

ISSN 2786-4588 (Print)
ISSN 2786-4596 (Online)

Міністерство освіти і науки України
Херсонський державний аграрно-економічний університет



Таврійський науковий вісник

Серія: Технічні науки

Випуск 2
Частина 2



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

ISSN 2786-4588 (Print)
ISSN 2786-4596 (Online)

*Рекомендовано до друку вченою радою Херсонського державного аграрно-економічного університету
(протокол № 11 від 26.03.2026 року)*

Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки / Херсонський державний аграрно-економічний університет. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2026. Вип. 2. Частина 2. 480 с.

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 2933 від 24.10.2024 року.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Херсонський державний аграрно-економічний університет (вул. Стрітенська, буд. 23, м. Херсон, 73006, office@ksaeu.kherson.ua, тел. +38(050) 571-19-13)

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України від 29.06.2021 № 735 (додаток 4) журнал внесений до переліку фахових видань України категорії «Б» (спеціальності: F3 – Комп'ютерні науки; F4 – Системний аналіз та наука про дані; G13 – Харчові технології; G19 – Будівництво та цивільна інженерія).

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

Редакційна колегія:

Дзюндзя О.В. – доцент кафедри інженерії харчового виробництва Херсонського державного аграрно-економічного університету, к.т.н., доцент – головний редактор; **Антоненко А.В.** – доцент кафедри готельно-ресторанного бізнесу ПВНЗ «Київський університет культури», к.т.н., доцент; **Балихіна Г.А.** – провідний науковий співробітник відділення землеробства, меліорації та механізації апарату Президії НААН, к.т.н.; **Березовський Ю.В.** – доцент кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації Херсонського національного технічного університету, д.т.н., доцент; **Бровенко Т.В.** – доцент кафедри готельно-ресторанного і туристичного бізнесу Київського національного університету культури і мистецтв, к.т.н., доцент; **Вороненко М.О.** – доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук Херсонського національного технічного університету, к.т.н., доцент; **Гончаренко А.В.** – професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден Національного авіаційного університету, д.т.н., професор; **Гопесенко В.** – проректор з наукової роботи, директор навчальної програми магістратури «Комп'ютерні системи» Університету прикладних наук ISMA, Dr.sc.ing., професор (Рига, Латвійська Республіка); **Горальчук А.Б.** – професор кафедри харчових технологій в ресторанній індустрії Харківського державного університету харчування та торгівлі, д.т.н., професор; **Димова Г.О.** – доцент кафедри менеджменту та інформаційних технологій Херсонського державного аграрно-економічного університету, к.т.н.; **Коваленко О.О.** – завідувач кафедри біоінженерії і води Одеської національної академії харчових технологій, д.т.н., професор; **Ковальчук П.І.** – головний науковий співробітник Інституту водних проблем і меліорації НААН, д.т.н., професор; **Кузьмич Л.В.** – головний науковий співробітник Інституту водних проблем і меліорації НААН, д.т.н., доцент; **Кузьміна Т.О.** – професор кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації Херсонського національного технічного університету, д.т.н., професор; **Лобода О.М.** – доцент кафедри менеджменту та інформаційних технологій Херсонського державного аграрно-економічного університету, к.т.н., доцент; **Марсанов В.В.** – член спеціалізованої Вченої ради ДФ 67.052.003 Херсонського національного технічного університету, д.т.н., професор; **Матяш Т.В.** – старший науковий співробітник, завідувач відділу інформаційних технологій та маркетингу інновацій Інституту водних проблем і меліорації НААН, к.т.н.; **Отрош Ю.А.** – начальник кафедри пожежної, профілактики в населених пунктах факультету пожежної безпеки Національного університету цивільного захисту України, д.т.н., професор; **Пневматікос Н.** – доцент кафедри будівництва Університету Західної Аттики, к.т.н., доцент (Афіни, Греція); **Романенко Р.П.** – доцент кафедри інженерно-технічних дисциплін Київського національного торговельно-економічного університету, к.т.н.; **Степанчиков Д.М.** – доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики Херсонського національного технічного університету, к.ф.-м.н., доцент; **Стригунівська О.В.** – Гірничо-металургійна академія імені Станіслава Сташиця, к.т.н., доцент (Краків, Республіка Польща); **Сурьянінов М.Г.** – завідувач кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури, д.т.н., професор; **Ткаченко О.Б.** – професор, завідувачка кафедри технології вина та сенсорного аналізу Одеської національної академії харчових технологій, д.т.н., доцент; **Турченко В.О.** – професор кафедри водної інженерії та водних технологій Національного університету водного господарства та природокористування, д.т.н., доцент.

УДК 614.8

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.2.2.43>

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ ДВОТАВРОВИХ КОЛОН ЗА УМОВ ВИБУХОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Пурденко Р. Р. – аспірант

Національного університету цивільного захисту України

ORCID ID: 0000-0001-6467-4133

Рашкевич Н. В. – доктор філософії, доцент кафедри державного нагляду
у сфері пожежної та техногенної безпеки

Національного університету цивільного захисту України

ORCID ID: 0000-0001-5124-6068

У статті розроблена чисельна комп'ютерна модель напружено-деформованого стану сталевих двотаврових колон за умов вибухового навантаження. Для дослідження використано скінченно-елементний підхід із урахуванням геометричної нелінійності, імпульсного характеру навантаження та впливу осевого стиску. Експериментальні дані польових та лабораторних випробувань стали основою для перевірки достовірності моделі, що дозволило оцінити точність прогнозування максимальних прогинів, залишкових деформацій та динамічної поведінки колон. Проведено параметризацію вибухового впливу, включаючи масу заряду, відстань до колони та масштабовану відстань, а також визначено характеристики матеріалу та геометрію перерізу. Модель враховує частотозалежне демпфування за методом Рейля та дозволяє відтворювати затухаючі коливання після завершення позитивної фази вибуху. Результати чисельного моделювання показали задовільну узгодженість з експериментальними даними: відхилення максимальних переміщень не перевищували 10,5%. У ході аналізу мозаїк переміщень та часових діаграм підтверджено правильність відтворення динамічної відповіді конструкції та вплив нелінійних ефектів, контактних взаємодій і локальних пластичних деформацій. Запропонований підхід може бути використаний для подальших досліджень поведінки сталевих конструкцій під впливом вибухових імпульсів, високих температур та оптимізації конструктивних рішень для підвищення стійкості будівель до навантажень. Отримані результати є базою для розробки методик оцінки ризиків руйнування та проєктування захисних елементів у будівлях із сталевим каркасом.

