

УДК 624.04:624.042.3

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.24.1223

РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ. СУЧАСНІ ПІДХОДИ. СЕЙСМІКА ТА ВИБУХ (огляд)

ВОЛЧОК Д. Л.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
КОЖЕМЯКІНА І. Ф.², канд. техн. наук, доц.,
ЗАВАРИКІН С. Л.³, асп.,
САХАРЧУК С. В.⁴, асп.

^{1*}Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 727-65-60, e-mail: denys.l.volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

²Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 156-29-89, e-mail: kozhem.irina@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6987-8936

³Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +380 (063) 448-16-21, e-mail: zavarykin@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0942-8247

⁴Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 368-73-03, e-mail: sakharchuk.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-5037-2905

Анотація. Актуальність роботи. Проблеми інженерії завжди були пов'язані з безпекою та надійністю елементів конструкцій і споруд. У сучасних умовах забезпечення надійності та безпеки будівельних конструкцій великого значення набуває здатність урахування динамічних навантажень різної природи – від сейсмічних коливань до вибухових впливів. Характерною особливістю цих навантажень є висока невизначеність параметрів. Найчастіше до розрахунку конструкцій у динаміці здебільшого спираються на детерміновані схеми аналізу. Вони не дозволяють врахувати вплив невизначеностей на кінцеві інженерні рішення. Це призводить до можливого заниження або завищення оцінок ризику. Актуальним залишаються дослідження, що спрямовані на підвищення точності та надійності прогнозування поведінки елементів будівельних конструкцій при дії динамічних навантажень. **Мета дослідження** – проведення комплексного огляду сучасних підходів до моделювання динамічної поведінки елементів конструкцій під дією сейсмічних та вибухових навантажень з урахуванням алеторних та епістемічних невизначеностей, з подальшою пропозицією уніфікованої методичної рамки для досліджень і інженерної практики. **Методика.** Застосовано метод аналізу науково-технічної літератури щодо сучасних напрямків досліджень з урахуванням невизначеностей. **Результати.** У статті подано огляд сучасних підходів до моделювання динамічної відповіді конструктивних елементів за умов значних алеторних і епістемічних невизначеностей. Узагальнено результати останніх робіт зі сейсмічної крихкості (fragility) на основі стохастичних моделей ґрунтових рухів та метамодельовання (Kriging, SPCE, DR-SM), а також досліджень вибухових навантажень – від аналітичних енергетичних моделей тонкостінних оболонок до FSI-розрахунків ударних хвиль із тонкими пластинами, P-I діаграм, внутрішніх вибухів у сталевих боксах і вузлів залізобетонних каркасів. На цій основі пропонується уніфікована методична рамка для подальших досліджень і практики проектування: від формалізації невизначеностей до побудови функцій придатності та стандартизованих критеріїв прийняття рішень.

Ключові слова: невизначеність; алеторна; епістемічна; сейсмічна крихкість; сурогатні моделі; SPCE; Kriging; DR-SM; вибухове навантаження; P-I діаграма; FSI

DEVELOPMENT OF THE THEORY OF STRUCTURAL ELEMENT ANALYSIS UNDER DYNAMIC LOADS IN THE PRESENCE OF UNCERTAINTIES. CONTEMPORARY APPROACHES. SEISMIC AND BLAST LOADS (overview)

VOLCHOK D.L.^{1*}, D.Sc., Assoc. Prof.,

KOZHEMIAKINA I.F.², *PhD, Assoc. Prof.*,
ZAVARYKIN S.L.³, *PhD Stud.*,
SAKHARCHUK S.V.⁴, *PhD Stud.*

^{1*} Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 727-65-60, e-mail: denys.l.volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

² Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 156-29-89, e-mail: kozhem.irina@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6987-8936

³ Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +380 (063) 448-16-21, e-mail: zavarykin@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0942-8247

⁴ Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (093) 368-73-03, e-mail: sakharchuk.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-5037-2905

