

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет машинобудування та транспорту
(повне найменування інституту, назва факультету(відділення))

Кафедра галузевого машинобудування
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Моделювання віброударного навантаження конструкцій»

08-62.МКР.01.000.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу, групи 1ГМ-24м
спеціальності 133 – Галузеве машинобудування
(шифр) назва напрямку підготовки, спеціальності)

БЛАГОДІР Павло
(прізвище та ініціали)
Керівник: д. т. н., професор кафедри ГМ

СИВАК Роман
(прізвище та ініціали)
« 12 » грудня 2025 р.

Опонент: к. т. н., завідувач кафедри АТМ

ЦИМБАЛ Сергій
(прізвище та ініціали)
« 12 » грудня 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ГМ Л. Поліщук
д. т. н., проф. ПОЛІЩУК Леонід
(прізвище та ініціали)

« 12 » грудня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 р.

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра галузевого машинобудування
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 13 Механічна інженерія
Спеціальність – 133 – Галузеве машинобудування
Освітньо-професійна програма – Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

Леонід ПОЛІЩУК

«28» вересня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Павлу БЛАГОДІРУ

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «**Моделювання віброударного навантаження конструкцій**».

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи: д. т. н., проф. Роман СИВАК, затверджені наказом №313 від «24» вересня 2025 р.

2. Строк подання студентом магістерської кваліфікаційної роботи: 11.12.2025 р.

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: 1) кутник – 100x100x8; 2) висота каркаса – 1000 мм, 3) плита нижня (сталь) – 800x800x100; 4) плита верхня (алюмінієвий сплав 2024-T3) – 640x640x6; 5) матеріали – полістирол EPS, гума CR, сталь C235JR; 6) товщина шару полістиролу EPS - 13 мм, 7) товщина шару гуми CR - 10 мм; 8) товщина шару листової вибухової речовини - 1,5 мм; 8) товщина оболонки ємності - $4 \cdot 10^{-3}$ мм.

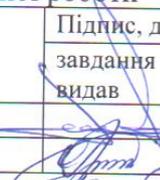
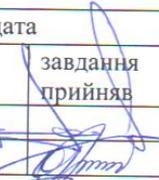
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) вступ; 2) аналіз задач експериментального опрацювання елементів техніки на вплив віброударних навантажень; 3) чисельне моделювання експлуатаційних режимів пристрою локального навантаження; 4) чисельне моделювання віброударної дії при відпрацюванні міцності конструкцій з використанням пристрою локального навантаження; 5) чисельне моделювання навантажувального пристрою стаціонарного віброударного стенду; 6) чисельне моделювання впливу віброударної дії на конструкцію; 7) економічна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1) Аналіз задач експериментального відпрацювання елементів конструкцій на вплив віброударних навантажень (2 пл. ф. А1); 2) Чисельне моделювання експлуатаційних режимів пристрою локального навантаження (2 пл. ф. А1); 3) Чисельне моделювання віброударної дії при відпрацюванні міцності конструкцій з використанням пристрою локального навантаження (2 пл. ф. А1); 4) Чисельне моделювання навантажувального пристрою стаціонарного віброударного стенду (2 пл. ф. А1); 5) Чисельне моделювання впливу віброударної дії на конструкцію (2 пл. ф. А1); 6) Висновки (1 пл. ф. А1).

6. Консультанти розділів магістерської кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основний	д. т. н., проф. Роман СИВАК		
Економічний	к. т. н., доц. Ольга РАТУШНЯК		

7. Дата видачі завдання 30.09.2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів МКР	Примітка
1	Вступ	7.10.2025 р.	Виконано
2	Аналіз задач експериментального опрацювання елементів техніки на вплив віброударних навантажень	14.10.2025 р.	Виконано
3	Чисельне моделювання експлуатаційних режимів пристрою локального навантаження	21.10.2025 р.	Виконано
4	Чисельне моделювання віброударної дії при відпрацюванні міцності конструкцій з використанням пристрою локального навантаження	29.10.2025 р.	Виконано
5	Чисельне моделювання навантажувального пристрою стаціонарного віброударного стенду	12.11.2025 р.	Виконано
6	Чисельне моделювання впливу віброударної дії на конструкцію	26.11.2025 р.	Виконано
7	Економічна частина	10.12.2025 р.	Виконано
8	Підготовка ілюстративної частини МКР	11.12.2025 р.	Виконано
9	Попередній захист на кафедрі	12.12.2025 р.	Виконано

Студент Трошків Павло БЛАГОДІР
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи Роман СИВАК
(підпис) (ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

УДК: 534.1

Благодір П. С. Моделювання віброударного навантаження конструкцій. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування, освітня програма - галузеве машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2025. 130 с.

Укр. мовою. бібліогр.: 41 назв; рис.: 73; табл.: 6.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено аналіз задач експериментального опрацювання елементів техніки на вплив віброударних навантажень. Виконано чисельне моделювання експлуатаційних режимів пристрою локального навантаження. Чисельне моделювання віброударної дії при відпрацюванні міцності конструкцій з використанням пристрою локального навантаження включало моделювання ударного навантаження фрагмента конструкції, моделі матеріалів, методи розв'язку, побудову математичної моделі фрагмента конструкції та типової конструкції, результати чисельного розрахунку ударного навантаження, результати чисельного віброударного моделювання навантаження типової конструкції. Також здійснено експериментальне відпрацювання пристрою локального навантаження. Приведено чисельне моделювання навантажувального пристрою стаціонарного віброударного стенду, в яке входять вихідні дані для чисельного розрахунку навантаження від вибухового джерела та чисельне моделювання ударно-хвильового навантаження пакету матеріалів. Також виконано чисельне моделювання впливу віброударної дії на конструкцію.

Графічна частина складається з 11 плакатів за результатами дослідження.

Ключові слова: віброударне навантаження, математична модель, чисельний розрахунок, рівняння стану, валідація, верифікація.

ABSTRACT

Blagodir P. S. Modeling of vibration-shock loading of structures. Master's qualification work in specialty 133 - branch mechanical engineering, educational program - branch mechanical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2025. 130 p.

In Ukrainian. Bibliography: 41 titles; Fig.: 73; Table: 6.

The master's qualification work analyzed the problems of experimental processing of equipment elements on the influence of vibration-shock loads. Numerical modeling of the operating modes of the local loading device was performed. Numerical modeling of vibration-shock action when testing the strength of structures using a local loading device included modeling of the shock load of a structural fragment, material models, solution methods, construction of a mathematical model of a structural fragment and a typical structure, results of numerical calculation of shock load, results of numerical vibration-shock modeling of the load of a typical structure. Also, an experimental development of the local loading device was carried out. Numerical modeling of the loading device of a stationary vibration-shock stand is presented, which includes the initial data for the numerical calculation of the load from the explosive source and numerical modeling of the shock-wave load of the material package. Numerical modeling of the impact of vibration-shock action on the structure was also performed.

The graphic part consists of 11 posters based on the results of the study.

Keywords: vibration-shock loading, mathematical model, numerical calculation, equation of state, validation, verification.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НА ВПЛИВ ВІБРОУДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	12
1.1 Джерела віброударних навантажень	12
1.2 Задачі випробувань на віброудар	13
1.2.1 Автономні випробування.....	13
1.2.2 Функціональні випробування у складі дослідних збірок.....	14
1.2.3 Випробування великогабаритних виробів.....	15
1.3 Кількісний опис та прогнозування граничних значень амплітуди віброударного навантаження	15
1.3.1 Ударний спектр віброударного навантаження.....	15
1.3.2 Вимоги до проведення випробувань на віброударне навантаження	18
1.3.3 Метод нормальних толерантних границь.....	22
1.3.4 Метод статистичного бутстрепа.....	23
1.3.5 Метод чисельного моделювання.....	24
1.4 Експериментальні засоби відпрацювання на віброударні навантаження	26
1.4.1 Вимоги до випробувального обладнання.....	26
1.4.2 Стенди вибухової дії.....	27
1.4.3 Пристрої локального навантаження.....	29
2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ПРИСТРОЮ ЛОКАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	30
2.1 Модель горіння пороху	30
2.1.1 Утворення порохових газів.....	30
2.1.2 Розрахункові співвідношення визначення вихідних даних моделі горіння.....	31
2.1.3 Визначення вихідних даних моделі горіння для пороху.....	32

2.2 Чисельне моделювання процесу горіння	33
2.3 Визначення вихідних даних моделі горіння для патронів	36
2.4 Розрахунок швидкості ударника для створення локального навантаження.....	38
3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОУДАРНОЇ ДІЇ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИСТРОЮ ЛОКАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	40
3.1 Чисельне моделювання ударного навантаження фрагмента конструкції	40
3.1.1 Моделі матеріалів.....	40
3.1.2 Метод розв'язку.....	42
3.1.3 Побудова математичної моделі фрагмента конструкції.....	42
3.1.4 Результати чисельного розрахунку ударного навантаження.....	43
3.2 Чисельне моделювання віброударного навантаження конструкції ...	45
3.2.1 Метод розв'язку	45
3.2.2 Побудова математичної моделі типової конструкції	46
3.2.3 Результати чисельного віброударного моделювання навантаження типової конструкції	47
3.3 Експериментальне відпрацювання пристрою локального навантаження.....	47
4 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ СТАЦІОНАРНОГО ВІБРОУДАРНОГО СТЕНДУ ...	50
4.1 Вихідні дані для чисельного розрахунку навантаження від вибухового джерела	50
4.1.1 Рівняння стану вибухової речовини.....	50
4.1.2 Рівняння стану гуми.....	51
4.1.3 Рівняння стану пористих матеріалів.....	53
4.1.4 Рівняння стану сталі.....	54
4.2 Чисельне моделювання ударно-хвильового навантаження пакету	

матеріалів	55
4.2.1 Метод розв'язку	56
4.2.2 Верифікація методики чисельного моделювання	57
4.2.3 Валідація результатів чисельного моделювання	61
5 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВІБРОУДАРНОЇ ДІЇ НА КОНСТРУКЦІЮ	68
5.1 Динамічна схема стенду.....	68
5.2 Модальний аналіз віброударного стенду.....	68
5.3 Чисельне моделювання віброударного навантаження.....	73
5.4 Результати чисельного моделювання.....	75
6. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	84
6.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	84
6.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	90
6.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки.....	98
6.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	99
ВИСНОВКИ.....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104
ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	111
ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	117
ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ НА ПЛАГІАТ.....	130

ВСТУП

Актуальність теми. Важливою складовою комплексного процесу проектування та виготовлення виробів машинобудування є їх експериментальне відпрацювання на віброударні навантаження, які можуть виникати як від зовнішніх збудників, так і від миттєвого руйнування елементу конструкції. Одним із способів створення широкосмугових віброударних навантажень на деталі та елементи конструкції і зв'язаних з ними перехідних процесів є використання енергії від спрацьовування піротехнічних пристроїв. Спрацювання піротехнічних пристроїв супроводжується руйнуванням механічних зв'язків у конструкціях та розповсюдження по конструкції швидкозатухаючої хвилі деформації. Аналогічний процес може виникнути і при механічному руйнування елементів конструкцій, наприклад, бандажних стрічок. Розкриття останніх еквівалентне раптовому скиданню навантаження, яке створює заздалегідь напружений стан на об'єкті.

Питання відпрацювання виробів машинобудування на широкосмугові віброударні навантаження, викликані спрацюванням штатних піротехнічних засобів, отримали активний розвиток. Це було зумовлено якісною зміною елементної бази, розширенням номенклатури електронних компонент у виробках техніки, що вимагають відпрацювання на міцність та стабільність функціонування за умов впливу віброударних навантажень.

Слід зазначити, що зазначені навантаження мають локальний характер і не призводять до зміни швидкості центру мас, і, як правило, безпечні для конструкції загалом. Однак динамічні навантаження можуть призвести до передчасного спрацьовування, замикання, виходу з ладу, фізичного пошкодження електронних компонент та систем, що перебувають в безпосередній близькості від засобів спрацювання і, як наслідок, призвести до аварійної ситуації.