Ключові слова: сталеві двотаврові колони, вибухове навантаження, напружено-деформований стан, скінченно-елементна модель, LIRA-FEM.

Purdenko R. R., Rashkevich N. V. Modeling of the stress-strain state of steel I-beam columns under blast loading

The article presents a numerical computer model of the stress-strain state of steel I-beam columns under blast loading. A finite element approach was used to study the problem, taking into account geometric nonlinearity, the impulsive nature of the load, and the influence of axial compression. Experimental data from both field and laboratory tests served as the basis for model validation, enabling the assessment of the accuracy in predicting maximum deflections, residual deformations, and the dynamic behavior of the columns. Blast loading was parameterized, including charge mass, distance to the column, and scaled distance, and the material properties and cross-sectional geometry were defined. The model incorporates frequency-dependent damping using Rayleigh's method and allows the reproduction of decaying oscillations following the positive phase of the blast. Numerical results showed satisfactory agreement with experimental data, with deviations in maximum displacements not exceeding 10.5%. Analysis of

© Пурденко Р. Р., Рашкевич Н. В., 2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

displacement contours and time histories confirmed the correct reproduction of the structural dynamic response, including the effects of nonlinearities, contact interactions, and local plastic deformations. The proposed approach can be applied to further studies of steel structures under blast impulses, high temperatures, and for optimizing structural solutions to enhance building resilience. The obtained results provide a basis for developing methods for failure risk assessment and the design of protective elements in steel-framed buildings.

Key words: steel I-beam columns, blast loading, stress-strain state, finite element model, LIRA-FEM.

Постановка проблеми. Вибухові навантаження, що виникають унаслідок техногенних аварій або бойових дій, є одним із небезпечних факторів впливу на будівлі та споруди. На відміну від статичних навантажень, вибуховий вплив характеризується високою інтенсивністю та короткочасністю дії, що зумовлює складний нестаціонарний динамічний характер роботи конструкцій.

Одними з основних несучих елементів будівель зі сталевим каркасом є колони двотаврового перерізу, які за умов вибухового навантаження зазнають сумісної дії осевого стиску та імпульсного поперечного навантаження. Це призводить до виникнення значних прогинів та коливань, що може впливати на несучу здатність та загальну стійкість конструкції.

Інструментом дослідження поведінки конструкцій за таких умов є скінченно-елементне моделювання, яке дозволяє враховувати динамічний характер навантаження, геометричну нелінійність та інші особливості роботи елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В нормативних документах переважно використовують спрощені підходи до врахування вибухових впливів. Так, у розділі 5 частини 7 Єврокоду 1 [1] рекомендовано проєктувати основні елементи конструктивної системи (зокрема колони першого поверху) таким чином, щоб вони зберігали несучу здатність за дії вибухового навантаження. При цьому допускається застосування квазістатичної ідеалізації вибухового тиску. Аналогічні підходи наведено в керівництві [2], де пропонуються емпіричні методи проєктування захисних конструкцій для окремих сценаріїв вибухів, зокрема зовнішніх вибухів частково відкритих об'ємів та внутрішніх детонацій.

У науковій літературі розвиваються експериментальні, аналітичні та чисельні методи дослідження поведінки сталевих конструкцій під вибуховим навантаженням.

Експериментальні підходи включають польові вибухові випробування [3, 4], де на конструкції впливають заряди вибухових речовин, що дозволяють контролювати параметри ударної хвилі та масштаб досліду. Результати показали, що розподіл деформацій і напружень залежить від відстані до вибуху та величини заряду.

У [5] розглядається динамічна відповідь сталевих елементів на ударну хвилю у контролюваному лабораторному середовищі за допомогою симулятора вибухових хвиль. Дослідження показали, що реакція сталевих елементів відрізняється від класичних аналітичних прогнозів, а чинники взаємодії між хвилею та структурою мають вплив на параметри динамічної відповіді.

У [6] автор описує широкий набір експериментальних та чисельних методів для оцінки поведінки сталевих колон під вибуховим навантаженням. Поєднання експериментальних тестів із чисельним моделюванням дозволяє отримати більш обґрунтовані прогнози динамічної поведінки колон, враховуючи нелінійні ефекти деформацій матеріалів та взаємодії структурної геометрії з ударною хвилею.

Використання аналітичних методів, дозволяє оцінити реакцію конструкцій на імпульсні навантаження без необхідності проведення масштабних польових

експериментів. Аналітичні підходи зазвичай базуються на спрощених моделях, таких як еквівалентні системи з одним ступенем свободи (SDOF) [7, 8] або багатоступеневі моделі (MDOF) [8], які дозволяють описати взаємодію сталевих елементів з ударною хвилею, враховуючи як пружну, так й пластичну поведінку матеріалу.

Для дослідження поведінки конструкцій при вибухових та імпульсних навантаженнях широко застосовуються методи чисельного моделювання, зокрема скінченно-елементний метод (FEM) [9], який реалізований у програмних комплексах LS-DYNA, ABAQUS та LIRA-FEM. Чисельні моделі дозволяють враховувати складну геометрію конструкцій, нелінійні властивості матеріалів, контактні взаємодії та часову змінність навантаження, що забезпечує більш точне відтворення процесів деформування і руйнування елементів [9–11].