Abstract. Relevance of the work. Engineering problems have always been closely associated with the safety and reliability of structural elements and facilities. Under modern conditions, ensuring the reliability and safety of building structures requires the capability to account for dynamic loads of various origins – from seismic ground motions to blast effects. A characteristic feature of these loads is the high level of uncertainty in their parameters. In most cases, dynamic analysis of structures relies predominantly on deterministic analytical schemes, which do not allow the influence of uncertainties on final engineering decisions to be fully captured. As a result, this may lead to an underestimation or overestimation of risk. Research aimed at increasing the accuracy and reliability of predicting the behavior of structural elements under dynamic loading therefore remains highly relevant. **Purpose of the study** is to conduct a comprehensive review of modern approaches to modeling the dynamic behavior of structural elements under seismic and blast loads, taking into account aleatory and epistemic uncertainties, and to propose a unified methodological framework for further research and engineering practice. **Methodology.** The study employs an analysis of scientific and technical literature focused on contemporary research directions involving uncertainty quantification. **Results.** The article provides an overview of current approaches to modeling the dynamic response of structural elements under significant aleatory and epistemic uncertainties. It summarizes the findings of recent studies on seismic fragility based on stochastic ground-motion models and surrogate modeling techniques (Kriging, SPCE, DR-SM), as well as research on blast loading – ranging from analytical energy-based models of thin-walled shells to FSI simulations of shock-wave interaction with thin plates, pressure–impulse (P–I) diagrams, internal detonations in steel box structures, and reinforced-concrete frame joints. Based on these developments, the article proposes a unified methodological framework for further research and design practice – from the formalization of uncertainties to the development of performance (fitness) functions and standardized decision-making criteria.

Keywords: *uncertainty; aleatory; epistemic; seismic fragility; surrogate models; SPCE; Kriging; DR-SM; blast loading; P–I diagram; FSI*

Вступ. У сучасних умовах забезпечення надійності та безпеки будівельних конструкцій дедалі більшого значення набуває здатність урахування динамічних навантажень різної природи - від сейсмічних коливань до вибухових впливів. Характерною особливістю цих навантажень є висока невизначеність параметрів: спектральних характеристик ґрунтових рухів, інтенсивності та форми імпульсу вибуху, властивостей матеріалу конструкційних елементів, умов їх закріплення та взаємодії з навколишнім середовищем. Невизначеність має як алеторний характер (випадковість дії збурення), так і епістемічний (неповнота

знань про модель, процеси руйнування, точні параметри системи).

Традиційні підходи до розрахунку конструкцій у динаміці здебільшого спираються на детерміновані схеми аналізу, які не дозволяють коректно врахувати вплив невизначеностей на кінцеві інженерні рішення. Це призводить до можливого заниження або завищення оцінок ризику, що є критично небезпечним у сфері проектування стратегічно важливих об’єктів.

У відповідь на ці виклики у наукових дослідженнях останніх років активно розвиваються методи:

1. сейсмічної крихкості (fragility analysis) з використанням стохастичних

моделей ґрунтових рухів, побудови метамodelей (Kriging, стохастичні розкладення поліномного хаосу - SPCE, моделі зі зменшенням розмірності - DR-SM), що дозволяють поєднувати обчислювальну ефективність і достовірність;

2. оцінки вибухостійкості, що охоплюють як аналітичні енергетичні моделі, так і спрощені P-I діаграми, а також повноцінні чисельні підходи до взаємодії рідина-конструкція (FSI - fluid-structure interaction), здатні описувати нелінійну поведінку тонкостінних елементів і складних вузлів;

3. використання безрозмірних критеріїв і скейлінгових залежностей, які дають можливість узагальнювати результати експериментів та чисельних розрахунків для різних геометрій і умов навантаження;

4. метод глобальної чутливості та невизначеності, що дозволяють відокремити ключові фактори, які найбільше впливають на динамічну відповідь конструкцій.

Таким чином, проблема полягає не лише у правильному розрахунку елементів конструкцій при дії динамічних навантажень, але й у створенні уніфікованої методичної основи, яка поєднає:

1. формалізацію невизначеностей;
2. побудову функцій крихкості та придатності;
3. використання багаторівневих моделей (від спрощених до FSI);
4. інтеграцію обчислювально ефективних сурогатних підходів.

Саме така рамка дозволить розвинути теорію розрахунку елементів будівельних конструкцій і забезпечити підвищення точності прогнозів їх поведінки в умовах складних і небезпечних динамічних впливів.

Мета дослідження. Проведення комплексного огляду сучасних підходів до моделювання динамічної поведінки елементів будівельних конструкцій під дією сейсмічних та вибухових навантажень з урахуванням алеторних та епістемічних невизначеностей, з подальшою пропозицією уніфікованої методичної основи для досліджень і інженерної практики.

Методика. На підставі аналізу сучасної літератури систематизувати методологічні підходи, які застосовуються у світовій науковій практиці для аналізу невизначеностей, побудови кривих крихкості та функцій придатності конструкцій.

Охарактеризувати сучасні інструменти сурогатного моделювання (Kriging, SPCE, DR-SM) та їх роль у зменшенні обчислювальних витрат без втрати достовірності результатів.

Узагальнити результати досліджень вибухових навантажень, зокрема підходи до побудови P-I діаграм, безрозмірних критеріїв та моделей FSI, що відображають складні нелінійні ефекти взаємодії ударних хвиль із конструкціями.

