечити надійну основу для підвищення стійкості та захисту об'єктів цивільної та спеціальної інфраструктури за умов надзвичайних ситуацій, які пов'язані з дією інтенсивних навантажень вибухового характеру. Крім того, створені теорія і методи можуть стати важливим інструментом при аналізі проблем вібраційного контролю споруд.

Таким чином, розроблені технології та методології знайдуть практичне застосування у сферах будівництва, цивільного захисту, під час проектування відповідальних об'єктів, а також під час технічної експертизи пошкоджених або зруйнованих конструкцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lindholm U.S. In: *Techniques in Metals Research* / ed. by R.F. Bunshah. Vol. 5, pt 1. N.Y. : Interscience, 1971.
2. Карнаухов В.Г., Ревенко Ю.В. Стационарні коливання та дисипативний розігрів в'язкопружних тонкостінних елементів при дії на них рухомого навантаження // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2002. Вип. 9, т. 8. С. 97–103.
3. Пановко Я.Г., Губанова І.І. Устойчивость и колебания упругих систем. М. : Наука, 1987. 352 с.
4. Дмитриев А.Б., Стратонова М.М., Толмач Г.У. Расчет частот и форм колебаний механической системы по спектру частот и форм колебаний подсистем // Труды Центрального института авиационного моторостроения. 1982. № 996. С. 177–184.
5. Клаф Р. Динамика сооружений. М. : Стройиздат, 1979. 320 с.
6. Уилкинсон Дж.Х. Алгебраическая проблема собственных значений. М. : Наука, 1970. 327 с.
7. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1982. 447 с.
8. Bathe K.Y., Wilson E.L. Stability and accuracy of direct integration methods // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1973. Vol. 1. P. 283–291.
9. Nickell R.E. On the stability of approximation operators in problem of structural dynamics // *International Journal of Solids and Structures*. 1971. Vol. 7. P. 301–319.
10. Исаков Н.Ю., Исполов Ю.Г., Шабров Н.Н. Метод численного интегрирования уравнений динамики больших конечно-элементных моделей // *Проблемы прочности*. 1987. № 12. С. 91–95.
11. Figuli L. et al. Numerical analysis of the blast wave propagation due to various explosive charges // *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020, No. 1. P. 8871412.
12. Lee E.L., Hornig H.C., Kury J.W. *Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products*. Livermore: University of California, Lawrence Radiation Laboratory, 1968. 45 p. (Report UCRL-50422).
13. Kingery R.D., Bulmash G. *Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*. – Aberdeen Proving Ground, MD: U.S. Army Ballistic Research Laboratory, 1984. – Report ARBRL-TR-02555.
14. He X. et al. A modified numerical-flux-based discontinuous Galerkin method for 2D wave propagations in isotropic and anisotropic media // *Geophysics*. 2020. Vol. 85, No. 5. P. T257–T273.
15. Clarke S. et al. Characterisation of buried blast loading // *Proceedings of the Royal Society A*. 2020. Vol. 476. P. 20190791.
16. Katko B.J. et al. Experimental and numerical study of blast-structure interaction // In: *Structures Congress 2020*. Reston, VA : American Society of Civil Engineers, 2020. P. 105–118.
17. Dela Cueva J.C.A. et al. Blast wave interaction with structures: An application of exploding wire experiments // *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2020. Vol. 3. P. 337–347.
18. Ichino H. et al. Effects of EPS density on blast mitigation performance in underground protective structures // *International Journal of Impact Engineering*. 2022. Vol. 164. 104189.
19. Khodaparast M., Mohamad Momeni R., Bayesteh H. Numerical simulation of surface blast reduction using composite backfill // *Geosynthetics International*. 2022. Vol. 29, No. 1. P. 66–80.
20. Ambrosini D., Luccioni B. Effects of underground explosions on soil and structures // *Underground Space*. 2020. Vol. 5, No. 4. P. 324–338.
21. Pan Y. et al. Experimental and numerical study on ground shock propagation in calcareous sand // *International Journal of Impact Engineering*. 2023. Vol. 180. 104724.
22. Солодей І.І., Затилюк Г.А. Дослідження достовірності та ефективності використання моделей зміцнюваного ґрунту в рамках метода скінчених елементів // *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. зб. К. : КНУБА, 2022. Вип. 109. С. 30–37. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.30-37>.*
23. Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Затилюк Г.А. Особливості створення розрахункових моделей при дослідженні напружено-деформованого стану підземних споруд // *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. зб. К. : КНУБА, 2019. Вип. 102. С. 139–149. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.139-149>.*
24. Keskin İ. et al. An evaluation on effects of surface explosion on underground tunnel; availability of ABAQUS Finite Element Method // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022. Vol. 120. 104306.
25. Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Zatyliuk G.A. Nonlinear problem of structural deformation in interaction with elastoplastic medium // *Strength of Materials and Theory of Structures: sci.-tech. coll. art. K. : KNUBA, 2020. Issue 105. P. 48–63. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.48-63>.*