В роботах [12–14] чисельне моделювання отримало подальший розвиток та застосування. Зокрема, дослідники [12] досліджували вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій та визначали критичні параметри їхнього прогріву. У [13] проведено моделювання поведінки залізобетонних колон під дією пожежних навантажень для підвищення рівня пожежної безпеки. Дослідники [14] розглядали чисельне моделювання стійкості та надійності системи ґрунт–фундамент–будівля при дії комбінованих силових та високотемпературних впливів, що дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан конструкцій та оцінювати ризики пошкоджень.

Таким чином, питання прогнозування напружено-деформованого стану сталевих колон за умов вибухового навантаження потребує подальших досліджень, зокрема у напрямі вдосконалення комп'ютерних моделей.

Мета та постановка задачі дослідження. Метою роботи є розроблення та перевірка достовірності комп'ютерної скінченно-елементної моделі прогнозування напружено-деформованого стану сталевих двотаврових колон за умов вибухового навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити **завдання**:

- проаналізувати експериментальні дослідження динамічної відповіді сталевих двотаврових колон за умов вибухового навантаження та визначити вихідні параметри для моделювання;

- розробити скінченно-елементну модель сталевий двотаврової колони з урахуванням осьового стиску, імпульсного характеру вибухового навантаження та геометричної нелінійності;

- виконати чисельне моделювання та провести перевірку достовірності моделі шляхом порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними.

Виклад основного матеріалу. В якості експериментальної бази для перевірки достовірності розробленої комп'ютерної моделі прийнято результати натурних вибухових випробувань [1]. Випробувано 13 колон висотою 2413 мм із перерізами W150x24 та W200x71. Геометричні характеристики двотаврових сталевих колон наведено в таблиці 1.

Статична границя текучості сталі становила 393 МПа для перерізу W150x24 та 362 МПа для W200x71.

Осьове стискаюче навантаження задавалося шляхом попереднього напруження тросів, які кріпилися до сталевих пластин, приварених до торців колон (рис. 1). Рівень осьової сили становив 25 % від статичної осьової несучої здатності відповідного перерізу, що забезпечувало роботу елемента в умовах сумісної дії стиску та поперечного імпульсного навантаження.

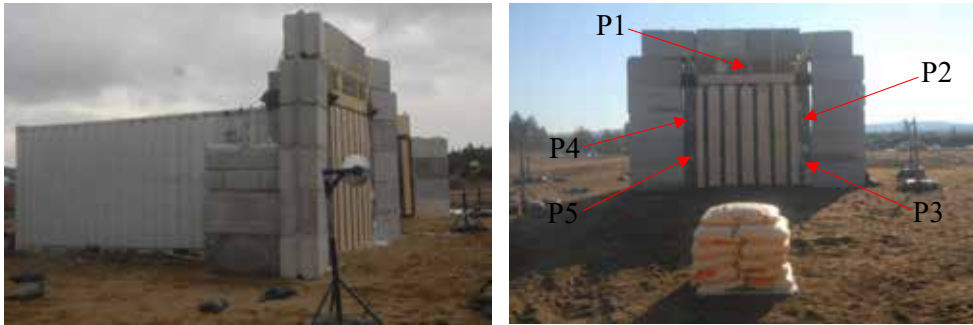
Таблиця 1

Геометричні характеристики двотаврових сталевих колон за стандартом

Вимір	Значення	
	W150x24	W200 x 71
Висота, А	160 мм	216 мм
Ширина полиці, В	102 мм	206 мм
Товщина полиці, S	10,3 мм	17,4 мм
Товщина стінки, L	6,6 мм	10,2 мм
Радіус заокруглення	11,7 мм	16,6 мм

*Рис. 1. Система попереднього напруження для задавання осевого навантаження*

Вибухові випробування проводилися на спеціальній установці із залізобетонними блоками, які виконували роль опорних елементів (рис. 2).



а)

б)

Рис. 2. Схема вибухових випробувань: а) вигляд спереду; б) вигляд збоку

Під час випробувань надлишковий тиск фіксували датчиками тиску, переміщення – лінійними потенціометрами, а деформації у кількох точках уздовж висоти колон – тензодатчиками.

Вибухова дія характеризується масою заряду W (кг) та відстанню до заряду R (м). Для порівняння режимів вибуху використовували масштабовану відстань Z ($\text{м/кг}^{1/3}$), яку визначали за залежністю:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}, \quad (1)$$

У таблиці 2 наведено параметри випробувань, на рисунку 3 – схематичне зображення вибухових випробувань сталевих двотаврів.

Таблиця 2

Параметри випробувань сталевих двотаврів

№ з/п	Параметри зразків	Осьове навантаження, кН	Маса заряду, кг	Відстань R , м	Масштабована відстань W , $\text{м/кг}^{1/3}$	Коефіцієнт пружності, Н/м
1.	W150x24	270	100	10,3	2,22	100
2.	W150x24	270	150	9	1,69	38
3.	W200x71	640	250	9,5	1,51	27