Виявити напрями подальших досліджень, які мають безпосереднє значення для розвитку теорії розрахунку конструкцій в умовах невизначеностей.

Досягнення зазначених завдань дозволить сформуванню уніфікованої методичної основи, придатної для використання в дослідженнях, спрямованих на підвищення точності та надійності прогнозування поведінки будівельних конструкцій у складних динамічних режимах.

Основні результати досліджень. В останні два десятиліття у світовій науковій літературі спостерігається суттєвий прогрес у напрямі врахування невизначеностей у розрахунках динамічної поведінки елементів будівельних конструкцій. Дослідники дедалі більше відходять від традиційних детермінованих методів і переходять до імовірнісних та гібридних підходів, які дозволяють відтворювати складну стохастичну природу навантажень та їх вплив на надійність конструктивних систем.

У сфері сейсмостійкого будівництва значного поширення набули дослідження, орієнтовані на парадигму Performance-Based Earthquake Engineering (PBEE), що передбачає багаторівневий аналіз від опису ґрунтових рухів до побудови кривих крихкості та функцій збитків. Тут велику роль відіграють методи сурогатного

моделювання - стохастичні розкладення поліномного хаосу, крігінг-моделі та алгоритми редукції розмірності, які забезпечують баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Паралельно активно розвивається напрямок дослідження вибухових навантажень, де спектр підходів варіює від аналітичних і напівемпіричних залежностей (P-I діаграми, безрозмірні критерії) до високоточних чисельних моделей FSI, здатних відтворювати складні нелінійні процеси взаємодії ударної хвилі з тонкими елементами конструкцій. Особливу увагу приділяють розробці узагальнених моделей, придатних для масштабування результатів між лабораторними випробуваннями та реальними спорудами.

Отже, аналіз сучасних публікацій дозволяє розглядати сейсмічні та вибухові навантаження не як ізольовані напрямки, а як взаємодоповнювальні сфери, де спільними є проблеми формалізації невизначеностей, побудови функцій крихкості та пошуку ефективних розрахункових моделей. Саме у цьому контексті огляд обраних джерел дає можливість виділити перспективні методологічні рішення для розвитку теорії розрахунку елементів будівельних конструкцій в умовах невизначеностей [1].

Автори запропонували повний підхід до оцінки сейсмічної крихкості в межах концепції Performance-Based Earthquake Engineering (PBEE). Методологія забезпечує можливість отримувати криві крихкості як побічний продукт процесу, що спирається на генерацію ідей та багаторівневі симуляції по створенню моделей, що максимально імітують реальні процеси.

Головна ідея - використовувати штучно згенеровані сейсмічні рухи (коли реальних записів бракує), комбінувати спрощені та детальні чисельні моделі й пов'язувати їх у єдиний інструмент через ієрархічний крігінг (просторову інтерполяцію), застосовувати глобальний аналіз чутливості для визначення параметрів, які найбільше впливають на результат.

Корисні сторони. Підхід охоплює весь цикл PBEE: від моделювання сейсмічних

рухів до отримання кривих крихкості і дає значну економію ресурсів: замість сотень важких симуляцій достатньо обмеженого набору, решту відтворюють сурогатні моделі, добре підходять у ситуаціях, коли мало даних або вони дорогі в отриманні.

Недоліки. Якість результатів дуже залежить від того, наскільки штучні рухи відображають реальні умови.

Поєднання моделей різної точності може створювати складнощі для практичного використання у стандартних розрахунках.

Цей підхід особливо корисний для випадків, коли обмежена кількість реальних сейсмічних записів або висока вартість обчислень у повних нелінійних моделях. Методика дозволяє інженерам отримувати достовірні криві крихкості з мінімальними ресурсними витратами, а також швидко оцінювати сейсмічний ризик для мостів та інших складних споруд.

Для забезпечення коректності оцінок крихкості при використанні штучних ґрунтових рухів доцільно виконувати їх валідацію за спектральними та часовими характеристиками (узгодження з PSHA, тривалість, фазові властивості), а також контроль репрезентативності набору записів для цільової локації. Це знижує ризик упередженості сурогатних моделей [2].

У цій роботі автори розвинули підхід Dimensionality Reduction–Stochastic Simulator (DR-SM). Вони зазначають: запропонований стохастичний симулятор дає змогу одночасно оцінювати корельовані інженерні параметри відгуку, що критично важливо для багатовимірної оцінки ризику.

Ідея полягає у тому, щоб спочатку зменшити складність вхідних даних (характеристики сейсмічного руху), а потім у цьому зменшеному просторі відтворювати поведінку конструкції. Це особливо корисно, коли потрібно враховувати не одну, а одразу кілька відповідей.