REFERENCES

1. Lindholm U.S. In: *Techniques in Metals Research* / ed. by R.F. Bunshah. Vol. 5, pt 1. N.Y. : Interscience, 1971.
2. Karnaukhov V.H., Revenko Yu.V. Statsionarni kolyvannia ta dysypatyvnyi rozihriv viazkoprzhnykh tonkostinnykh elementiv pry dii na nykh rukhomoho navantazhennia (Stationary vibrations and dissipative heating of viscoelastic thin-walled elements under moving load) // *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. 2002. Issue. 9, v. 8. P. 97–103.
3. Panovko Ya.H., Hubanova I.I. *Ustoichyvost y kolebanyia upruhykh system (Stability and vibrations of elastic systems.)*. М. : Nauka, 1987. 352 p.
4. Dmytryev A.B., Stratonova M.M., Tolmach H.U. Raschet chastot y form kolebany y mekhanycheskoi systemy po spektru chastot y form kolebany y podsystem (Calculation of frequencies and modes of vibration of a mechanical system based on the spectrum of frequencies and modes of vibration of subsystems) // *Proceedings of the Central Institute of Aviation Motors..* 1982. № 996. P. 177–184.
5. Klaf R. *Dynamyka sooruzheniy (Dynamics of structures)*. М. : Stroiysdat, 1979. 320 p.
6. Wilkinson J.H. *Algebraycheskaia problema sobstvennykh znacheniy (Algebraic eigenvalue problem)*. М. : Nauka, 1970. 327 s.
7. Bate K., Wilson E. *Chyslennyye metody analiza y metod konechnykh elementov (Numerical methods of analysis and finite element method)*. М. : Stroiysdat, 1982. 447 p.
8. Bate K.Y., Wilson E.L. Stability and accuracy of direct integration methods // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1973. Vol. 1. P. 283–291.