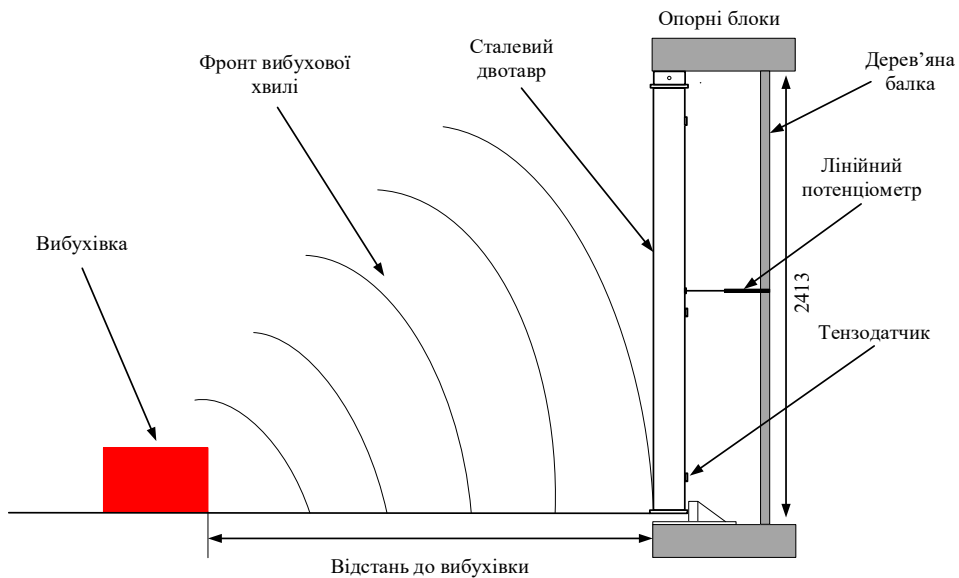


Рис. 3. Схематичне зображення вибухових випробувань сталевих двотаврів

Для оцінки надлишкового тиску позитивної фази вибухової хвилі застосовано модифікований аналітичний вираз у формі рівняння Фрідлендера:

$$P(t) = P_{max} \left(1 - \frac{t}{t_d} \right) \exp \left(-\gamma \frac{t}{t_d} \right), \quad (2)$$

де $P(t)$ – миттєве значення надлишкового тиску вибухової хвилі в момент часу, кПа; P_{max} – піковий надлишковий тиск, кПа; γ – параметр форми, приймається в межах від 2 до 3; t_d – тривалість позитивної фази вибуху, с; t – тривалість вибуху, с.

Динамічна робота балки-колони описувалася рівнянням руху:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + P \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = w(x, t) \quad (3)$$

де EI – згинальна жорсткість колони; y – поперечне переміщення; P – осьове навантаження; $w(x, t)$ – вибухове навантаження як функція часу t та відстані x вздовж балки-колони; m – маса на одиницю довжини.

У скінченно-елементній моделі формула (3) набуває вигляд:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K(u)u = F(t) \quad (4)$$

де M – матриця мас системи, кг; \ddot{u} – вектор прискорень вузлів конструкції, м/с²; C – матриця демпфування, кг/с; \dot{u} – вектор швидкостей вузлів, м/с; K – матриця жорсткості конструкції; u – вектор вузлових переміщень, м; $F(t)$ – вектор зовнішніх навантажень, що змінюються в часі, кПа.

Часові залежності переміщення середини висоти двотавра, які було зафіксовано під час експерименту, наведені на рисунку 4.

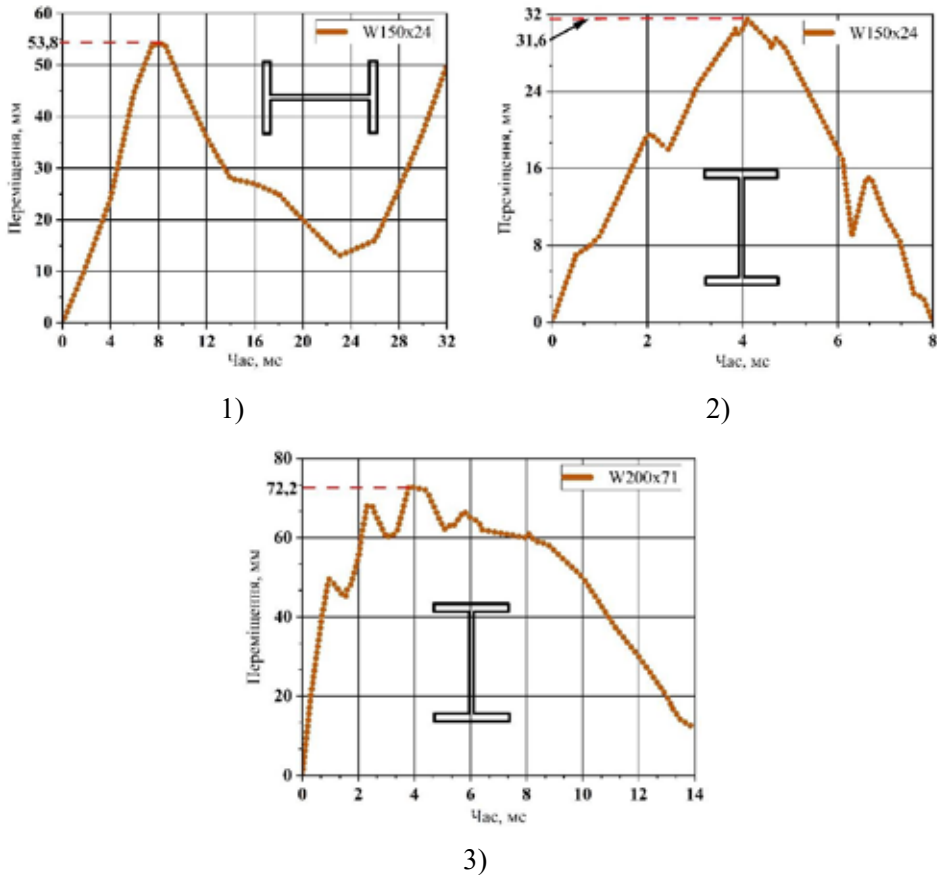


Рис. 4. Експериментальні графіки переміщення середини висоти колони у часі [1]:

1) двотавра $W150 \times 24$, тиск вибуху 721 кПа; 2) двотавра $W150 \times 24$, тиск вибуху 1750 кПа; 3) двотавра $W200 \times 71$, тиск вибуху 2151 кПа

Перед застосуванням імпульсного навантаження проведено попередній статичний розрахунок для формування початкового напружено-деформованого стану, а також модальний аналіз для визначення власних частот, форм коливань та параметрів демпфування.