У питання забезпечення захисту та проведення випробувань апаратури на віброударні навантаження здійснено значний внесок і в зазначеному напрямку

ведеться активна робота, але незважаючи на інтерес до цієї проблеми, досі не існує єдиного підходу до відпрацювання віброударної міцності. Це пов'язано з необхідністю розробки та впровадження спеціалізованих стендів, що відтворюють режими навантаження в необхідних амплітудно-частотних діапазонах від 0,1 до 10 кгц, від 100 до 5000 g; такі стенди серійно не випускаються. Застосовувані у практиці вибухові пристрої та стенди є унікальними і для свого використання потребують спеціального відпрацювання випробувальних режимів, що є складним і трудомістким завданням, яке до теперішнього часу вирішувалася емпірично ціною великого об'єму налагоджувальних випробувань. Одним із шляхів вирішення цього завдання є впровадження у практику відпрацювання виробів машинобудування за допомогою математичного моделювання, проте це стримується відсутністю науково-методичної бази. Тому розробка методик чисельного моделювання віброударного навантаження конструкцій на стендах вибухової дії під час імітації навантажень від спрацьовування піротехнічних засобів є актуальною задачею при створенні сучасної техніки.

Мета і завдання роботи. Удосконалення міцнісного відпрацювання елементів конструкцій і обладнання шляхом впровадження чисельного моделювання у практику імітації віброударного навантаження від спрацьовування піротехнічних засобів з використанням стаціонарних віброударних стендів та пристроїв локального навантаження вибухової дії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробка методик чисельного моделювання віброударних навантажень на конструкції та обладнання при їх відтворенні за допомогою стаціонарних віброударних стендів та пристроїв локального навантаження вибухової дії;

- експериментальне обґрунтування використання методик чисельного моделювання для прогнозування випробувальних режимів, що реалізуються за допомогою стаціонарних віброударних стендів вибухової дії та пристроїв локального навантаження стосовно відпрацювання міцності та перевірки функціонування систем.

Об'єкт дослідження. Вплив віброударних навантажень від спрацьовування піротехнічних засобів на конструкції та елементи конструкцій.

Предмет дослідження. Чисельне моделювання навантажень, реалізованих випробувальними пристроями локального навантаження при відпрацюванні міцності конструкцій та бортового обладнання.

Новизна одержаних результатів

- розроблено та експериментально обґрунтовано методику розрахунку параметрів навантажень, створюваних пороховими зарядами в пристроях локального віброударного навантаження, на основі запропонованого способу ідентифікації параметрів, що використовуються в рівнянні стану пороху, відомим енергетичним та геометричним характеристикам;

- розроблено та експериментально обґрунтовано методику розрахунку параметрів ударних навантажень, що реалізуються віброударними стендами вибухової дії, при використанні зарядів вибухової речовини з демпфуючими елементами;

- розроблено та експериментально обґрунтовано методику чисельного моделювання та прогнозування випробувальних режимів, реалізованих пристроями локального навантаження та стаціонарними стендами вибухової дії, при відпрацюванні міцності конструкцій та обладнання на вплив віброударних навантажень від спрацьовування піротехнічних засобів.

1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НА ВПЛИВ ВІБРОУДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Джерела віброударних навантажень

Вироби машинобудівного виробництва зазнають впливу ударних навантажень на різних етапах свого життєвого циклу.

Для забезпечення надійності виробів передбачено їх повне експериментальне відпрацювання. Експериментальне відпрацювання передбачає як автономні випробування окремих елементів конструкції та обладнання, так і комплексні випробування систем та великомасштабних дослідних складань [1]. При проведенні випробувань виробів, що відтворюються на стендах, режими навантаження, відповідно до вимог, повинні імітувати розрахункові навантаження, відповідні експлуатаційним, помноженим на прийнятий коефіцієнт безпеки.

Імпульсне навантаження призводить до руйнування механічних зв'язків і, як наслідок, до динамічного локального впливу на конструкцію [2]. Результатом такого динамічного впливу на початковій (хвильовій) фазі є швидкопротікаючий затухаючий перехідний процес деформування, що характеризується високими частотами та амплітудами хвиль напруження, який поширюється по конструкції. Після хвильової фази у конструкції збуджуються власні частоти елементів та систем. У ряді випадків, цей вплив може супроводжуватися складовими від хвиль розвантаження, що виникають при знятті навантаження попередньо напружених вузлів зв'язку елементів конструкції [3]. Вплив імпульсних навантажень, як правило, рідко супроводжуються значними пошкодженнями чи руйнуваннями несучої конструкції, проте можуть бути причиною відмов та/або руйнування електронних, оптичних, механічних елементів приладів та обладнання [4].

При спрацьовуванні пірозасобів виникає ударне навантаження, найбільш інтенсивна в зоні прилеглих елементів конструкції, що викликає високочастотні коливання, які можуть призвести до помилкового спрацьовування релейних контактів, надати істотний вплив на роботу апаратури та порушити їх функціонування або навіть призвести до руйнування елементів конструкції. Внаслідок віброперевантажень, можливе проходження хибних команд управління, що призводять до припинення нормального функціонування апарату. Наприклад, в [5] повідомляється, що більшість аварій відбувається внаслідок виходу з ладу систем через дію імпульсного навантаження і незначна кількість аварій через вібраційні навантаження.

1.2 Задачі випробувань на віброудар

До основних задач експериментального відпрацювання належать такі види випробувань:

- автономні випробування випробувань приладів та обладнання при дії нормативних ударних режимів навантаження;
- функціональні випробування штатних систем у складі дослідних збірок;
- залікові ударні випробування великогабаритних динамічних макетів натурального виробу.

1.2.1 Автономні випробування

До автономних випробувань відносяться випробування приладів або їх габаритно-масових макетів зі штатними вузлами кріпленнями та масою апаратури трохи більше 20–50 кг. Цей вид випробувань має на меті в першу чергу підтвердження вимог щодо стійкості та функціонування обладнання. Крім цього, отримані під час випробувань дані дозволяють уточнити вимоги до елементної бази обладнання, визначити (при необхідності) параметри

демпферів та прокладок для зниження ударного впливу, а також оптимізувати місця кріплення та орієнтацію радіоелектронних компонентів у просторі.

Основною проблемою під час проведення автономних випробувань є відсутність в даний час загальноприйнятих методів та засобів імітації нормованих віброударних навантажень для забезпечення кваліфікаційних випробувань обладнання на міцність та стійкість. Під час проведення випробувань на ударні навантаження допускається проводити залікові кваліфікаційні випробування з допомогою штатних піросистем, тобто з коефіцієнтом безпеки, що дорівнює одиниці. Це суперечить та викликає певні труднощі при прийнятті рішень про достатність експериментального відпрацювання виробів машинобудування.

1.2.2 Функціональні випробування у складі дослідних збірок

До функціональних випробувань відносяться випробування систем на підтвердження стійкості їх функціонування в умовах віброударної дії. Основна увага при цьому приділяється перевірці працездатності обладнання, а також аналізу стану електронних компонентів обладнання та елементів друкованих плат. В даний час інтенсивно розвивається радіоелектронна елементна база, що дозволяє конструювати більш складні високоінтелектуальні комплексні системи, такі як системи прийому та передачі даних, високоточну наукову апаратуру, блоки автоматизованих систем керування тощо. Найчастіше електронні компоненти систем, у зв'язку з відсутністю необхідного випробувального обладнання та методичного забезпечення, не проходять сертифікацію на ударну стійкість, що знижує надійність систем загалом. Оскільки пошкодження навіть одного елемента може призвести до відмови обладнання та подальшої аварії виробу, функціональним випробуванням приділяється велика увага.

1.2.3 Випробування великогабаритних виробів

Випробування великогабаритних макетів, як правило, проводяться з використанням штатних систем. Даний тип випробувань націлений на здебільшого на відпрацювання функціонування систем та визначення рівнів навантаження в місцях кріплення апаратури. В даний час випробувальні центри по можливості застосовують типові (штатні) системи при відпрацюванні виробів машинобудування, проте це призводить до суттєвого подорожчання випробувань, по-перше, через високу вартість, по-друге, через неможливість подальшого використання матеріальної частини, по-третє, через вимоги до техніки безпеки під час роботи з вибуховими матеріалами. Крім цього, при використанні штатних систем ударні дії відповідають експлуатаційним навантаженням, тоді як для забезпечення надійності відпрацювання передбачені кваліфікаційні випробування виробу на розрахункові навантаження підвищеного рівня, що визначаються нормованим коефіцієнтом безпеки. У випадку певного виробу для технологічних випробувань використання штатних засобів поділу неприпустимо, так після спрацювання останніх потрібне розбирання випробуваного виробу та заміна ряду елементів. У зв'язку з цим, при проведенні технологічного випробування певних виробів можна рекомендувати використовувати піротехнічні штовхачі з демпфуючими прокладками (алюміній, сталь, гума), здатні формувати рівень перевантажень з урахуванням коефіцієнта безпеки, не ушкоджуючи матеріальну частину [6].

1.3 Кількісний опис та прогнозування граничних значень амплітуди віброударного навантаження

1.3.1 Ударний спектр віброударного навантаження

Піротехнічні пристрої практично миттєво створюють конструкції навколо установки високий тиск. В результаті по конструкції поширюються хвилі

напружень, в яких присутні високоінтенсивна компонента, що швидко загасає через демпфування матеріалу конструкції, наявності стиків та зварних з'єднань. Далі, енергія високочастотних компонент сигналу в процесі поширення переходить у низькочастотні моди коливань конструкції. Типовий сигнал віброударного прискорення має практично нульове середнє значення за часом.

Навантаження від піротехнічних пристроїв короточасні та мало впливають на рух центру мас конструкції. Тривалість сумарного сигналу залежить від величини коефіцієнтів демпфування конструкційних та теплозахисних матеріалів, параметрів конструкції та зазвичай становить від 50 мкс до 20 мс [6].

Віброударний процес у досліджуваній точці конструкції характеризується максимальною амплітудою прискорення (m/s^2) або перевантаженням (g), смугою частот та тривалістю дії. Для кількісного опису віброударного процесу використовують ударний спектр як узагальнену характеристику зовнішнього впливу. Ударний спектр - огибаюча максимальних відносних прискорень \ddot{Y} системи непов'язаних осциляторів при заданому переносному прискоренні платформи \ddot{X} [7, 8].

Відповідно до визначення ударний спектр отримують за допомогою чисельного розв'язання рівнянь виду [9]:

$$\ddot{y} + (2\pi f / Q)\dot{y} + (2\pi f)^2 y = -\ddot{x}, \quad (1.1)$$

де \ddot{x} – віброприскорення на основі, f – власна частота осцилятора, яка для ударного спектру є незалежною змінною, Q – коефіцієнт посилення на резонансній частоті (добротність), прийнято вважати $Q = 10$.

За визначенням ударного спектра приймається, що впливом осцилятора на рух основи можна знехтувати, відсутня взаємодія між формами коливань конструкції об'єкта випробувань, декремент коливань (міра зменшення амплітуди затухаючих коливань за один період) не залежить від частоти. Розрахунок ударного спектра проводять при постійному кроці за частотою,

наприклад, при кроці не більше 1/6 октави (частотний інтервал, де частота вищого звуку вдвічі більша за частоту нижчого).

Характерний вид ударних спектрів для дальньої зони впливу показано на рис. 1.1, 1.2.