9. Nickell R.E. On the stability of approximation operators in problem of structural dynamics // International Journal of Solids and Structures. 1971. Vol. 7. P. 301–319.
10. Isakov N.Iu., Yspolov Yu.H., Shabrov N.N. Metod chyslennoho yntehyrovanyia uravnenyi dynamyky bolshykh konechno-
elementnykh modelei (Method of numerical integration of the equations of dynamics of large finite element models) // Strength
of Materials. 1987. № 12. P. 91–95.
11. Figuli L. et al. Numerical analysis of the blast wave propagation due to various explosive charges // Advances in Civil
Engineering. 2020. Vol. 2020, No. 1. P. 8871412.
12. Lee E.L., Hornig H.C., Kury J.W. Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products. Livermore: University of
California, Lawrence Radiation Laboratory, 1968. 45 p. (Report UCRL-50422).
13. Kingery R.D., Bulmash G. Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. – Aberdeen
Proving Ground, MD: U.S. Army Ballistic Research Laboratory, 1984. – Report ARBRL-TR-02555.
14. He X. et al. A modified numerical-flux-based discontinuous Galerkin method for 2D wave propagations in isotropic and
anisotropic media // Geophysics. 2020. Vol. 85, No. 5. P. T257–T273.
15. Clarke S. et al. Characterisation of buried blast loading // Proceedings of the Royal Society A. 2020. Vol. 476. P. 20190791.
16. Katko B.J. et al. Experimental and numerical study of blast-structure interaction // In: Structures Congress 2020. Reston, VA :
American Society of Civil Engineers, 2020. P. 105–118.
17. Dela Cueva J.C.A. et al. Blast wave interaction with structures: An application of exploding wire experiments // Multiscale and
Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design. 2020. Vol. 3. P. 337–347.
18. Ichino H. et al. Effects of EPS density on blast mitigation performance in underground protective structures // International
Journal of Impact Engineering. 2022. Vol. 164. 104189.
19. Khodaparast M., Mohamad Momeni R., Bayesteh H. Numerical simulation of surface blast reduction using composite backfill //
Geosynthetics International. 2022. Vol. 29, No. 1. P. 66–80.
20. Ambrosini D., Luccioni B. Effects of underground explosions on soil and structures // Underground Space. 2020. Vol. 5, No. 4.
P. 324–338.
21. Pan Y. et al. Experimental and numerical study on ground shock propagation in calcareous sand // International Journal of
Impact Engineering. 2023. Vol. 180. 104724.
22. Solodei I.I., Zatyliuk H.A. Doslidzhennia dostovirnosti ta efektyvnosti vykorystannia modelei zmitsniuvanoho gruntu v
ramkakh metoda skinchennykh elementiv (Study of the reliability and efficiency of using reinforced soil models within the
framework of the finite element method) // Strength of Materials and Theory of Structures: sci-tech. coll. art. K. : KNUBA,
2022. Issue 109. P. 30–37. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.30-37>.
23. Solodei I.I., Petrenko E.Iu., Zatyliuk H.A. Osoblyvosti stvorennia rozrakhunkovykh modelei pry doslidzhenni napruzheni-
deformovanoho stanu pidzemnykh sporud (Features of the numerical simulation in research on the stress strain behavior of
underground structures) // Strength of Materials and Theory of Structures: sci-tech. coll. art. K. : KNUBA, 2019. Issue 102. P.
139–149. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.139-149>.
24. Keskin İ. et al. An evaluation on effects of surface explosion on underground tunnel; availability of ABAQUS Finite Element
Method // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 120. 104306.
25. Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Zatyliuk G.A. Nonlinear problem of structural deformation in interaction with elastoplastic
medium // Strength of Materials and Theory of Structures: sci-tech. coll. art. K. : KNUBA, 2020. Issue 105. P. 48–63.
<https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.48-63>.

Стаття надійшла 15.04.2025

Солодей І.І., Затилюк Г.А., Петренко Е.Ю., Шовківська В.В.

ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ В СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Конструкторські розрахунки при проектуванні будівель та споруд нерозривно пов'язані з дослідженням міцності та стійкості будівельних конструкцій, аналізом їх напружено-деформованого стану (НДС). На сьогоднішній день значно зросла роль розрахунку будівельних конструкцій на особливі навантаження та впливи. Однак, часто виконання такого розрахунку є ускладненим у зв'язку з недостатньою розробленістю математичного апарату, а також недостатньою обізнаністю про природу виникнення та характер поширення навантажень. З цієї причини, створення адекватних розрахункових моделей є майже неможливим. Окреме місце серед розрахунків на особливі навантаження займають динамічні розрахунки на сейсмічні, імпульсні впливи різної природи, ударні навантаження, в тому числі вибухові.

В роботі розглянуто сучасний стан проблеми побудови математичних моделей поширення вибухових хвиль навантажень та підходів до дослідження динамічної реакції конструкцій і споруд, що знаходяться під їх впливом. Наведена класифікація динамічних процесів різної інтенсивності відносно швидкості деформації та рекомендації по вибору найбільш ефективних методів інтегрування розрахункових рівнянь руху за часовою координатою. Проведено огляд робіт по дослідженню динамічних хвиль в анізотропних і ізотропних середовищах, ґрунтових масивах.

Метою серії запропонованих робіт є розробка нових ефективних моделей, методів та алгоритмів аналізу розповсюдження ударних хвиль напружень в суцільних середовищах методом скінченних елементів (МСЕ), створенні на цій основі чисельних засобів, що будуть спроможні давати швидку оцінку впливу надзвичайного перехідного навантаження імпульсного або вибухового характеру на наземні або підземні будівельні та інженерні споруди.