Чисельне моделювання зазначених випробувань було виконано у програмному комплексі LIRA-FEM у постановці нестационарної динамічної задачі з урахуванням геометричної нелінійності. У створеній моделі (рис. 5) відтворено геометричні характеристики перерізів – таблиця 1, задано характеристики сталі та прикладено осьове стискаюче навантаження – таблиця 2. В таблиці 3 наведено вихідні дані для задання вибухового навантаження.

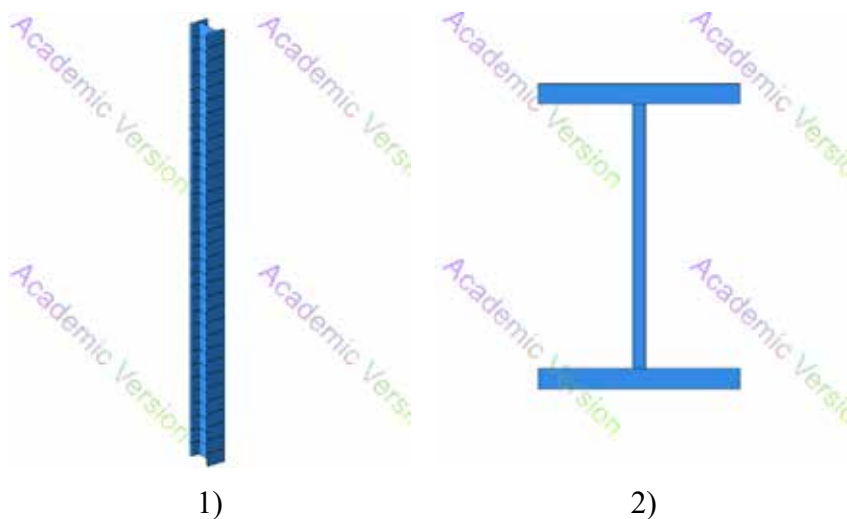


Рис. 5. Скінченно-елементна модель сталевій двотавровій колоні:
1) вид збоку; 2) вид у плані

Таблиця 3

Вихідні дані для задання вибухового навантаження

№ з/п	Тип двотавра, вектор вибуху	Відбитий тиск вибуху, кПа	Тривалість позитивної фази, мс	Статичне осьове навантаження, кН
1.	W150x24 	721	6,8	270
2.	W150x24 	1750	4,9	270
3.	W200x71 	2151	8,1	640

Вибухове навантаження прикладали до всіх зовнішніх поверхонь та виступів профілю конструкції, які потенційно є відкритими до фронту вибухової хвилі, у вигляді поверхневого тиску з часовою залежністю $P(t)$.

Перехід від статичного до динамічного розрахунку виконано шляхом задання закону перетворення навантаження у часі (рис. 6).

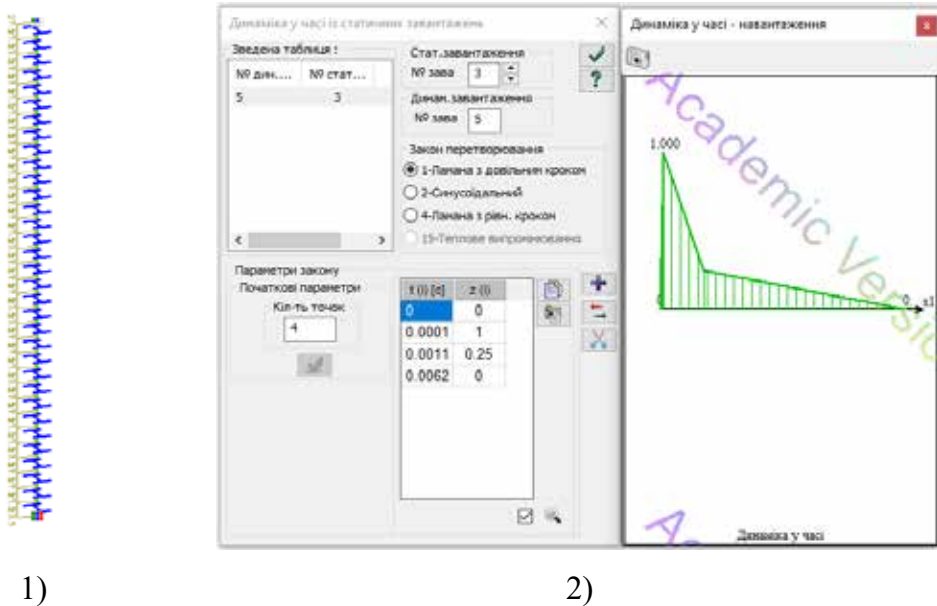


Рис. 6. Задання в скінченно-елементній моделі сталевго двотавра вибухового навантаження: 1) прикладання до площини вибухового навантаження; 2) перетворення навантаження від вибуху в динаміку

У розрахунках динамічного опору сталевго елемента при вибуховому навантаженні демпфування враховано за моделлю Релея, згідно з якою матриця демпфування визначається лінійною комбінацією матриць мас M та жорсткості K :

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (5)$$

де α – масовий коефіцієнт демпфування (од. 1/с); β – жорсткісний коефіцієнт демпфування (од. с).

Для кількісного оцінювання затухання коливань використано логарифмічний декремент δ , який характеризує зменшення амплітуди між двома послідовними піками коливального процесу. Для лінійної системи з в'язким демпфуванням логарифмічний декремент визначається як:

$$\delta = \ln \left(\frac{\chi_k}{\chi_{k+1}} \right), \quad (6)$$

де χ_k та χ_{k+1} – амплітуди двох послідовних максимумів переміщень.

Зв'язок між логарифмічним декрементом δ та коефіцієнтом відносного демпфування ζ для піддемпфованих коливань має вигляд:

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (7)$$

У пружній області роботи сталевих конструкцій характерні значення відносного демпфування становлять $\zeta = 0,5-2\%$, що відповідає логарифмічному декременту $\delta = 0,03-0,13$. Під час короткочасного імпульсного вибухового навантаження ефективне демпфування зростає через контактні взаємодії, тертя в опорах, локальні пластичні деформації, відкриття та закриття тріщин, ковзання у з'єднаннях і зміну жорсткості конструкції під час деформування. Такий підхід є інженерно обґрунтованим, оскільки реальні системи при вибуху втрачають більше енергії, ніж ідеалізована пружна модель.