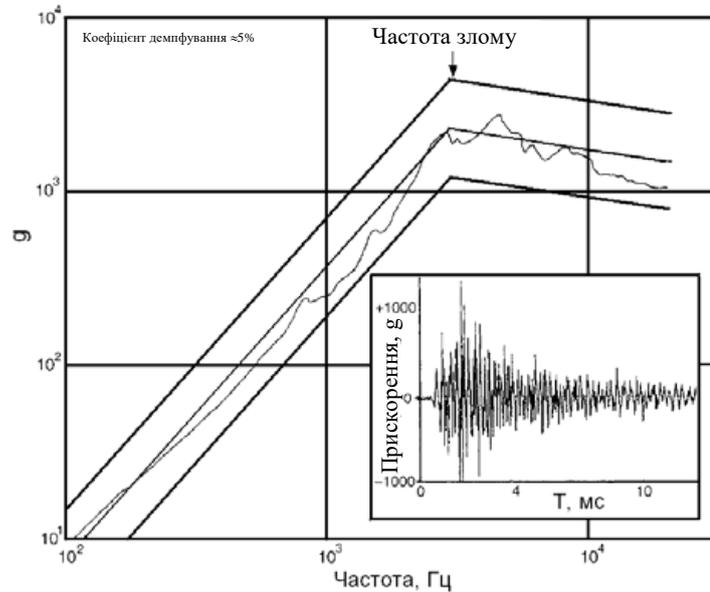


Рисунок 1.1 – Ударний спектр та залежність прискорення від часу для дальньої зони впливу

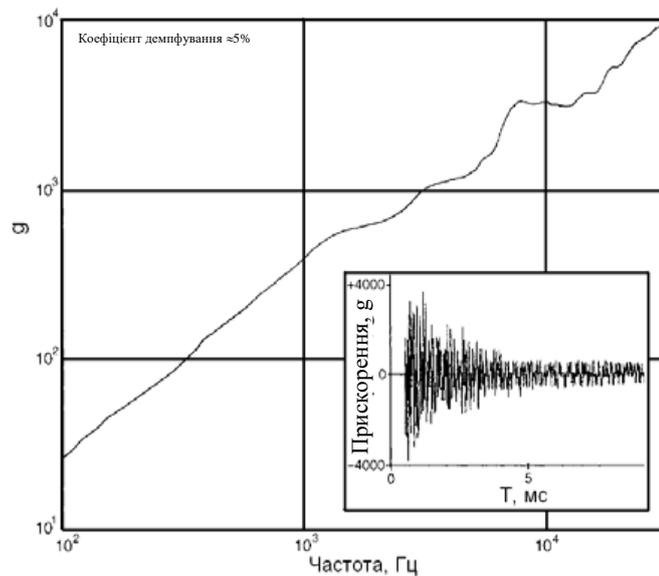


Рисунок 1.2 – Ударний спектр та залежність прискорення від часу для ближньої зони впливу

Ударний спектр спочатку зростає з частотою (кут нахилу становить від 9 до 12 дБ на октаву), далі слідує горизонтальна або злегка похила ділянка. Частоту, коли відбувається зміна нахилу кривої, прийнято називати частотою зламу і вона, як правило, відповідає домінуючій частоті. Частота зламу зазвичай знаходиться в діапазоні від 1 до 2 кГц, але в у деяких випадках може виходити за вказані межі. При цьому амплітуда прискорень може досягати 20000g і більше. Піроудар у ближній зоні має схожу характеристику, але з вищою частотою зламу (рис. 1.2) [6].

Слід зазначити, що початкова ділянка ударного спектру за відсутності характерних складових сигналу в низькочастотній області багато в чому залежить від демпфування конструкції. При збільшенні добротності осцилятора відбувається більш інтенсивне зростання ударного спектру на початковій ділянці, діапазон частот якого при цьому суттєво зменшується.

1.3.2 Вимоги до проведення випробувань на віброударне навантаження

Експериментальне відпрацювання передбачає використання ряду методів, застосування яких дозволяє з необхідною точністю відтворити фізичні процеси з необхідним рівнем перевантажень та частотним наповненням на реальному об'єкті випробувань чи імітаційній моделі. Рівні перевантажень та умови проведення автономних випробувань регламентуються стандартами. Такі параметри віброударного процесу як перенавантаження і частота характеризують ближню, середню та дальню зони.

Крім зазначених вище параметрів, додатково вводять відстань від засобів. Розглянемо докладніше характеристики кожної із зон.

У ближній зоні поширюються високоінтенсивні хвилі стиснення розтягування від спрацьовування засобів. Рівні перевантажень від хвилі деформації можуть перевищувати 50000 g з частотами більше 100 кГц. У зв'язку з цим, у ближній зоні не рекомендується встановлювати електронне та

механічне обладнання. Для високоенергетичних джерел обурень ближня зона визначається відстанню 150 мм від площини поділу. Для менш енергетичних джерел, наприклад, точкових джерел, ближня зона поширюється до 30 мм.

Середня зона характеризується комбінацією хвильової фази деформування та відгуки конструкції у вигляді власних форм коливань. Генеровані рівні перевантажень можуть перебувати в діапазоні від 2000 до 50000g та мати значущі компоненти сигналу понад 10 кГц. Для високоенергетичних джерел збурень середня зона знаходиться в інтервалі від 150 до 600 мм від пірозасобу. Для інших засобів поділу - в інтервалі від 30 до 300 мм.

У дальній зоні віброударна дія формується в результаті загасаючих коливань конструкції на власних формах з максимальною амплітудою прискорення не більше 2000 g та спектральним наповненням не більше 10 кГц. Відповідно далека зона починається з 600 мм і 300 мм для високоенергетичних джерел та слабо енергетичних джерел, відповідно. Графік ударного спектру для дальньої зони має явний злам на певній частоті, що характеризує домінуючу частоту при відгуку конструкції на імпульсне навантаження (рис. 1.1). Необхідно мати на увазі, що зазначені відстані умовні і є лише якісною характеристикою процесу.

Оскільки ударні спектри, що задаються при випробуваннях, є узагальненням результатів випробувань, вони задаються з певним допуском, що визначається як гранично допустима розбіжність нормованого віброударного впливу:

$$P = 20 \log_{10} \left(\frac{A_1}{A_0} \right), \quad (1.2)$$

де A_1 – виміряне значення амплітуди, A_0 – вихідне значення амплітуди.

На рис. 1.3-1.6 представлені нормовані рівні з інтервалами допустимих значень

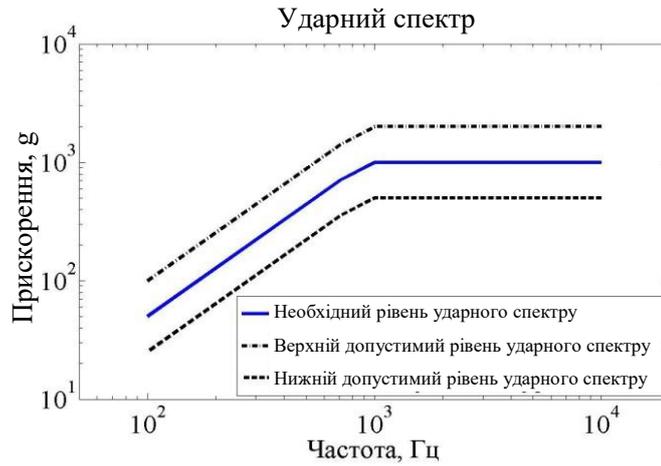


Рисунок 1.3 – Допустимий діапазон для ударного спектру згідно стандарту ECSS-E-10-03A

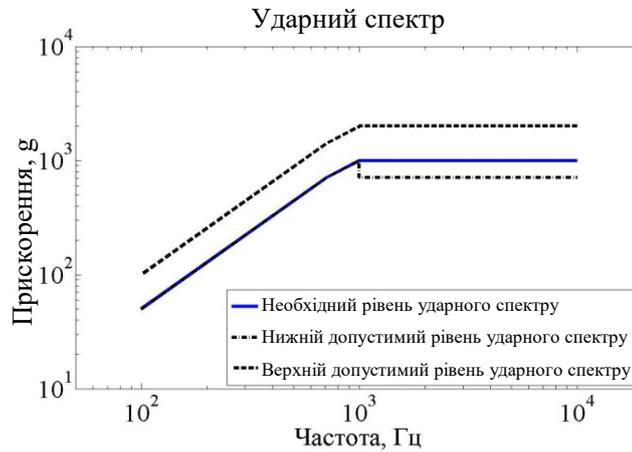


Рисунок 1.4 – Допустимий діапазон для ударного спектру згідно стандарту ESSB-HB-E-005 (ESA)

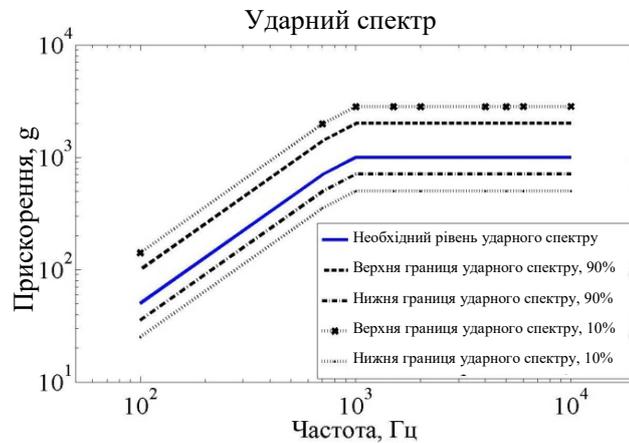


Рисунок 1.5 – Допустимий діапазон для ударного спектру згідно стандарту MIL-STD-810G (середня зона)

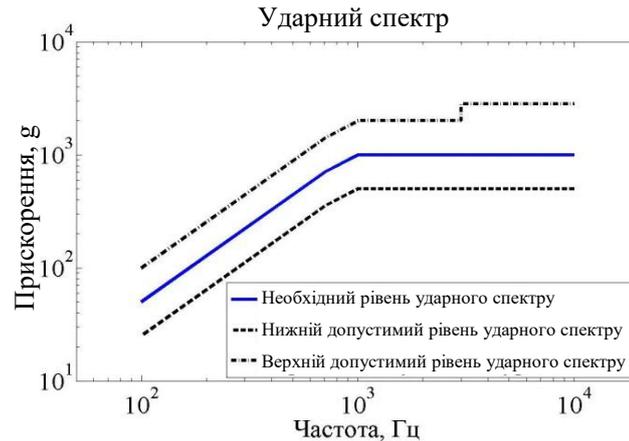


Рисунок 1.6 – Допустимий діапазон для ударного спектру згідно стандарту
NASA-STD-7003A

Важливим напрямком наземного експериментального відпрацювання є визначення максимального поля навантажень та формулювання нормованих рівнів ударного спектру для новостворюваних виробів. Для цих цілей використовують такі підходи:

- випробування дослідних збірок з реальними пірозасобами та реєстрацією віброударних прискорень;
- метод подібності на основі існуючих даних про вироби та експериментальних даних;
- аналітичні методи з використанням чисельного моделювання.

Найнадійнішим способом визначення реальних значень перевантажень є проведення натурних випробувань, коли в якості джерела впливів використовуються реальні піротехнічні пристрої. На підставі отриманої при випробуваннях інформації визначають навантаження у необхідних вузлах та кріпленнях по всьому виробу. Ці дані, перетворені на ударні спектри, що використовуються при автономних та функціональних випробуваннях приладів та обладнання на навантаження з урахуванням нормованих коефіцієнтів безпеки.

Метод подібності полягає у визначенні очікуваного максимального поля навантажень від спрацьовування засобів поділу для нового виробу на основі

аналізу накопичених раніше експериментальних даних для подібних виробів-аналогів. Процедура обчислення максимального поля навантажень включає кілька етапів [9]:

- вибір динамічно подібного виробу, наземне відпрацювання якого на ударне навантаження проведено у повному об'ємі;

- розбивка вибраного виробу на зони за конструктивним принципом (одиначний елемент конструкції, блок, модуль тощо), у яких ударні навантаження мають один порядок;

- обчислення для кожної із зон коефіцієнта ударного спектру, визначається як відношення ударного спектру відгуку конструкції на ударний спектр впливу;

- ударний спектр для кожної із зон виробу визначається як добуток коефіцієнта ударного спектра виробу-аналогу на ударний спектр навантаження для виробу, що знову створюється.

Отримані при обчисленні ударні спектри для кожної із зон новоствореного виробу зазнають статистичного аналізу для формування максимального поля навантажень. В якості статистичних методів використовують метод граничних значень, розподілених за нормальним законом, та метод статистичний бутстрепа (статистичний метод (бутстрепінг), який використовує багаторазове створення вибірок для оцінки статистик).

1.3.3 Метод нормальних толерантних границь

Метод нормальних толерантних границь (Normal tolerance limit method) [10] застосовується для визначення граничних значень перевантажень, що виникають при випробуваннях виробів на віброударне навантаження. Метод нормальних толерантних границь використовується у припущенні, що випадкова величина має нормальний розподіл. В якості випадкової величини може виступати набір значень (реалізацій) ударного спектру для однотипних

випробувань. У цьому припущенні нормальних толерантних границь обчислюється так [11]:

$$HTП_x(n, \beta, \gamma) = \bar{X} + K_{n, \beta, \gamma} \cdot s_x,$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i,$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2},$$

де \bar{X} - середньоарифметичне випадкової величини; x_i , s_x - середньоквадратичне відхилення випадкової величини x_i , $K_{n, \beta, \gamma}$ - табульований нормуючий коефіцієнт, β - ймовірність того, що всі значення лежать нижче за нормальну толерантну границю, n - кількість значень обчисленої величини x_i , γ - довірчий інтервал для випадкової величини x_i .