Ключові слова: динамічні навантаження, вибухові впливи, ударна хвиля, пластичні деформації, швидкість деформації, модель вибуху, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів.

Solodei I.I., Zatyliuk G.A., Petrenko E.Yu., Shovkivska V.V.

REVIEW OF MATHEMATICAL MODELS AND METHODS TO RESEARCH THE EXPLOSIVE LOADS PROPAGATION IN CONTINUOUS ENVIRONMENTS

Design calculations in building and structure engineering are inextricably linked to the analysis of strength, stability, and the stress-strain state (SSS) of structural elements. Today, the importance of assessing structures under special loads and impacts has significantly increased. However, such analyses are often complicated due to the underdevelopment of the mathematical framework

and insufficient understanding of the nature and propagation characteristics of such loads. As a result, the creation of adequate computational models becomes nearly impossible. A distinct category among special load analyses is dynamic assessment under seismic, impulsive, and impact loads, including explosive effects.

The current state of the problem of constructing blast loads waves propagation mathematical models and approaches to study the dynamic response of structures and buildings under their influence is considered. The classification of different intensity dynamic processes in relation to the deformation rate is given and recommendations for choosing the most effective methods for integrating the computational equations of motion in the time coordinate are given. A review of works on the study of dynamic waves in anisotropic and isotropic environments and soil masses is conducted.

The aim of this series of studies is to develop new effective models, methods, and algorithms for analyzing the propagation of shock stress waves in continuous media using the finite element method (FEM). Based on this, the goal is to create numerical tools capable of providing rapid assessments of the impact of extreme transient loads of impulsive or explosive nature on aboveground and underground civil and engineering structures.

Key words: dynamic loads, explosive effects, shock wave, plastic deformations, strain rate, explosion model, stress-strain state, finite element method.

УДК 534.2:519.6:624.042

Солодей І.І., Затилюк Г.А., Петренко Е.Ю., Шовківська В.В. Огляд математичних моделей та методів дослідження поширення вибухових навантажень в суцільних середовищах // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 114. – С. 76-82.

Розглянуто сучасний стан проблеми побудови математичних моделей поширення вибухових хвиль навантажень та підходів до дослідження динамічної реакції конструкцій і споруд, що знаходяться під їх впливом. Наведена класифікація динамічних процесів різної інтенсивності відносно швидкості деформації та рекомендації по вибору найбільш ефективних методів інтегрування розрахункових рівнянь руху за часовою координатою. Проведено огляд робіт по дослідженню динамічних хвиль в анізотропних і ізотропних середовищах, ґрунтових масивах.

Tab. 1. Бібліогр. 25 назв.

UDC 534.2:519.6:624.042

Solodei I.I., Zatyliuk Gh.A., Petrenko E.Yu., Shovkivska V.V. Review of mathematical models and methods to research the explosive loads propagation in continuous environments // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv:KNUCA, 2025. – Issue 114. – P. 76-82.

The current state of the problem of constructing blast loads waves propagation mathematical models and approaches to study the dynamic response of structures and buildings under their influence is considered. The classification of different intensity dynamic processes in relation to the deformation rate is given and recommendations for choosing the most effective methods for integrating the computational equations of motion in the time coordinate are given. A review of works on the study of dynamic waves in anisotropic and isotropic environments and soil masses is conducted.

Tab. 1. Ref. 25

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки СОЛОДЕЙ Іван Іванович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, НДІ Будівельної механіки

Робочий тел.: +38 (044) 241-55-55

Мобільний тел.: +38 (050) 357-44-90

E-mail: solodei.ii@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7638-3085>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор філософії в прикладній механіці, доцент, доцент кафедри будівельної механіки ЗАТИЛЮК Герман Анатолійович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, НДІ Будівельної механіки

E-mail: zatyliuk.ha@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0392-2214>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, ПЕТРЕНКО Едуард Юрійович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Email: petrenko.ey@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9792-4757>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат економічних наук, доцент кафедри економічної теорії, обліку та оподаткування ШОВКІВСЬКА Вікторія Василівна

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Роб. тел.: +38 (044) 242-45-26

Мобільний тел.: +38 (050) 357-44-90

E-mail: shovkivska.vv@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2379-0362>