При використанні моделі Релея демпфування має частотозалежний характер й для i -тої форми коливань описується співвідношенням:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}, \quad (8)$$

де ω_i – значення $2\pi f_i$ – кругова частота i -тої моди.

Вибір коефіцієнтів α і β задає розподіл демпфування за частотами, що дозволяє відтворити характерну для вибухових навантажень частотозалежну втрату енергії. Завдяки цьому високочастотні складові динамічного відгуку затухають швидше, амплітуда швидких коливань зменшується, а часові діаграми переміщень стають більш плавними. Обрані параметри демпфування забезпечують логарифмічний декремент у допустимому діапазоні, що відповідає фізичним властивостям сталевій конструкції під короткочасним вибуховим навантаженням, і підтверджується збігом чисельних результатів з експериментальними даними за максимальним прогином і формою часових діаграм переміщень.

Проведено три варіанти моделювання з різними типами двотаврів та характеристиками вибухового навантаження. За результатами чисельного моделювання отримано мозаїки переміщень, що відображають характер деформацій елементів під дією вибухового імпульсу. Для сталевого двотавра $W150 \times 24$ при надлишковому тиску $P_{max} = 721$ кПа та тривалості позитивної фази $t_d = 6,8$ мс максимальне переміщення складо 58,9 мм, що відповідає 53,8 мм за експериментом, із похибкою 9,48%. Мозаїки переміщень та графік коливань наведено на рисунках 7 та 8.

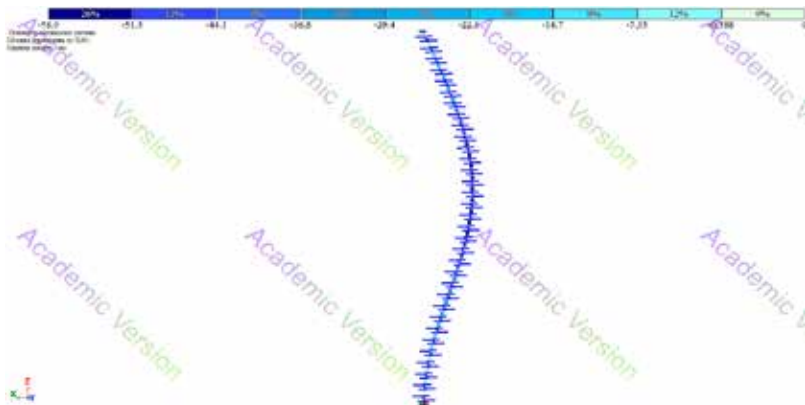


Рис. 7. Мозаїка переміщення сталевого двотавра $W150 \times 24$ в збільшеному у 5 разів масштабі

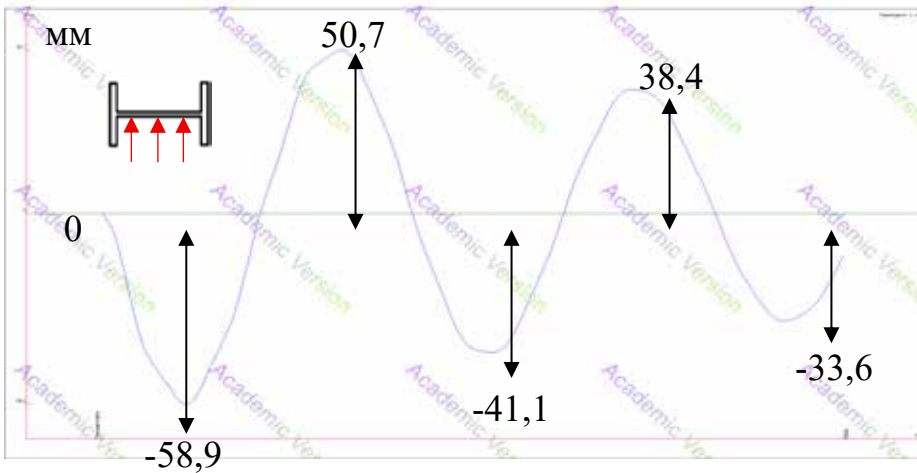





Рис. 8. Період коливань сталевого двотавра під дією вибухового навантаження в 721 кПа

Аналогічно проведено розрахунок напружено-деформованого стану сталевого двотавра W150×24 для інших параметрів вибухового навантаження: $P_{max} = 1750$ кПа, тривалість позитивної фази $t_d = 4,9$ мс; $P_{max} = 2151$ кПа, тривалість позитивної фази $t_d = 8,1$ мс (таблиця 4).

Таблиця 4

Порівняння максимальних переміщень за експериментом та чисельним моделюванням

№ з/п	Тип двотавра	Відбитий тиск вибуху, кПа	Переміщення сталевого двотавра від вибуху, мм		Відносна похибка, %
			Експеримент	Моделювання	
1.	W150x24 	721	53,8	58,9	9,48
2.	W150x24 	1750	31,6	34,9	10,44
3.	W200x71 	2151	72,2	79,1	9,56

Для всіх трьох випробувань отримано узгоджені за характером результати нестационарної динамічної відповіді сталевого двотавра на вибухове навантаження. Мозаїки переміщень фіксують формування згинальної деформації елемента з домінуванням прогинів у напрямку дії імпульсу та подальшим відновлювальним рухом після завершення позитивної фази вибуху. Часові залежності переміщень

мають коливальний, затухаючий характер, після досягнення першого (максимального) переміщення від положення рівноваги спостерігаються послідовні періоди коливань зі зменшенням амплітуди, що свідчить про дисипацію енергії та вплив демпфування. Виявлені закономірності є типовими для імпульсного навантаження й підтверджують коректність відтворення процесу коливань елемента у виконаних розрахунках для всіх трьох випробувань.