У разі логнормального розподілу випадкової величини нормальної толерантної границі обчислюється згідно

$$H_y(n, \beta, \gamma) = \log_{10} H_x(n, \beta, \gamma).$$

На практиці використовують два рівні нормальної толерантної границі [12]:

- максимально очікуваний рівень впливу, обчислюється при $\beta=0,95$, $\gamma=0,5$.

Отриманий рівень нормальної толерантної границі для набору значень ударного спектру є вихідним рівнем при проведенні наземного експериментального відпрацювання.

- екстремальний очікуваний рівень впливу, обчислюється при $\beta=0,99$, $\gamma=0,90$. Отриманий рівень нормальної толерантної границі для набору значень ударного спектру є вихідним рівнем під час проведення кваліфікаційних випробувань [13].

1.3.4 Метод статистичного бутстрепу

Метод статистичного бутстрепу [14] (statistical bootstrap) є альтернативним способом визначення максимально очікуваного рівня дії.

Перевага даного методу полягає у можливості оцінювати точність і невизначеність оцінюваних параметрів обмеженого набору даних спостерігається величини без будь-яких припущень про її функцію розподілу (дані не обов'язково мають нормальний розподіл, як у випадку методом нормальної толерантної границі). Процедура обчислення довірчих інтервалів величини, що спостерігається наступна:

а) формується масив даних для випадкової величини з деякою функцією розподілу (нормальної, Релея, Вейбулла) - $X=(x_1, x_2, \dots x_n)$;

б) формуються псевдовибірki X_6 , з використанням значень X , за допомогою випадкової вибірки із заміною елементів: розмірності знову створених псевдовибірок дорівнюють розмірності вихідної вибірки X . Наприклад, $X=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, тоді $X_6=(x_1, x_2, x_2, x_4, x_3)$;

в) обчислюються середнє значення X_6 та середньоквадратичне відхилення; S_{X_6}

г) б) і в) повторюються необхідне m число разів (1000-10000). З отриманих вибірок формується статистика для необхідної величини;

д) на основі вихідних даних X будується функція розподілу випадкової величини, визначаються значення для довірчої ймовірності 95% та 99%;

е) для кожної псевдовибірki X_6 обчислюють значення m :

$$P95 = \bar{X}_6 + K(P95)S_{X_6},$$

$$P99 = \bar{X}_6 + K(P99)S_{X_6};$$

ж) для обчислення довірчої межі, отримані в п. е) значення сортують та обирають відсоткове значення розподілу відповідне необхідному довірчому рівню.

1.3.5 Метод чисельного моделювання

Розвиток обчислювальної техніки та програмно-математичних пакетів типу дозволило впровадити чисельне моделювання для оцінки рівнів

віброударних навантажень при спрацьовуванні певних засобів [15]. Для отримання високої достовірності та точності таких розрахунків, у термінах інтервалу допустимих значень ударного спектру, потрібна математична модель та методики чисельного моделювання, що дозволяють прогнозувати режими віброударного навантаження. Розробка методик чисельного моделювання є складним науково-технічним завданням, що включає: визначення вихідних даних, побудову кінцево-елементних моделей об'єкта випробувань та процесу формування навантаження у випробувальному стенді, чисельне моделювання, аналіз збіжності та апроксимації рішення, проведення експериментальних робіт для підтвердження правильності одержуваних розрахункових значень. Процес розробки методик чисельного моделювання на прикладі дослідження питань віброударного навантаження з використанням стендів та навантажувальних пристроїв може бути представлений у вигляді блок-схеми.

Практика чисельного моделювання показує, що під час виконання зазначених вище вимог, отримані результати добре корелюють з експериментальними даними та достовірна оцінка амплітуди відгуку конструкції на ударний вплив при розрахунках може бути визначена в діапазоні частот від 0,1 до 10 кГц. На рис. 1.7 наведено приклад, що ілюструє високий ступінь достовірності ударного спектру модельованого процесу в порівнянні з експериментальними даними.

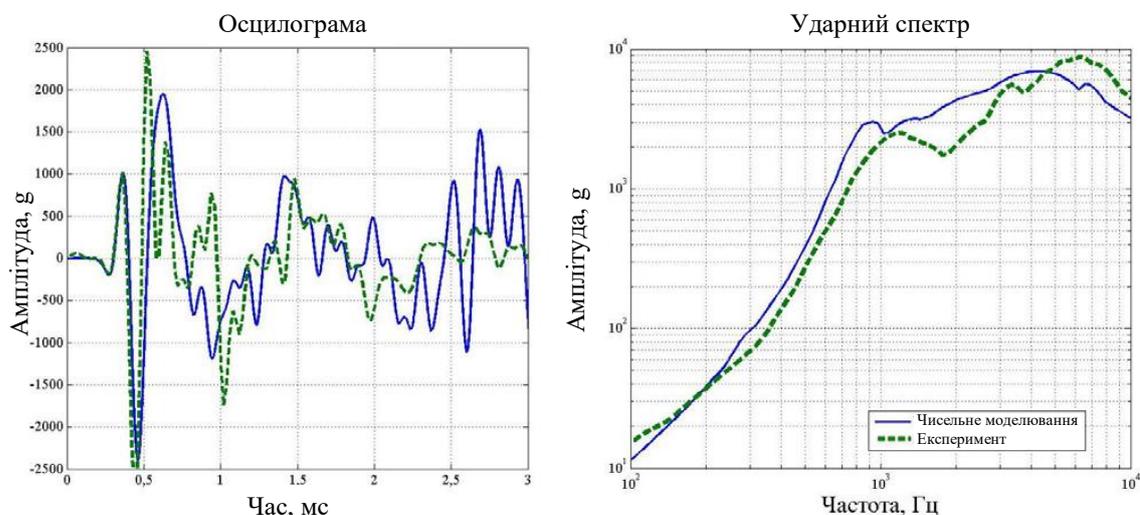


Рисунок 1.7 – Результати чисельного моделювання порівняно з експериментальними даними [16]

1.4 Експериментальні засоби відпрацювання на віброударні навантаження

1.4.1 Вимоги до випробувального обладнання

В даний час існує багато експериментальних засобів відпрацювання елементів техніки на віброударні навантаження. У випробувальних центрах активно розробляються та впроваджуються ударні (віброударні) стенди, за допомогою яких моделюються віброударні навантаження під час випробувань виробів.

Основні вимоги до випробувальних ударних установкам, наступні:

- широкий діапазон відтворюваного ударного прискорення по піковому значенню та частоті;
- малий вплив маси та механічної структури виробу, що випробовується на відтворюване ударне прискорення;
- відповідність реалізованих режимів навантаження, заданим у технічному завданні або передбаченим стандартами.

Аналіз відкритих джерел дозволяє провести умовну класифікацію стендів за принципом їхньої роботи [17]:

- кидкові стенди;
- електродинамічні вібростенди;
- маятникові (пневматичні, балістичні) стенди;
- стенди вибухової дії;
- підривні пристрої локального навантаження.

З представленого переліку віброударні навантаження в діапазоні від 100 Гц до 10 кГц та амплітудою до 10 000 g, відповідно до вимог нормативних документів, які можуть бути відтворені тільки з використанням стендів та пристроїв локального навантаження вибухової дії

1.4.2 Стенди вибухової дії

Стенд вибухової дії складається з однієї, двох або трьох металевих плит-резонаторів квадратної, рідше прямокутної форми, із встановленим на ній об'єктом випробувань, найчастіше через спеціальний адаптер. Плити з об'єктом випробувань вивішуються горизонтально чи вертикально на тросах, цим забезпечується умова вільних границь. Найважливішою характеристикою резонаторів є їхні власні частоти та форми коливань [18].

Стенди вибухової дії мають ширший функціонал, стосовно реалізованих переважань і частотним наповненням на графіках ударного спектру, порівняно зі стендами із механічним джерелом енергії [19].

При використанні вибухових стендів до звичайного набору параметрів, що варіюються, таких як:

- матеріал, розміри основної плити та наступних проставок;
- кількість та розташування демпфуючих елементів;
- конструкція, матеріал перехідного адаптера, додаються:
- маса, тип вибухової речовини;
- розташування заряду вибухової речовини;
- конструктивне виконання заряду (демпфери, проставки з різних матеріалів).

В якості джерела вибухового навантаження використовуються високоенергетичні вибухові речовини. Найбільш поширені вибухові речовини – детонаційний шнур та пластична (листова) вибухова речовина. Безпосереднє навантаження резонуючої конструкції вибухом викликає поширення по конструкції високоінтенсивних (понад 10000 g), високочастотних (понад 10 кГц) коливань. Для зміни високочастотної компоненти в резонуючому збиранні використовують заряди з гумовими, пінопластовими та сталевими демпферами.

Наступним параметром, що варіюється, є матеріал плити-резонатора у конструкції ударного стенду. Зазвичай основна (базова) плита, що сприймає вибухове навантаження виготовляється із сталі, наступні плити для подвійних

та потрібних стендових збірок – з алюмінію. Плити скріплюються між собою з використанням болтових з'єднань і алюмінієвих (сталевих) втулок. Висота втулок, їх кількість – наступний параметр, що впливає на інтенсивність ударного навантаження. На рис. 1.8 представлена типова схема віброударного стенду на основі подвійного резонувального складання.

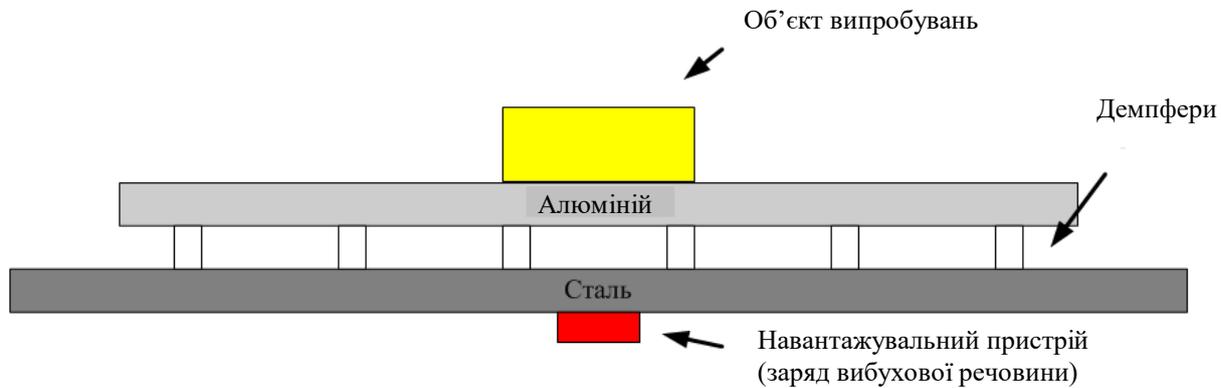


Рисунок 1.8 – Схема типового ударного стенду вибухової дії

У конструкціях стендів вибухового типу застосовується алюміній, який має менший акустичний імпеданс (міра опору середовища поширенню звукової хвилі, що є відношенням амплітуди звукового тиску до об'ємної швидкості коливань) у порівнянні зі сталлю. При падінні хвилі на межу розділу двох середовищ, частина енергії буде відображатися, а частина – проходити далі. У разі, якщо резонуючі плити виготовлені з одного матеріалу, у конструкції стенду виникають ударні хвилі високої інтенсивності від підриву заряду вибухової речовини, що відповідатиме характеру дії для ближньої зони. Тому для відтворення навантаження, характерною для середньої та дальньої зони слід фільтрувати високочастотні компоненти ударного спектру, конструюючи резонатор із плит з різним імпедансом і використовуючи відомі співвідношення для інтенсивності прохідної і відбитої хвиль:

$$\alpha = \left(\frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right)^2 \quad (1.3)$$

Для алюмінію $Z_0 = 14,58 \cdot 10^6$, а сталі $Z_1 = 40,56 \cdot 10^6$. Коефіцієнт відбиття (1.4.1) при падінні плоскої хвилі на межу розділу сталь-алюміній $\alpha = 0,22$, тобто 22% усієї

енергії відіб'ється, що дозволить знизити амплітуду ударного навантаження у високочастотній області на графіку ударного спектру.