Корисні сторони. Метод досліджень дозволяє аналізувати корельовані реакції елементів конструкції, а не тільки окремі показники, добре працює як із реальними записами, так і з параметризованими стохастичними моделями.

Відмовляється від простих припущень (наприклад, логнормальності), що робить підхід універсальнішим.

Недоліки. Метод залишається складним у реалізації, потребує грамотного вибору «фізично мотивованих» характеристик для редукції.

Для практичних інженерів він може здатися «важким» через велику кількість статистичних кроків.

Запропонований симулятор доцільно застосовувати у випадках, коли потрібно враховувати взаємозалежні інженерні параметри (наприклад, одночасні переміщення і зусилля на різних рівнях будівлі). Це розширює можливості оцінки ризику, оскільки дозволяє моделювати комплексний відгук конструкції, а не ізольовані показники [3].

Робота присвячена використанню Gaussian Process (Kriging) для побудови непараметричних кривих крихкості. Автори підкреслюють, що просторова інтерполяція дозволяє не лише апроксимувати криву крихкості, але й кількісно описати невизначеність самої моделі.

Автори не обмежуються однією середньою кривою, вони аналізують цілі сімейства кривих (наприклад, квантильні криві), розвивають ідею глобального аналізу чутливості для самих кривих, щоб зрозуміти, які параметри найбільше впливають на невизначеність у результатах.

Корисні сторони. Метод дає змогу не тільки будувати криві, але й визначати інтервали для них, тобто явно враховувати невизначеність самого методу, визначає ключові параметри конструкції, які найбільше впливають на сейсмічну стійкість.

Результати продемонстровано на практичному прикладі трубопровідної системи атомної станції, що робить їх переконливими.

Недоліки. Метод чутливий до вибору ядра та параметрів Gaussian Process.

У складних випадках потребує багато обчислювальних ресурсів на калібрування.

Робота демонструє, як можна отримати більш реалістичні криві крихкості з урахуванням невизначеності моделі. Це

особливо важливо для об'єктів із підвищеним рівнем відповідальності (атомні станції, трубопроводи), де потрібно знати не лише ймовірність відмови, але й довірчі межі. Запропонований аналіз чутливості допомагає інженерам зосередити увагу на параметрах, які найбільше впливають на сейсмотійкість [4].

Автори зосередились на використанні стохастичних поліноміальних хаос-розкладень (SPCE) для побудови моделей крихкості. SPCE дозволяє безпосередньо працювати з параметрами стохастичної моделі ґрунтових рухів, що робить процес побудови кривих крихкості більш ефективними.

Особливість підходу в тому, що вони працюють безпосередньо з параметрами стохастичної моделі ґрунтових рухів (SGMM), які розглядаються як інтенсивності міри (ІМ). Це дозволяє швидко отримувати умовні розподіли інженерних параметрів відгуку та будувати криві крихкості без потреби у величезній кількості дорогих симуляцій.

Корисні сторони. SPCE дозволяє отримувати повний розподіл результатів, а не лише середні значення.

Метод значно швидший за класичні підходи типу Monte Carlo, дає змогу працювати з рідкісними подіями та екстремальними навантаженнями (що є найважливішим у сейсмічному аналізі).

Недоліки. Для правильної роботи потребує грамотного підбору точок для навчання моделі, у «хвостах» розподілу (рідкісні події) точність все ще може падати, тому потрібні додаткові дослідження.

Метод SPCE є ефективним інструментом для швидкого оцінювання сейсмічної крихкості у завданнях, де необхідно досліджувати багато сценаріїв або рідкісні події. Його можна використовувати в практиці оцінки ризиків, коли класичні методи Monte Carlo занадто ресурсомісткі. Підхід добре підходить для масштабних інженерних систем, таких як багатоповерхові будівлі чи інфраструктурні споруди [5].

У цій статті аналізується поведінка сталевих коробчастих конструкцій при

внутрішніх вибухах. Використання безрозмірних параметрів дає можливість передбачати режими пошкодження сталевих коробчастих конструкцій без необхідності повномасштабних випробувань. Дослідники виявили характерні режими руйнування та ввели безрозмірні параметри (наприклад, D^* , φ_q), які дозволяють узагальнювати результати та передбачати пошкодження при різних сценаріях. Це спрощує масштабування від лабораторних випробувань до реальних конструкцій.

Корисні сторони. Чітко описані механізми пошкодження конструкцій при внутрішньому вибуху.

Введення безрозмірних показників дає можливість переносити результати між моделями та реальними спорудами.

Отримані результати можуть бути використані для швидкої оцінки ризику.

Недоліки. Експерименти та моделі охоплюють лише певний діапазон навантажень і геометрії, тому їх застосування потребує додаткової перевірки для інших типів конструкцій.