Отримані відхилення максимальних переміщень за результатами чисельного моделювання та натурних випробувань не перевищують 10,5 %, що свідчить про задовільну узгодженість розрахункових і експериментальних даних та підтверджує адекватність розробленої скінченно-елементної моделі.

Наявна похибка зумовлена сукупністю факторів: просторово-часовою неоднорідністю реального вибухового тиску, спрощеною постановкою граничних умов у моделі, відмінністю фактичних механічних характеристик матеріалів та геометрії профілю від нормативних значень, наближеним врахуванням демпфування, а також похибками вимірювань та вибором кроку інтегрування в часі.

Висновки. 1. Проаналізовано польові та лабораторні експерименти з динамічної відповіді сталевих двотаврових колон за умов вибухового навантаження. Визначено параметри для моделювання, зокрема часові профілі вибухового тиску, амплітуди переміщень та діапазони деформацій, що дозволяє відтворювати реальні умови випробувань у чисельній моделі.

2. Розроблено FEM-модель сталеві двотаврової колони з урахуванням осьового стиску, імпульсного характеру вибухового навантаження та геометричної нелінійності. Попередній модальний аналіз дозволив визначити власні частоти, форми коливань та ефективно демпфування, необхідні для адекватного опису динамічної поведінки колони.

3. Чисельні результати узгоджуються з експериментальними даними, відхилення максимальних переміщень не перевищують 10,5 %. Модель адекватно відтворює напружено-деформований стан, динамічну відповідь та залишкові деформації, що підтверджує її придатність для прогнозування поведінки конструкцій під вибуховим навантаженням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Eurocode 1, *Actions on Structures-Part 1-7: General Actions-Accidental Actions*. BS EN 1991-1-7. Incorporating corrigendum, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2010.

2. USDOD, *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. Document No. UFC 3-340-02. US Department of Defense, Washington, DC, USA. 2008.

3. Nassr A.A., Razaqpur A.G., Tait M.J., Campidelli M., Foo S. Dynamic response of steel columns subjected to blast loading. *Journal of structural engineering*. 2014. Vol. 140, Is. 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.000092](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000092)

4. Zheng K., Xu X. Experimental and numerical study on the mechanical behavior of composite steel structure under explosion load. *Materials*. 2021. Vol. 14, Is. 2. <https://doi.org/10.3390/ma14020246>

5. Arumugam D., Kaviarasu K., Alagappan P. Experimental study on the dynamic response of steel structure subjected to blast load. *International Journal of Impact Engineering*. 2025. Vol. 205. 105389. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2025.105389>

6. Stewart L.K. Experimental and computational methods for steel columns subjected to blast loading. *Structures Under Shock and Impact XII*. 2012. Vol. 126. P. 157–168. DOI:10.2495/SU120141

7. Lee K., Shin J. Equivalent single-degree-of-freedom analysis for blast-resistant design. *International Journal of Steel Structures*. 2016. Vol. 16. P. 1263–1271. <https://doi.org/10.1007/s13296-016-0073-0>
8. Nassr A.A., Razaqpur A.G., Tait M.J., Campidelli M., Foo S. Single and multi degree of freedom analysis of steel beams under blast loading. *Nuclear Engineering and Design*. 2012. Vol. 242. P. 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.10.020>
9. Al-Thairy H. (2018). Behaviour and failure of steel columns subjected to blast loads: Numerical study and analytical approach. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 2018, Is. 1. 1591384. <https://doi.org/10.1155/2018/1591384>
10. Yan S., Qi B.X., Yan H., Yang L. Numerical simulation on failure modes of light steel columns under high temperature and explosion. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 204. P. 3351–3356. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3351>
11. Lee K., Kim T., Kim J. Local response of W-shaped steel columns under blast loading. *Structural Engineering and Mechanics*. 2009. Vol. 31. no. 1. P. 25–38. <https://doi.org/10.12989/sem.2009.31.1.025>
12. Kovalov A., Purdenko R., Otrosh Y., Tomenko V., Rashkevich N., Shcholokov E., Pidhornyy M., Zolotova N., Suprun O. Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5 (1 (119)). P. 53–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219>
13. Otrosh Ю.А., Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Рашкевич Н.В., Майборода Р.І. Вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 36. С. 102–122. <http://reposit.sc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17038>
14. Пурденко Р.Р., Otrosh Ю.А., Рашкевич Н.В., Сур'янінов В.М. Моделювання стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів. *Механіка та математичні методи*. 2024. VI/1/2024. С. 36–48. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-36-48>

REFERENCES:

1. Eurocode 1 *Actions on Structures-Part 1-7: General Actions-Accidental Actions*. BS EN 1991-1-7. Incorporating corrigendum, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2010.
2. USDOD. *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. Document No. UFC 3-340-02. US Department of Defense, Washington, DC, USA, 2008.
3. Nassr, A.A., Razaqpur, A.G., Tait, M.J., Campidelli, M., Foo, S. (2014). Dynamic response of steel columns subjected to blast loading. *Journal of structural engineering*, 140, 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.000092](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000092)
4. Zheng, K., Xu, X. (2021). Experimental and numerical study on the mechanical behavior of composite steel structure under explosion load. *Materials*, 14, 2. <https://doi.org/10.3390/ma14020246>
5. Arumugam, D., Kaviarasu, K., Alagappan, P. (2025). Experimental study on the dynamic response of steel structure subjected to blast load. *International Journal of Impact Engineering*, 205, 105389. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2025.105389>
6. Stewart, L.K. (2012). Experimental and computational methods for steel columns subjected to blast loading. *Structures Under Shock and Impact XII*, 126, 157–168. DOI: 10.2495/SU120141
7. Lee, K., Shin, J. (2016). Equivalent single-degree-of-freedom analysis for blast-resistant design. *International Journal of Steel Structures*, 16, 1263–1271. <https://doi.org/10.1007/s13296-016-0073-0>
8. Nassr, A.A., Razaqpur, A.G., Tait, M.J., Campidelli, M., Foo, S. (2012). Single and multi degree of freedom analysis of steel beams under blast loading. *Nuclear Engineering and Design*, 242, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.10.020>