1.4.3 Пристрої локального навантаження

Останнім часом набувають поширення пристрої локального навантаження - генератори ударних імпульсів [16, 20]. Генератори складаються зі стовбура і ударника, що розганяється, який ударяє із заданою швидкістю у випробувану збірку або резонуючу конструкцію (віброударний стенд). Розгін ударника здійснюється з використанням порохових або вибухових газів і при цьому швидкість, що досягається, не перевищує 60 м/с [16, 21]. Для зміни параметрів навантаження використовуються спеціальні демпфери-формувачі ударного імпульсу. Використання пристроїв локального навантаження при випробуваннях натурних складання дозволяє реалізувати розрахункові, а не експлуатаційні навантаження, як при спрацьовуванні штатних пірозасобів, тобто проводити кваліфікаційні випробування.

Генератори дозволяють реалізувати трикомпонентну дію шляхом одночасного навантаження резонуючої плити за трьома ортогональними напрямками.

Найбільш перспективним є застосування пристроїв локального навантаження при випробуваннях виробів, де неможливе застосування штатних засобів, крім того, це дозволяє провести кваліфікаційні та функціональні випробування.

2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ПРИСТРОЮ ЛОКАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Модель горіння пороху

2.1.1 Утворення порохових газів

Відповідно до сучасних уявлень [22] фронт горіння порохового елемента складається із чотирьох зон. Перша зона - зона прогріву, що примикає до конденсованого елемента. Друга зона – зона газифікації, де відбуваються перетворення пороху на газоподібні продукти після досягнення поверхні пороху деякої критичної температури T_{II} (ендотермічна реакція). Третя зона – зона прогріву продуктів газифікації внаслідок теплообміну та слабких екзотермічних реакцій, до температури реакції T_p . Четверта зона – зона екзотермічної хімічної реакції (рис. 2.1).

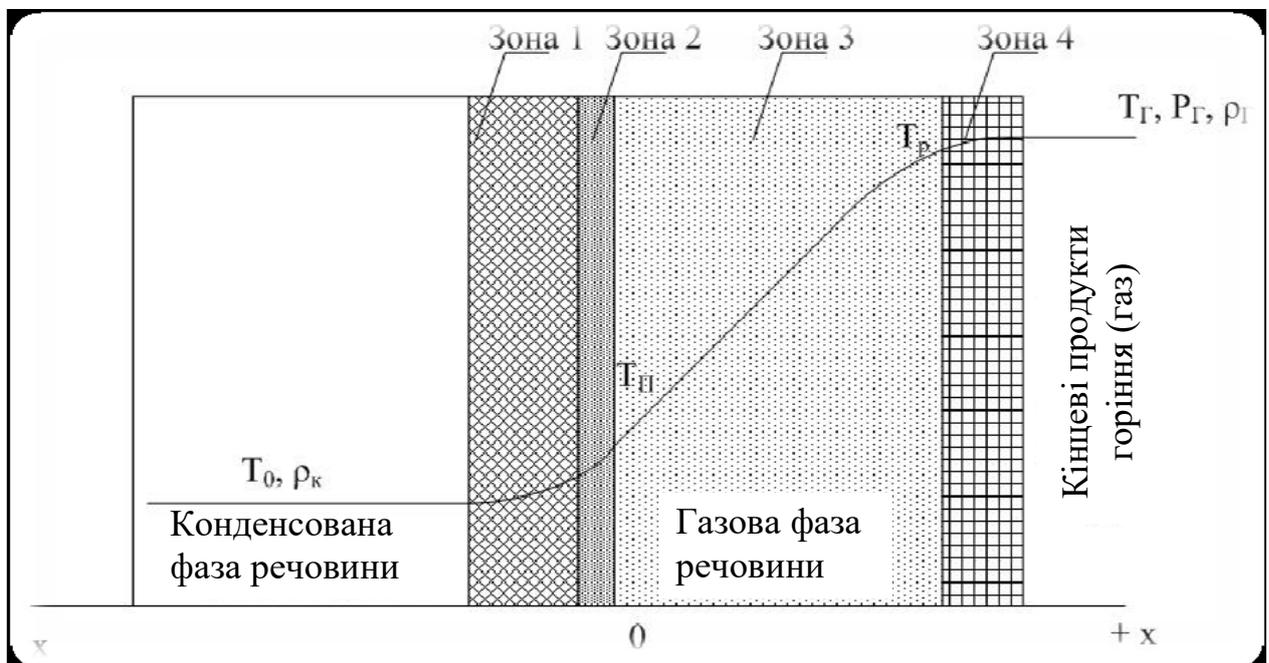


Рисунок 2.1 – Структура фронту горіння

Для моделювання процесу горіння у програмному пакеті вирішується система рівнянь виду [23]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dF}{dt} = G \cdot \sigma(t) \cdot U \\ U = H(P_g) \\ P_g = \rho_g E_g e^{\rho_g/D} \\ V = C_1 + C_2(H(P_g))(1 + \gamma(\rho_s)) \\ F_T(t) = F(t) \cdot I(t) \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Наявність у моделі горіння швидкості займання V дозволяє моделювати поступове горіння порохового заряду. Типова залежність перетворення з твердого на газоподібний стан представлена на рис. 2.2

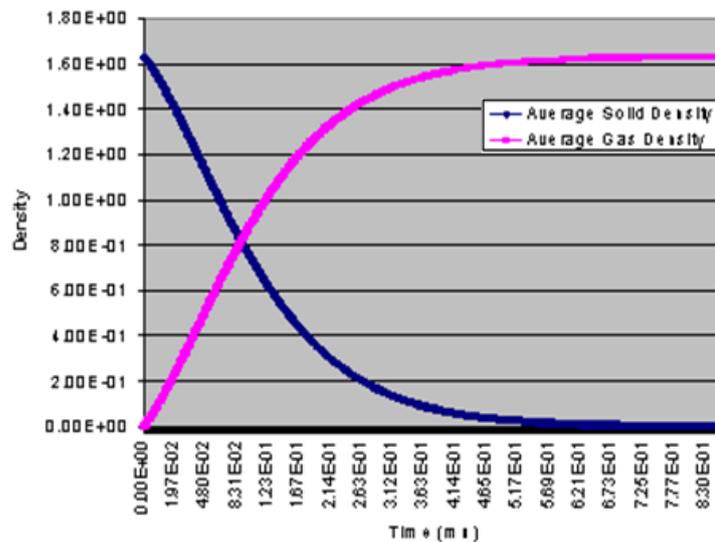


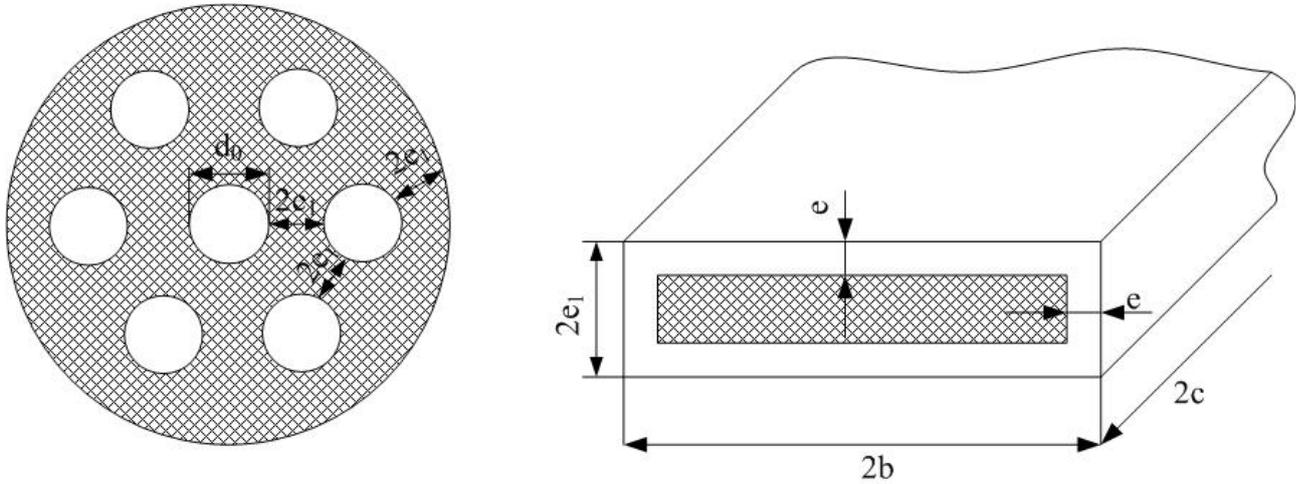
Рисунок 2.2 – Процес наростання тиску порохових газів P_g та зменшення щільності конденсованої речовини ρ_s , в одному розрахунковому осередку, при розв'язанні системи рівнянь (2.1) [24]

2.1.2 Розрахункові співвідношення визначення вихідних даних моделі горіння

Для опису форми та розмірів поверхні горіння в [25] запропоновано геометричний закон горіння, що пов'язує кількість порохових газів тих, що утворюються, із геометричними характеристиками порохових зерен. До геометричних характеристик порохових зерен відносяться (рис. 2.3):

- товщина палаючого зведення $2e_1$;

- ширина $2b$;
- довжина $2c$;
- діаметр каналів d_0 .



а) – семиканальне зерно; б) – стрічка, параметр e відповідає товщині згорілого шару в момент часу t

Рисунок 2.3 – Геометричні розміри порохових елементів

2.1.3 Визначення вихідних даних моделі горіння для пороху

На рис. 2.4 представлена експоненційна апроксимація залежності повного піростатичного тиску P_g від густини заряджання.

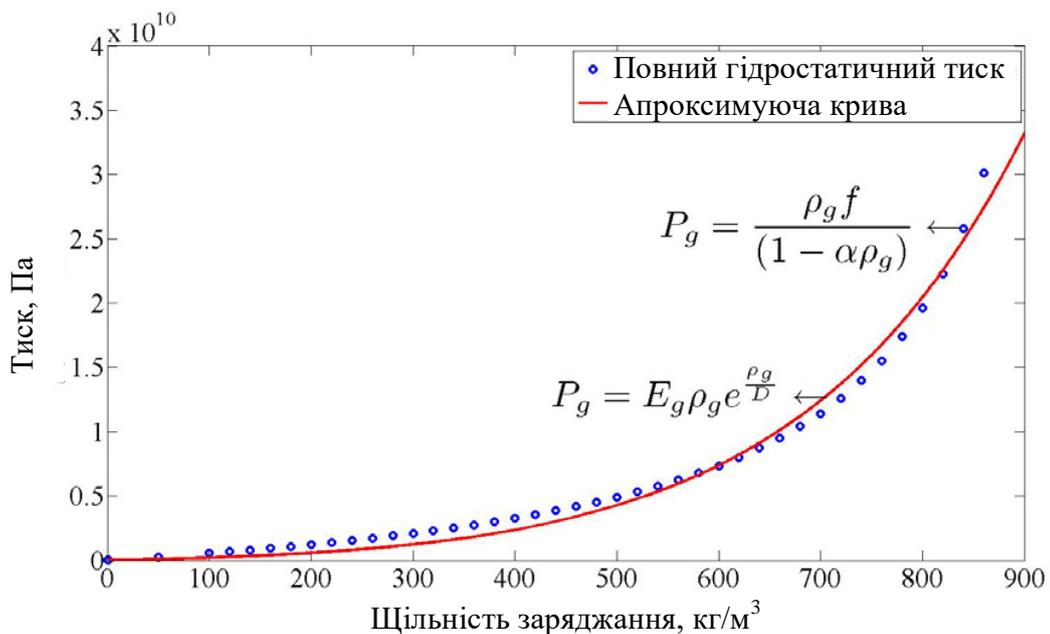


Рисунок 2.4 – Залежність тиску від щільності заряджання

Швидкість власного горіння елементарного порохового зерна обчислюється відповідно до

$$\frac{de}{dt} = U(t) = u_0 + u_1 P_g^{\nu} \quad (2.2)$$

При цьому враховується, що займання продуктів горіння проходить за $P_1=15\text{МПа}$. За допомогою визначених вище коефіцієнтів для тиску порохових газів та коефіцієнта швидкості горіння u_1 , будується залежність $U(P_g)$ (рис. 2.5).