Не враховано вплив складних граничних умов (наприклад, різних способів закріплення).

Запропоновані безрозмірні критерії та опис режимів руйнування можуть застосовуватись при проектуванні захищених сталевих резервуарів, коробчастих елементів та промислових конструкцій. Це дозволяє швидко оцінювати можливі наслідки внутрішнього вибуху без потреби у повномасштабних випробуваннях. [6].

Автори досліджують моментні з'єднання з великими заповненими бетоном сталевими трубами (CFT) при дії вибухового навантаження. Запропоновані пластинчасті підсилення істотно зменшують локальні деформації та підвищують загальну стійкість моментного з'єднання при вибуховому навантаженні. Для підвищення міцності застосовано пластинчасті підсилення, а поведінку конструкцій оцінювали через чисельне моделювання.

Корисні сторони. Показано, як конструктивні зміни у вузлах здатні значно

підвищити вибухостійкість. Використано критерії з військових стандартів, що робить результати практично орієнтованими, розглянуто варіанти підсилення, що дозволяє вибрати найбільш ефективні рішення.

Недоліки. Модель не охоплює складніші сценарії навантаження, наприклад, багаточисельні вибухи чи вторинні ефекти.

Результати потребують підтвердження повномасштабними експериментами.

Дослідження показує значення локальних підсилень для підвищення вибухостійкості каркасних вузлів. Результати можуть бути використані при проектуванні висотних будівель, мостів або стратегічних споруд, де вузли з'єднань є критичними елементами системи [7].

У статті розглядається поведінка залізобетонних балок високої міцності при тривалих вибухових навантаженнях. Запропоновані нормовані P-I діаграми можуть бути використані для аналізу або проектування залізобетонних балок у дальній зоні вибуху. Автори побудували нормовані P-I діаграми, які враховують дуктильність балки. Для цього вони використали поєднання експериментів у вибухових камерах та чисельного моделювання (SDOF + 3D FEM). Отримані результати дозволяють швидко прогнозувати відгук конструкцій у «дальній зоні» вибуху.

Корисні сторони. Уперше запропоновано P-I діаграми, що враховують дуктильність, тобто здатність конструкції до пластичної деформації, поєднання експериментів і моделювання робить результати достовірними.

Метод придатний для швидкого проектування та оцінки ризиків.

Недоліки. Модель зосереджена на згинальних деформаціях і не охоплює випадки, де переважають зсув чи крихкі руйнування.

Використання тривалих імпульсів обмежує пряме застосування для ближчих вибухових сценаріїв.

Побудовані P-I діаграми, що враховують дуктильність, є корисним інструментом для інженерів при оцінці поведінки залізобетонних балок у дальній зоні вибуху.

Це дозволяє швидко визначати межі безпечної роботи елементів у різних сценаріях вибухового впливу [8].

Це класичний огляд, який систематизує знання про вибухові навантаження та їх вплив на конструкції. Оцінка вибухового впливу на конструкції є складним завданням, яке потребує поєднання експериментальних, чисельних та аналітичних методів. Автори узагальнили характеристики вибухових хвиль, методи їх опису (емпіричні й аналітичні), вплив на різні типи конструкцій, базові принципи проектування проти вибухових впливів.

Корисні сторони. У статті надано фундаментальне узагальнення, яке підходить як «базова платформа» для подальших досліджень.

Розглянуто як зовнішні, так і внутрішні вибухи. Окреслено практичні напрями підвищення вибухостійкості.

Стаття є оглядовою, тому не пропонує власних експериментальних або чисельних рішень.

Огляд є базовим джерелом для науковців і практиків, які працюють з вибухостійкістю. Він забезпечує фундаментальні знання про природу вибухових хвиль і дає основу для порівняння нових методів [9].

У цій статті розглянуто поведінку тонкостінних металевих пластин під дією вибуху у двох умовах: неконфайнованого (UB) та конфайнованого (CB). У випадку неконфайнованого вибуху пластичні шарніри виникають у центрі пластини, тоді як у конфайнованому випадку вони з'являються поблизу межі й поширюються у зворотному напрямку.

Автори поєднали експериментальні випробування з цифровою кореляцією зображень (DIC) та чисельне моделювання, щоб зафіксувати механізм розвитку деформацій. Було виявлено три фази відгуку: ініціація пластичних шарнірів, їх поширення та стадія відбиття хвилі.

Корисні сторони. Вперше на експериментальному рівні детально показано різницю між UB та CB умовами.

Поєднання експерименту і моделювання забезпечує високу достовірність результатів

і дає практичні висновки для проектування елементів у суднобудуванні та промислових спорудах.