9. Al-Thairy, H. (2018). Behaviour and failure of steel columns subjected to blast loads: Numerical study and analytical approach. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1, 1591384. <https://doi.org/10.1155/2018/1591384>
10. Yan, S., Qi, B.X., Yan, H., Yang, L. (2012). Numerical simulation on failure modes of light steel columns under high temperature and explosion. *Applied Mechanics and Materials*, 204, 3351–3356. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.3351>
11. Lee, K., Kim, T., Kim, J. (2009). Local response of W-shaped steel columns under blast loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 31, 1, 25–38. <https://doi.org/10.12989/sem.2009.31.1.025>
12. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shchokolov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219>
13. Otrosh, Yu.A., Koval'ov, A.I., Purdenko, R.R., Rashkevich, N.V., Mayboroda, R.I. (2022). Vohnestiykist' vohnnezakhyshchenykh zalizobetonnykh konstruktsiy dlya pidvyshchennya rivnya pozhezhnoyi bezpeky [Fire resistance of fireproof reinforced concrete structures to increase the fire safety level of facilities]. *Problems of Emergency Situations*, 36, 102–122. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17038> [in Ukrainian].
14. Purdenko, R.R., Otrosh, Yu.A., Rashkevich, N.V., Sur'yaninov, V.M. (2024). Modelyuvannya stiykosti ta nadiynosti systemy hrunt-fundament-budivlya pry diyi sylovykh ta vysokotemperaturnykh vplyviv [Simulation of stability and reliability of the soilfoundation-building system under force and hightemperature influences]. *Mechanics and mathematical methods*. VI/1/2024, 36–48. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-1-36-48> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 14.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 21.05.2026

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ	374
Вітровий А. О., Попович П. В., Розум Р. І., Галиш Н. А., Вітровий В. А. Особливості та роль будівельної нормативної бази в Україні	374
Гасенко А. В., Міщенко Р. Р. Визначення технічних станів пошкоджених мостових споруд із залізобетону за сучасними нормативами	382
Гасенко Л. В., Крижанівський Я. С. Чисельний розрахунок згинаних композитних конструкцій із врахуванням нелінійностей	390
Захарчук О. П., Мартенюк В. М., Шпінталь М. Я., Шевчук О. С., Захарчук В. Б. Оцінка ефективності програмних продуктів для інженерного проектування систем водопостачання та каналізації	398
Овсій Д. М. Концепції об'ємно-конструктивного формування вбудованих споруд подвійного призначення в умовах реконструкції закладів загальної середньої освіти	404
Пурденко Р. Р., Рашкевич Н. В. Моделювання напружено-деформованого стану сталевих двотаврових колон за умов вибухового навантаження	414
Семко П. О., Остапов І. С. Програма експериментальних досліджень ураження огорожуючих конструкцій уламками.....	427
Слободяник Г. В., Шидер О. І. Підбір типу плит перекриття при ревіталізації будівлі з врахуванням особливостей виробництва будівельно-монтажних робіт	434
Усенко Д. В., Кудінова А. О. Ресурсоощадні рішення з управління відновленням пошкоджених позапроектними впливами цегляних будівель стінової конструктивної схеми	445
Щолоков Е. Е., Балло Я. В. Програма-методика експериментального дослідження оцінювання процесів евакуювання з дошкільних навчальних закладів дітей різних вікових груп	453
Яценко В. М., Шагалова Ж. О. Аналіз стану державної геодезичної мережі на деокупованих територіях України.....	465

CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING	374
Vitrovyi A. O., Popovich P. V., Rozum R. I., Halysh N. A., Vitrovyi V. A. Features and role of the construction regulatory framework in Ukraine.....	374
Hasenko A. V., Mishchenko R. R. Determination of the technical condition of damaged reinforced concrete bridge structures in accordance with standards.....	382
Hasenko L. V., Kryzhanivskiy Ya. S. Numerical calculation of bent composite structures taking into account nonlinearities.....	390
Zakharchuk O. P., Martenyuk V. M., Shpintal M. Ya., Shevchuk O. S., Zakharchuk V. B. Evaluation of the effectiveness of software products for engineering design of water supply and sewage systems	398
Ovsii D. M. Concepts of spatial and structural design of built-in dual-purpose rooms for shelter in school buildings under reconstruction.....	404
Purdenko R. R., Rashkevich N. V. Modeling of the stress–strain state of steel I-beam columns under blast loading	414
Semko P. O., Ostapov I. S. Program of experimental research on fragmentation damage to enclosure structures	427
Slobodyanyk H. V., Shyder O. I. Selection of floor slab type during building revitalization considering the features of construction and installation works.....	434
Usenko D. V., Kudinova A. O. Resource-saving solutions for managing the restoration of brick buildings damaged by non-project-related impacts of wall construction schemes	445
Shcholokov E. E., Ballo Ya. V. Program-methodology of an experimental study for evaluating evacuation processes of children of different age groups from preschool educational institutions	453
Yatsenko V. M., Shatalova Zh. O. Analysis of the State Geodetic Network in the Deoccupied Territories of Ukraine.....	465

Таврійський науковий вісник

Випуск 2

Частина 2

Серія: Технічні науки

Дата розміщення онлайн – 21.05.2026 р.

Дата друку – 28.05.2026 р.

Формат 70×100/16. Папір офсетний.

Умовн. друк. арк. 39,0. Зам. № 0526/396

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

Україна, м. Одеса, 65101, вул. Інглєзі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934-48-28, +38 (097) 723-06-08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.