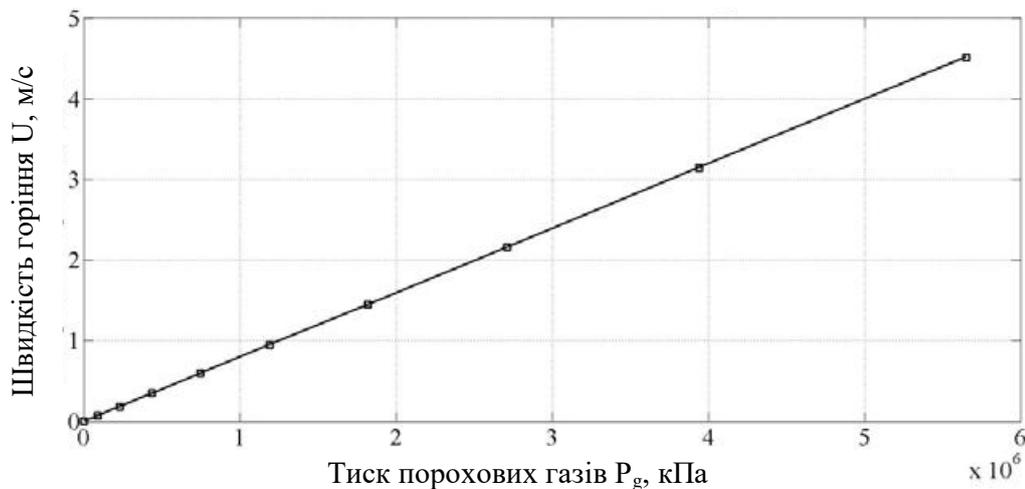


Рисунок 2.5 – Залежність швидкості власного горіння від тиску порохових газів

Отримані дані використовувалися надалі при чисельному моделюванні метання ударника у складі математичної моделі установки.

2.2. Чисельне моделювання процесу горіння

Моделювання динамічних процесів із характерним часом $\tau \approx 0,1-100\text{мс}$ при деформаціях середовища понад 50 % у сучасних розрахункових пакетах реалізовано з використанням низки чисельних методів: метод кінцевих різниць, кінцевих елементів, метод згладжених частинок (SPH) [26].

При розрахунку горіння та утворення порохових газів вихідний матеріал – порох відчуває фазове перетворення з твердого на газоподібний стан і поширюється в каналі ствола, зазнаючи в процесі руху великі деформації.

Моделювання таких процесів доцільно вести у змінних Ейлера. Рівняння збереження маси, імпульсу та енергії спільно з рівнянням стану, що зв'язує енергію, щільність і тиск, мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i \cdot u_j - \sigma_{ij})}{\partial x_j} = \rho \cdot F_i \\ \frac{\partial[\rho(e + u_i \cdot u_i / 2)]}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_j(e + u_i \cdot u_i / 2) - u_k \cdot \sigma_{kj} + q_j)}{\partial x_j} = \rho \cdot u_k \cdot F_k + Q \\ p = p(\rho, E) \end{array} \right. \quad (2.3)$$

де $\rho = \rho(x_1, x_2, x_3, t)$ - густина матеріалу; $u_i = u_i(x_1, x_2, x_3, t)$ - компоненти швидкості; F_i - компоненти вектора густини масових сил; e - внутрішня енергія на

одиницю маси; $\rho \cdot \frac{u_i \cdot u_i}{2} = \rho \cdot \frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}{2}$ - кінетична енергія в одиниці об'єму;

q_i - компоненти вектора потоку тепла; Q - об'ємна область джерел тепла; p -

тиск; $E = e + u^2/2$ - повна енергія.

Для моделювання процесу горіння порошу та руху ударника по стовбуру було розроблено математичну модель установки. Розрахунки проводилися в осесиметричній постановці у програмному комплексі. На рис. 2.6 представлено схему розрахункової області. Крок розрахункової сітки 1 мм. Для ілюстрації результатів розрахунків рис. 2.7 показано розподіл тиску в стволі установки в момент часу $t = 1,919$ мс

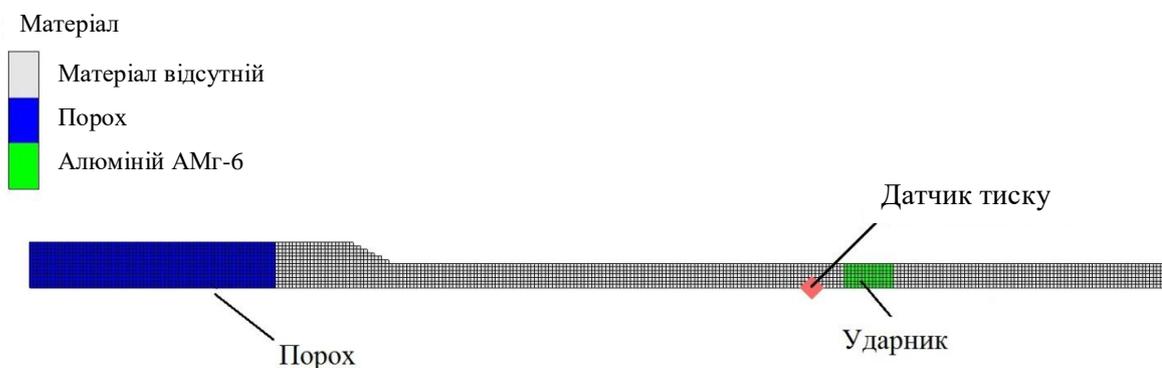


Рисунок 2.6 – Розрахункова область установки

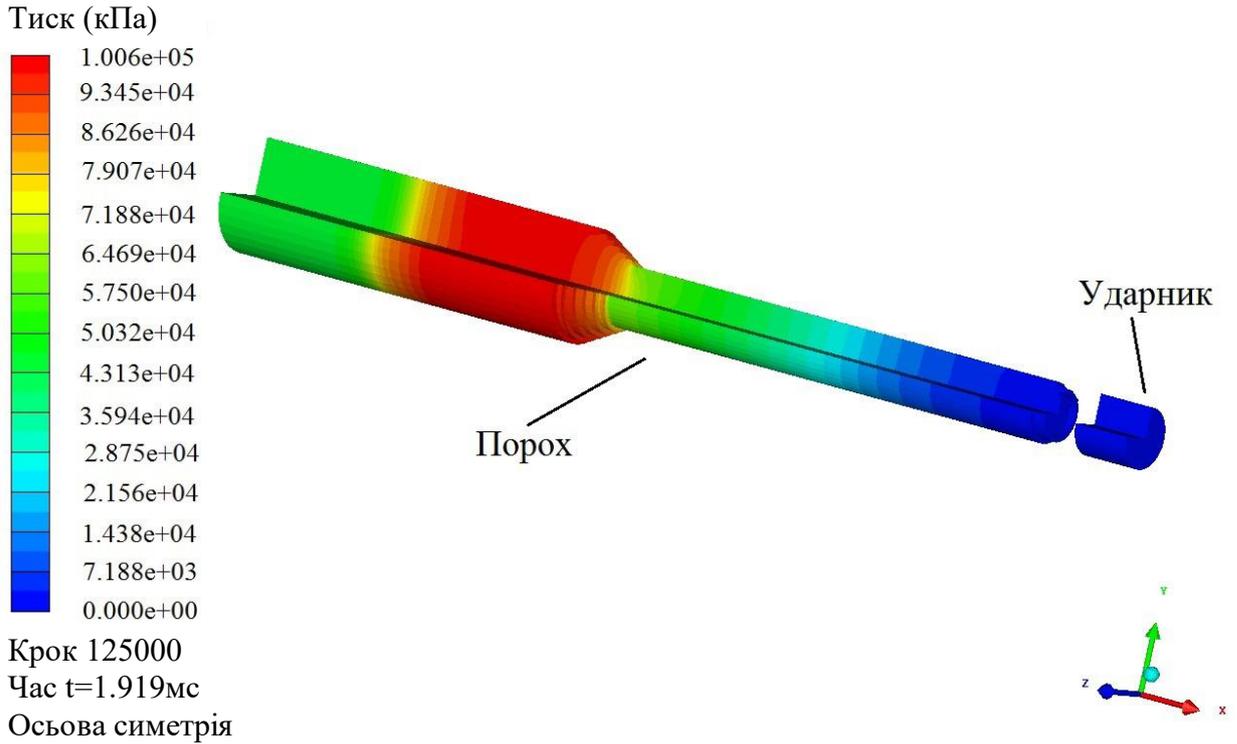


Рисунок 2.7 – Розподіл тиску у казенній частині та стволі установки $t=1,919\text{мс}$ з початку горіння пороху

Порівняння результатів експериментів та розрахунку представлені на рис.

2.8.

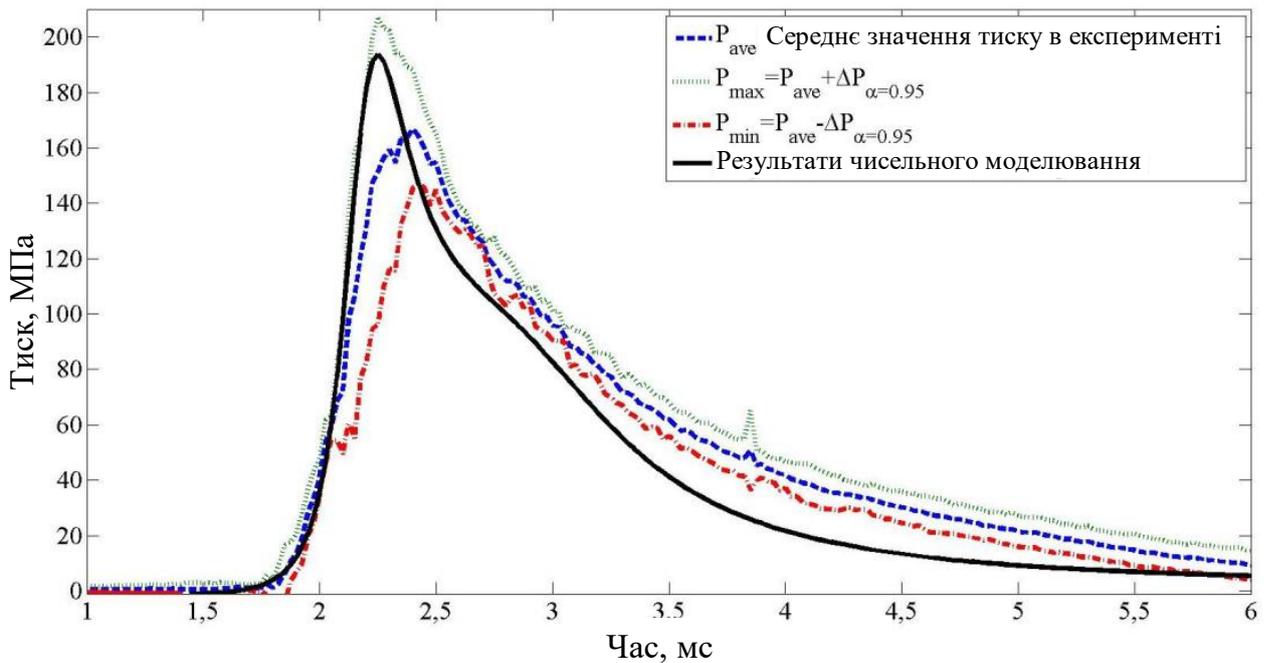


Рисунок 2.8 – Залежність тиску від часу (розрахунок та експеримент)

Профіль швидкості ударника на виході зі ствола представлений на рис. 2.9.