Недоліки. Розглянуто лише сталеві пластини, без композитів чи інших матеріалів.

Дослідження зосереджене на одиночному елементі, без урахування впливу складної системи.

Отримані результати дають цінну інформацію для проектування суднових перегородок, корпусів технічних ємностей та інших тонкостінних елементів. Робота показує, наскільки важливими є умови навантаження, оскільки різниця між конфайнованим і відкритим вибухом радикально змінює картину деформацій [10].

Робота присвячена аналітичному прогнозуванню енергетичної відповіді напівциліндричних оболонок на дію вибухових навантажень. Запропонована аналітична модель точно відтворює динаміку енергетичної відповіді оболонки та добре узгоджується з чисельними симуляціями. Автори створили нову модель, що базується на енергетичному підході та враховує динаміку розсіювання енергії у процесі взаємодії оболонки з хвилею. Аналітичні рішення порівняли з чисельними розрахунками (LS-DYNA), що підтвердило їх високу точність.

Корисні сторони. У статті дається проста, але ефективна формула для оцінки енергетичної відповіді, підтверджено збіжність аналітичних і чисельних рішень, розглянутий підхід придатний для швидкої оцінки поведінки оболонок різної товщини.

Недоліки. Дослідження зосереджене на напівциліндричних оболонках, застосовність до інших геометрій обмежена.

Не враховує складних нелінійних ефектів пошкодження матеріалу.

Запропонована аналітична модель може застосовуватися як швидкий інструмент для попередньої оцінки вибухостійкості тонкостінних оболонок. Це актуально для інженерів, які займаються проектуванням трубчастих або оболонкових конструкцій, де потрібно швидко оцінити енергетичні втрати і потенційні механізми руйнування [11].

Автори створили програму для аналізу і пошуку оптимальних рішень (обчислювальний солвер) для FSI для задач з вибуховими навантаженнями. Він поєднує методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) з методами скінченних елементів (FEM) для опису поведінки тонких еластичних структур під дією ударних хвиль. Розроблений солвер FSI достовірно відтворює динаміку взаємодії ударних хвиль з тонкими пластинами та може застосовуватись для різноманітних вибухових навантажень. У статті наведено приклади: від лабораторних експериментів у ударних трубах до чисельного відтворення реального вибуху.

Корисні сторони. Метод дає реалістичне відтворення FSI-процесів, включно з відбиттям, дифракцією та турбулентністю, дозволяє досліджувати режими, які важко перевірити експериментально.

Дає інструмент для перевірки інших, простіших моделей.

Недоліки. Метод є дуже ресурсомістким.

Потребує детальної інформації про матеріальні параметри та геометрію для точного відтворення.

Розроблений FSI-солвер є потужним інструментом для дослідників, які вивчають нелінійні процеси взаємодії ударної хвилі з конструкцією. Його можна використовувати для перевірки спрощених моделей, а також для складних сценаріїв, де потрібна висока точність. Це робить його важливим інструментом для досліджень фундаментальних аспектів вибухостійкості.

Висновки

Огляд статей [1–11] демонструє зближення двох раніше відокремлених напрямків досліджень: сейсмічного аналізу та аналізу імпульсних (вибухових) впливів.

В процесі розв'язку задач утворилася спільна методична площина імовірнісного моделювання, багаторівневого (multi-fidelity) чисельного розрахунку та сурогатного моделювання. Сукупно це формує практичний фундамент для уточнених теорій розрахунку елементів конструкцій під дією динамічних навантажень, із фокусом на міцність і

стійкість та врахування алеторних і епістемічних невизначеностей.

Основа досліджень, що впливає з огляду має багато напрямків.

Імовірнісна постановка та функції крихкості. Роботи [1–4] переходять від детермінованих схем до ієрархії «hazard → fragility → decision» (PBEE), будуючи крихкість, як інженерний інструмент із довірчими межами та багатовимірними EDP.

Економія обчислень без втрати змісту. Multi-fidelity ієрархічний крігінг [1] поєднує спрощені та детальні моделі; SPCE [4] і DR-SM [2], дають швидкий перехід до повних (умовних) розподілів реакцій; Kriging+GSA [3] робить прозорою епістемічну складову та пріоритизацію параметрів.

Проектні «скорочені форми». У вибуховому блоці безрозмірні показники (класифікатори) пошкоджень [5], P–I діаграми з урахуванням здатності до пластичних деформацій [7] та аналітичні енергетичні моделі оболонок [10] перетворюють важке 3D-моделювання на керовані інженерні правила прийняття рішень.

Еталонна валідація. FSI-солвер [11] забезпечує «верхню полицю» точності для перевірки й калібрування спрощених підходів; експериментально-чисельні дослідження тонкостінних пластин у СВ/UB-умовах [9] та вузлів CFT [6] надають дані для перевірки моделей.

Дослідження сейсмічних дій. Коли даних мало або повний нелінійний розрахунок надто дорогий застосовуються multi-fidelity з ієрархічним крігінгом [1], для багатовимірних корельованих EDP (дрейфи поверхів, зусилля, прогини): DR-SM [2], для масового сканування сценаріїв та рідкісних подій: SPCE [4], для прозорості невизначеностей і цільового зменшення епістеміки: Kriging, GSA [3].

Дослідження імпульсних (вибухових) дій. Для швидкої оцінки режимів пошкодження й масштабування результатів між геометріями використовуються безрозмірні критерії [5], P–I діаграми як практичний інструмент попереднього проектування з урахуванням здатності до пластичних деформацій [7],

аналітичні енергетичні моделі для оболонок як інформативні «опори» до 3D-FE [10], FSI як «еталон» для складних сценаріїв [11], експерименти/число для СВ/UB-ефектів у тонкостінних елементах [9] і силових вузлах [6].

Дія рухомого навантаження. Хоча рухоме навантаження прямо не розглянуто у [1–11], запропоновані інструменти досліджень можна використати: SPCE [4] та DR-SM [2] для стохастичності збудження та багатовимірних реакцій; Kriging+GSA [3] для прозорості невизначеностей; multi-fidelity [1] для керованої вартості розрахунків.

Якщо потрібно швидко отримати достовірні криві крихкості за обмежених ресурсів використовуються методики [1; 4]; якщо ключова задача є взаємозв'язок багатьох показників стійкості (міжповерхові дрейфи, локальні деформації), то основою досліджень буде методика, що розглянута в [2]; якщо критичним є контроль епістемічної невизначеності та визначення впливових параметрів, основою буде [3].

Для проектних рішень у вибухостійкості й масштабування сценаріїв використовуються методики, що розглянуті в роботах [5; 7; 10]; для високоточних перевірок [11], для СВ/UB-ефектів у тонкостінних елементах [9]; для загальної методичної карти [8].

Ключові обмеження: залежність від якісної калібровки збудження (штучні рухи у [1]); вибір ознак у DR-SM [2]; стабільність GP у «хвостах» [3]; потреба адаптивного добору навчальних точок у SPCE [4].

Практичний алгоритм інтеграції можна розділити на етапи 1–6.

1. Опис дії (сейсміка/вибух/рухомий об'єкт) зі спектром невизначеностей.

2. Ієрархія моделей елемента (SDOF/DOF → 3D-FE → FSI для еталонів).

3. Сурогатний шар: SPCE [4] / DR-SM [2] / Kriging [3], за потреби — multi-fidelity [1].

4. Криві крихкості P–I безрозмірні критерії [5; 7; 10].

5. GSA та інтервали довіри [3].

6. Валідація експериментами/FSI [9; 11] і уточнення параметрів.

Найбільш корисні для впровадження: коли бракує даних/дорогі FE, multi-fidelity та НК [1];

для багатовимірних, корельованих реакцій (складні системи) [2];

коли прозора епістеміка та цільове зниження невизначеності [3];

при швидкому скринінгу сценаріїв/«хвостів» розподілів [4];

прикладні інструменти (безрозмірні критерії, P–I, аналітика) [5; 7; 10];

забезпечує еталонну точність і верифікацію спрощень [11]; ключ до СВ/UB-ефектів [9]; базовий методичний ландшафт [8].

Сукупність підходів [1–11] дозволяє системно поєднати стохастичну природу динамічних впливів із керованою вартістю розрахунків, надаючи як точні (FSI/3D-FE), так і оперативні (SPCE/DR-SM/Kriging, P–I, безрозмірні критерії) інструменти. Це дає практично застосовну, узгоджену основу для уточнених теорій розрахунку елементів конструкцій під сейсмічними, вибуховими та (через перенесення методів) рухомими навантаженнями з чітким відображенням міцності, стійкості та ризику відмови.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abbiati G., Broccardo M., Abdallah I., Marelli S., Paolacci F. Seismic Fragility Analysis Based on Artificial Ground Motions and Surrogate Modeling of Validated Structural Simulators. *enrXiv (Draft)*. Aarhus University, University of Trento, ETH Zurich, Roma Tre University, 2021.
2. Kim J., Wang Z. Uncertainty Quantification for Seismic Response Using Dimensionality Reduction-Based Stochastic Simulator. *Preprint submitted to Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. University of California, Berkeley, 2024.
3. Gauchy C., Feau C., Garnier J. Uncertainty Quantification and Global Sensitivity Analysis of Seismic Fragility Curves Using Kriging. *arXiv preprint*, arXiv:2210.06266, 2022.
4. Zhu X., Broccardo M. & Sudret B. Seismic fragility analysis using stochastic polynomial chaos expansions. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2023. № 72. P. 103413. URL: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103413>