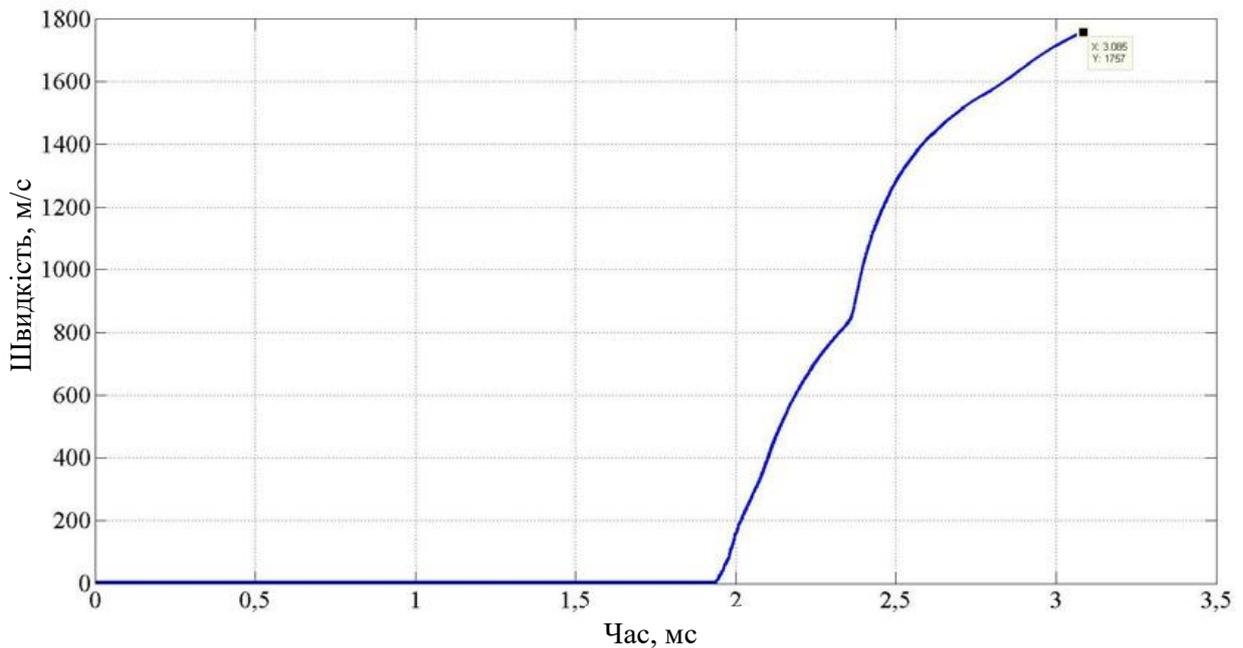


Рисунок 2.9 – Залежність швидкості ударника від часу

Проведені розрахунки показали гарну відповідність з експериментальними даними. Це є експериментальним підтвердженням запропонованої методики визначення вихідних даних, використовуваних у моделі горіння пороху, та розробленої методики розрахунку швидкості поршня у пристрої.

2.3 Визначення вихідних даних моделі горіння для патронів

На рис. 2.10 представлена експоненційна апроксимація залежності повного піростатичного тиску P_g від щільності заряджання.

За допомогою коефіцієнтів для тиску порохових газів та коефіцієнта швидкості горіння u_1 , будується залежність $U(P_g)$ (рис. 2.11).

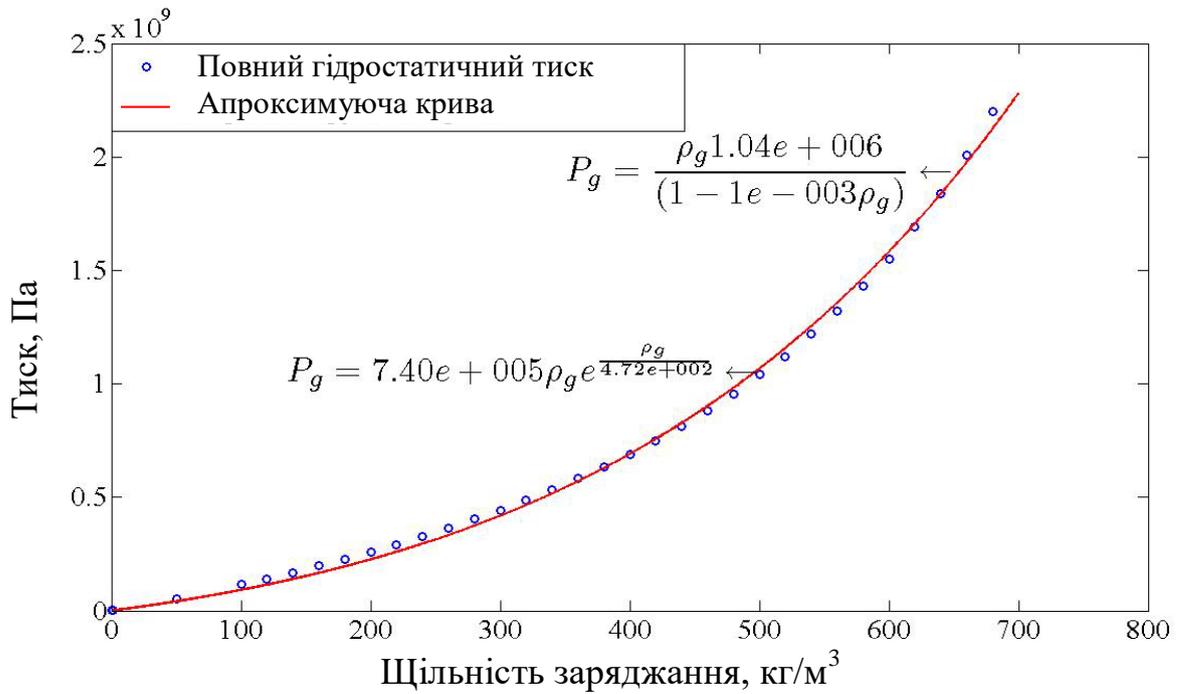


Рисунок 2.10 – Залежність тиску від щільності заряджання

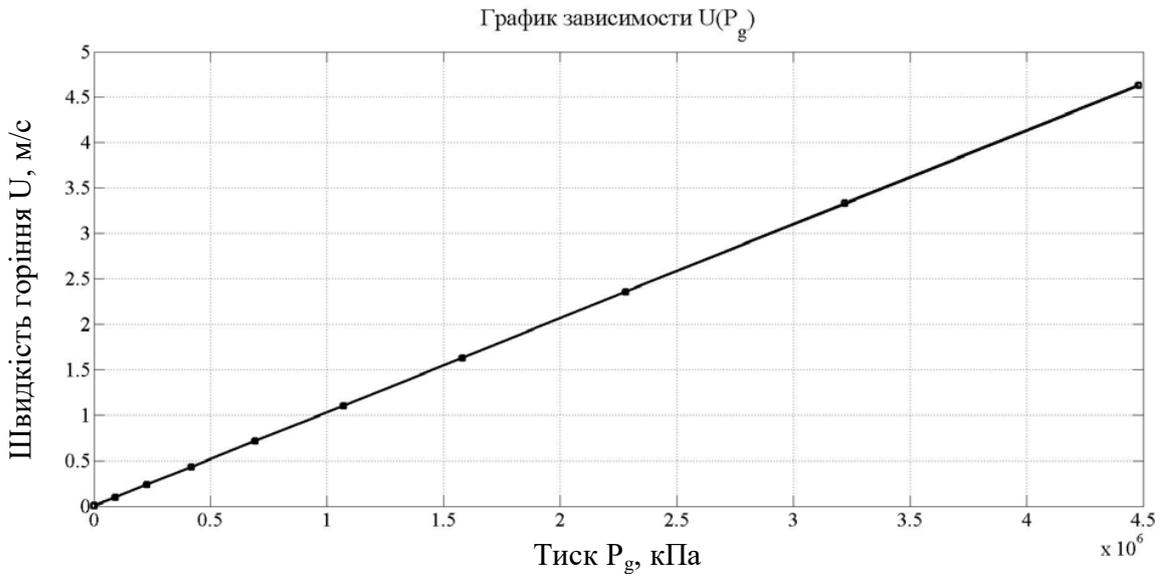


Рисунок 2.11 – Залежність швидкості власного горіння тиску порохових газів

Визначені за цією методикою вихідні дані для пороху були використані для моделювання руху ударника пристрою локального навантаження по стовбуру та оцінки швидкості ударника на виході зі ствола, у разі використання різних патронів Д1-Д4.

2.4 Розрахунок швидкості ударника для створення локального навантаження

Для моделювання процесу горіння порошу та руху ударника по стволу була розроблена математична модель пристрою локального навантаження. На рис. 2.12, 2.13 представлені модель пристрою локального навантаження та профіль тиску в момент часу $t=0,5155$ мс відповідно. Крок розрахункової сітки 1мм. Маса порошу та ударника відповідають параметрам реального пристрою.

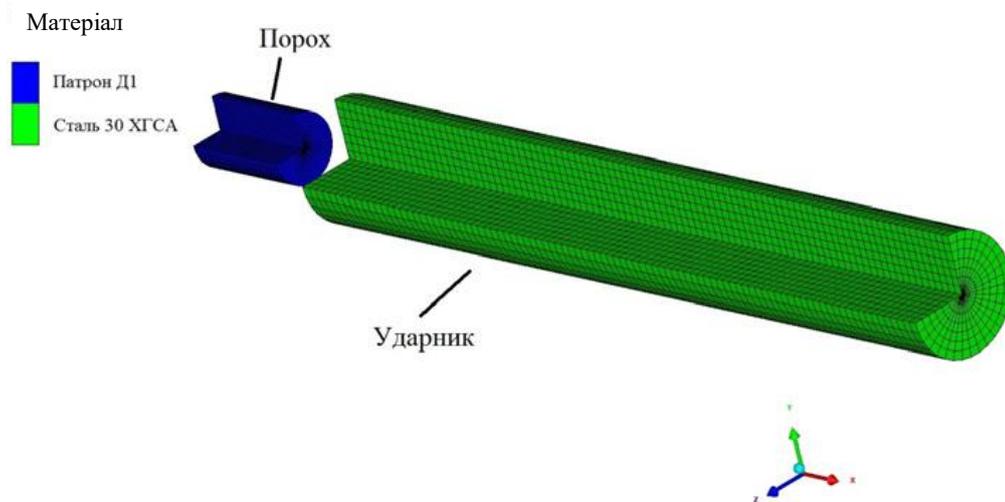


Рисунок 2.12 – Кінцево-елементна модель пристрою локального навантаження

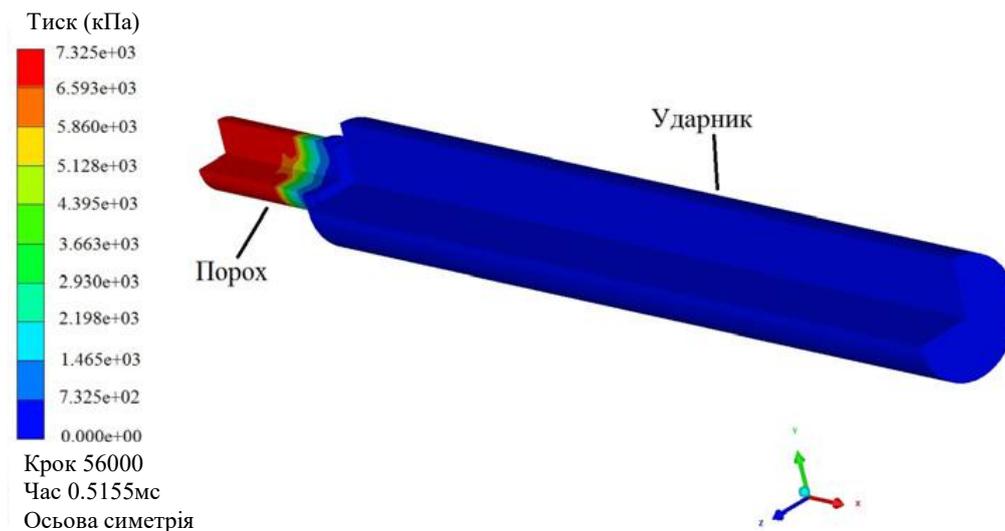


Рисунок 2.13 – Розподіл тиску у казенній частині та стволі пристрою локального навантаження, $t=0,5155$ мс з початку горіння порошу

На рис. 2.14 подано результати чисельного розрахунку швидкості ударника у стволі пристрою локального навантаження під час використання патронів Д1–Д4.