5. Li L.-M., Zhang D., Yao S.-J. Damage Mode Analysis of Steel Box Structures Subjected to Internal Blast Loading. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 21. P. 10974. URL: <https://doi.org/10.3390/app122110974>
6. Shin J., Hwang S.-H., Kim J. Numerical Investigation of Blast Performance of Plate-Reinforced Moment-Resisting Connection Using Large Concrete Filled Tubular Section. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 11. P. 3700. URL: <https://doi.org/10.3390/app10113700>
7. Zhao H., Zeng F., Feng X., Wang S., Huang C., Liu N., Zhang J. Dynamic Response Analysis Method of a High-Strength RC Beam Subjected to Long-Duration Blast Loading. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 6. P. 1612. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14061612>
8. Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J. Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview. *Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE)*. 2007. Special Issue. Pp. 76–91. URL: <https://doi.org/10.56748/ejse.671>
9. Yao S., Chen Y., Sun C., Zhao N., Wang Z., Zhang D. Dynamic Response Mechanism of Thin-Walled Plate under Confined and Unconfined Blast Loads. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, № 2. P. 224. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12020224>
10. Liu P., Xu N., Pan Z.-H. A New Analytical Prediction for Energy Responses of Hemi-Cylindrical Shells to Explosive Blast Load. *Buildings*. 2019. Vol. 9, № 7. P. 168. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings9070168>
11. Bailoor S., Annangi A., Seo J. H., Bhardwaj R. (A fluid-structure interaction solver for compressible flows with applications to blast loading on thin elastic structures). *Applied Mathematical Modelling*. 2017. № 52. Pp. 470–492. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.05.038>

REFERENCES

1. Abbiati G., Broccardo M., Abdallah I., Marelli S. and Paolacci F. Seismic Fragility Analysis Based on Artificial Ground Motions and Surrogate Modeling of Validated Structural Simulators. engrXiv (Draft). Aarhus University, University of Trento, ETH Zurich, Roma Tre University, 2021.
2. Kim J. and Wang Z. Uncertainty Quantification for Seismic Response Using Dimensionality Reduction-Based Stochastic Simulator. Preprint submitted to Earthquake Engineering and Structural Dynamics. University of California, Berkeley, 2024.
3. Gauchy C., Feau C. and Garnier J. Uncertainty Quantification and Global Sensitivity Analysis of Seismic Fragility Curves Using Kriging. arXiv preprint, arXiv:2210.06266, 2022.
4. Zhu X., Broccardo M. and Sudret B. Seismic fragility analysis using stochastic polynomial chaos expansions. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2023, no. 72, p. 103413. URL: <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103413>
5. Li L.-M., Zhang D. and Yao S.-J. Damage Mode Analysis of Steel Box Structures Subjected to Internal Blast Loading. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 21, p. 10974. URL: <https://doi.org/10.3390/app122110974>
6. Shin J., Hwang S.-H. and Kim J. Numerical Investigation of Blast Performance of Plate-Reinforced Moment-Resisting Connection Using Large Concrete Filled Tubular Section. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 11, p. 3700. URL: <https://doi.org/10.3390/app10113700>
7. Zhao H., Zeng F., Feng X., Wang S., Huang C., Liu N. and Zhang J. Dynamic Response Analysis Method of a High-Strength RC Beam Subjected to Long-Duration Blast Loading. *Buildings*. 2024, vol. 14, no. 6, p. 1612. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14061612>
8. Ngo T., Mendis P., Gupta A. and Ramsay J. Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview. *Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE)*. 2007, Special Issue, pp. 76–91. URL: <https://doi.org/10.56748/ejse.671>
9. Yao S., Chen Y., Sun C., Zhao N., Wang Z. and Zhang D. Dynamic Response Mechanism of Thin-Walled Plate under Confined and Unconfined Blast Loads. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024, vol. 12, no. 2, p. 224. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12020224>
10. Liu P., Xu N. and Pan Z.-H. A New Analytical Prediction for Energy Responses of Hemi-Cylindrical Shells to Explosive Blast Load. *Buildings*. 2019, vol. 9, no. 7, p. 168. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings9070168>
11. Bailoor S., Annangi A., Seo J.H. and Bhardwaj R. A fluid-structure interaction solver for compressible flows with applications to blast loading on thin elastic structures. *Applied Mathematical Modelling*. 2017, no. 52, pp. 470–492. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.05.038>

Стаття надійшла до редакції: 01.02.2026.