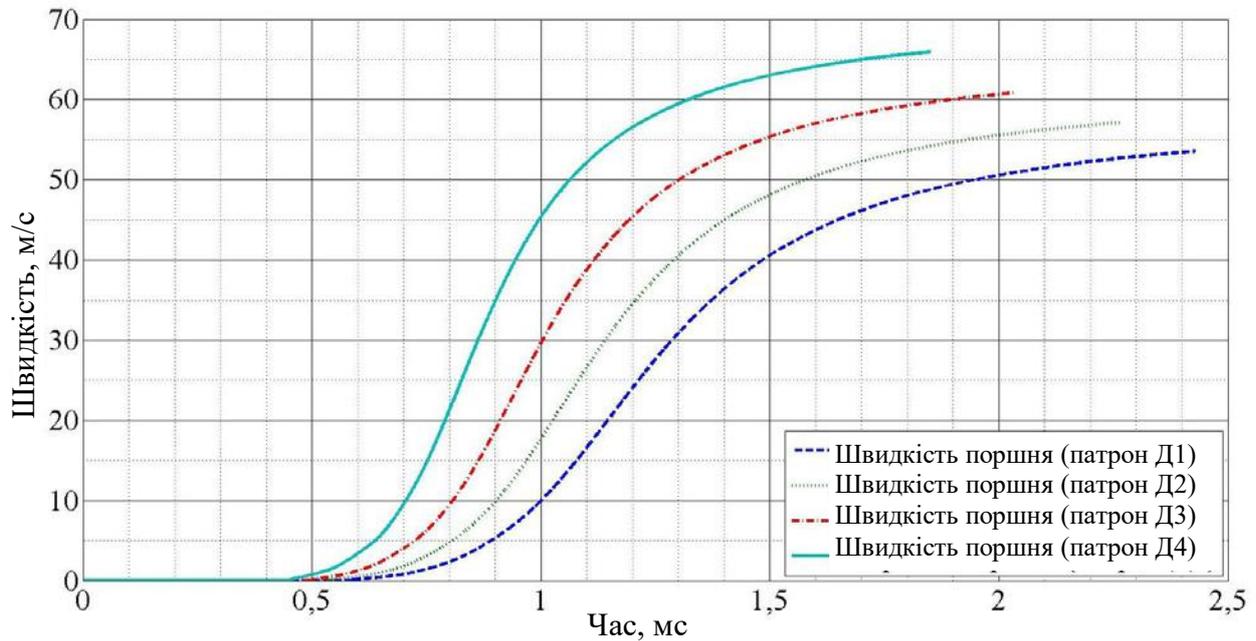


Рисунок 2.14 – Швидкість поршня у стволі для патронів Д1–Д4

Результати визначення швидкості ударників у конструкції пристрою локального навантаження далі використані при чисельному моделюванні ударно-хвильового навантаження типової конструкції, при імітації спрацювання штатних систем.

3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОУДАРНОЇ ДІЇ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИСТРОЮ ЛОКАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

3.1 Чисельне моделювання ударного навантаження фрагмента конструкції

3.1.1 Моделі матеріалів

Визначальні рівняння для металевих елементів ударника та алюмінієвих частин демпфера) комбінуються на основі співвідношень моделі Джонсона-Кука [28] для визначення напруги на поверхні плинності та рівняння стану Мі-Грюнайзена [29] для об'ємного стиску:

$$\begin{cases} \sigma_y = [A + B \cdot (\bar{\epsilon}^{pl})^n] \cdot \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot (1 - \hat{\theta}^m) \\ p = \frac{\rho_0 \cdot c_0^2 \cdot \eta}{(1 - s \cdot \eta)^2} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma_0 \cdot \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \cdot \rho \cdot E_m \end{cases} \quad (3.1)$$

де $A, B, C, \dot{\epsilon}_0, n, m$ – параметри матеріалу, визначені експериментальним шляхом; $\bar{\epsilon}^{pl}$ – еквівалентні пластичні деформації; p – тиск; ρ_0 – початкова щільність; c_0, s – параметри лінійного закону, що зв'язують швидкість поширення ударної хвилі та масову швидкість (ударна адіабата); $\eta = 1 - \rho_0/\rho$ – об'ємна деформація стискування; Γ_0 – коефіцієнт Грюнайзена; E_m – питома внутрішня енергія; $\hat{\theta}$ – безрозмірна температура, яка визначається як:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta < \theta_{transition} \\ (\theta - \theta_{transition}) / (\theta_{melt} - \theta_{transition}) & \text{при } \theta_{transition} \leq \theta \leq \theta_{melt} \\ 1 & \text{при } \theta > \theta_{melt} \end{cases}$$

де θ – поточне значення температури; θ_{melt} – температура плавлення матеріалу; $\theta_{transition}$ – температура переходу, нижче якої напруження плинності не залежить від температури.

Для опису поведінки гуми при динамічних деформаціях використовується гіперпружна модель, яка задається у формі повного напруження та повних переміщень [30]. Система рівнянь для гіперпружної моделі гуми записується у вигляді:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} = p \cdot \mathbf{I} - \mathbf{S} \\ p = -\frac{\partial U}{\partial J} \\ \mathbf{S} = \frac{2}{J} \text{DEV} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \bar{I}_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial U}{\partial \bar{I}_2} \right) \bar{\mathbf{B}} - \frac{\partial U}{\partial \bar{I}_2} \cdot \bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{B}} \right] \\ U = U(\bar{I}_1, \bar{I}_2, J) \end{cases}$$

де $\boldsymbol{\sigma}$ – компоненти напруження Коші, p – тиск; \mathbf{I} – одинична матриця, $J = \det(\mathbf{F})$ – об'ємна пружна деформація (\mathbf{F} – градієнт деформації), $\bar{\mathbf{B}} = J^{-\frac{2}{3}} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$, \bar{I}_1, \bar{I}_2 – перший та другий інваріанти тензора деформації.

Відомі різні форми потенціалу енергії деформацій; найбільш простий і не вимагає великої кількості вхідних параметрів матеріалу – потенціал енергії деформації у формі Арруда-Бойса [31]:

$$U = \mu \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (\bar{I}_1^i - 3^i) + \frac{1}{D} \cdot \left(\frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right)$$

де $C_1 = \frac{1}{2}, C_2 = \frac{1}{20}, C_3 = \frac{11}{1050}, C_4 = \frac{19}{7000}, C_5 = \frac{519}{673750}, J = \det(\mathbf{F})$; λ_m - коефіцієнт деформацій замикання, що показує, за яких деформаціях відбувається різке збільшення напруження у матеріалі. Початковий модуль зсуву μ_0 пов'язаний з поточним μ співвідношенням:

$$\mu_0 = \mu \cdot \left(1 + \frac{3}{5 \cdot \lambda_m^2} + \frac{99}{175 \cdot \lambda_m^4} + \frac{513}{875 \cdot \lambda_m^6} + \frac{42039}{67375 \cdot \lambda_m^8} \right)$$

Початковий модуль об'ємної деформації визначається як $K_0 = \frac{2}{D}$

3.1.2 Метод розв'язку

Алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану методом скінчених елементів реалізований у різних програмних пакетах і може бути представлений блок схемою, зображеною на рис. 3.1.

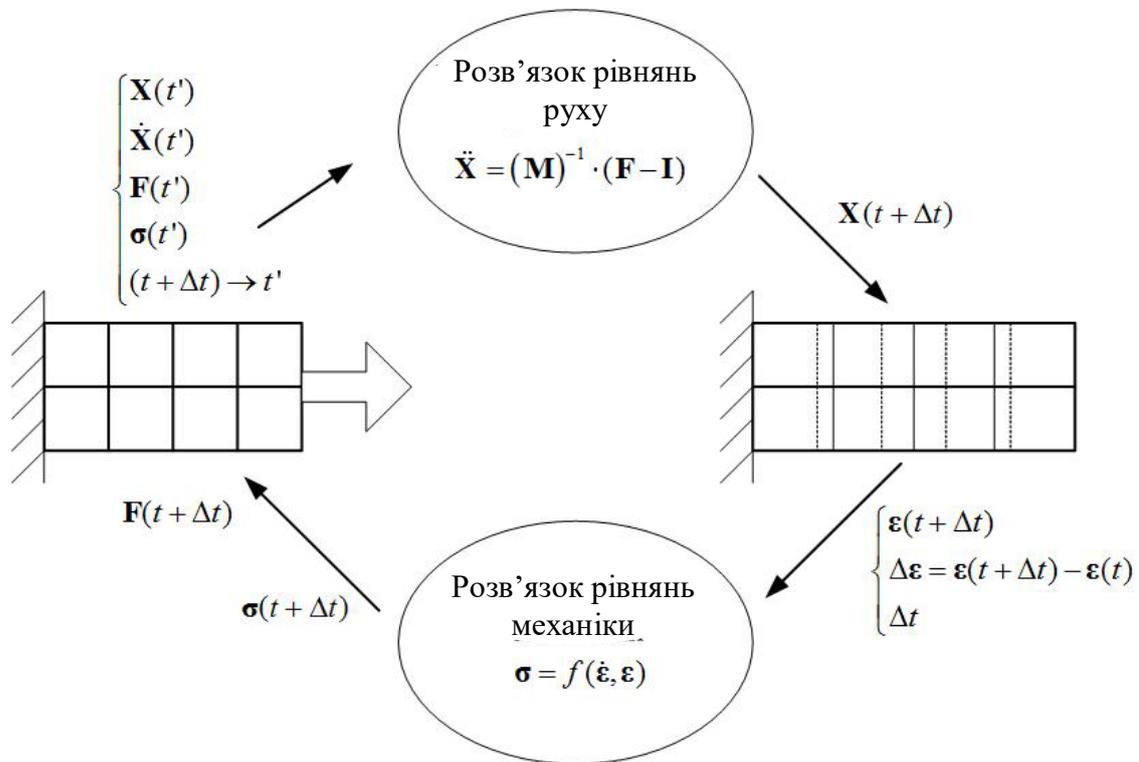


Рисунок 3.1 – Реалізація алгоритму розрахунку методом скінчених елементів

3.1.3 Побудова математичної моделі фрагмента конструкції

На першому етапі проводилися розрахунки ударно-хвильового процесу. Розрахункова область та кінцево-елементна модель з площиною симетрії XOZ представлена на рис. 3.2 і включає: сталевий ударник, алюмінієвий демпфер, гумовий демпфер, фрагмент алюмінієвої оболонки, що навантажується (торцевий шпангоут), і алюмінієвий куб для кріплення акселерометра. Контактна взаємодія між гумометалевим демпфером та фрагментом конструкції (торцевим шпангоутом) а також між елементами демпфера моделюється з використанням методу жорсткого контакту для нормальної

компоненти (вздовж лінії удару) та ізотропної моделі тертя Кулона – для дотичної компоненти.

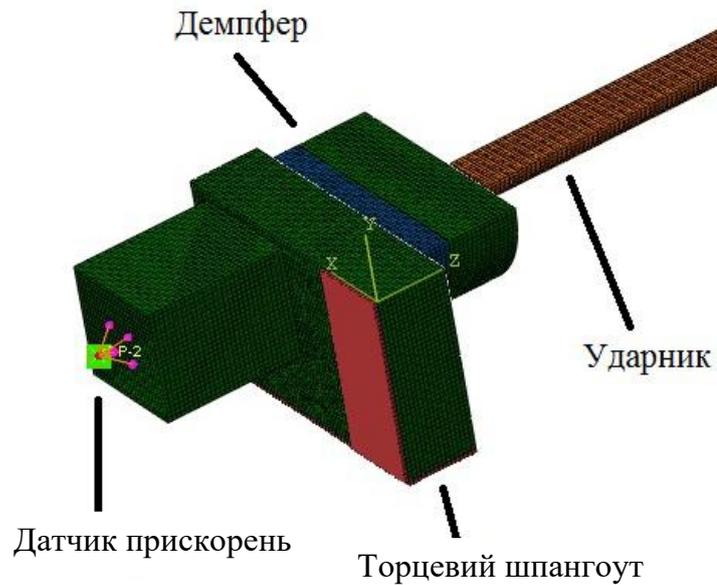


Рисунок 3.2 – Кінцево-елементна модель механічного ударника з фрагментом оболонки, що навантажується: конфігурація $t=0$ мс

3.1.4 Результати чисельного розрахунку ударного навантаження

На рис. 3.3 представлений результат розрахунку у моменти часу $t=0,24$ мс та $t=0,28$ мс.

На рис. 3.4 представлені результати розрахунку швидкості ударника 50м/с та експериментальні дані. На початку процесу спостерігається гарна відповідність результатів чисельного моделювання та експерименту. Подальша розбіжність обумовлена ідеалізованою кінцево-елементною моделлю, в якій не враховується демпфування навантажуваного матеріалу оболонки.

З рис. 3.4 видно, що активна фаза взаємодії ударника з демпфером і, відповідно, навантаження оболонки становить менше 0,3 мс, тому подальша розбіжність розрахунку з експериментом не впливає на точність моделювання на другому етапі. Графік ударного спектру з амплітуди та частотному наповненню відповідає випадку ближньої зони, що характерно для процесів поблизу спрацьовування піротехнічних засобів.

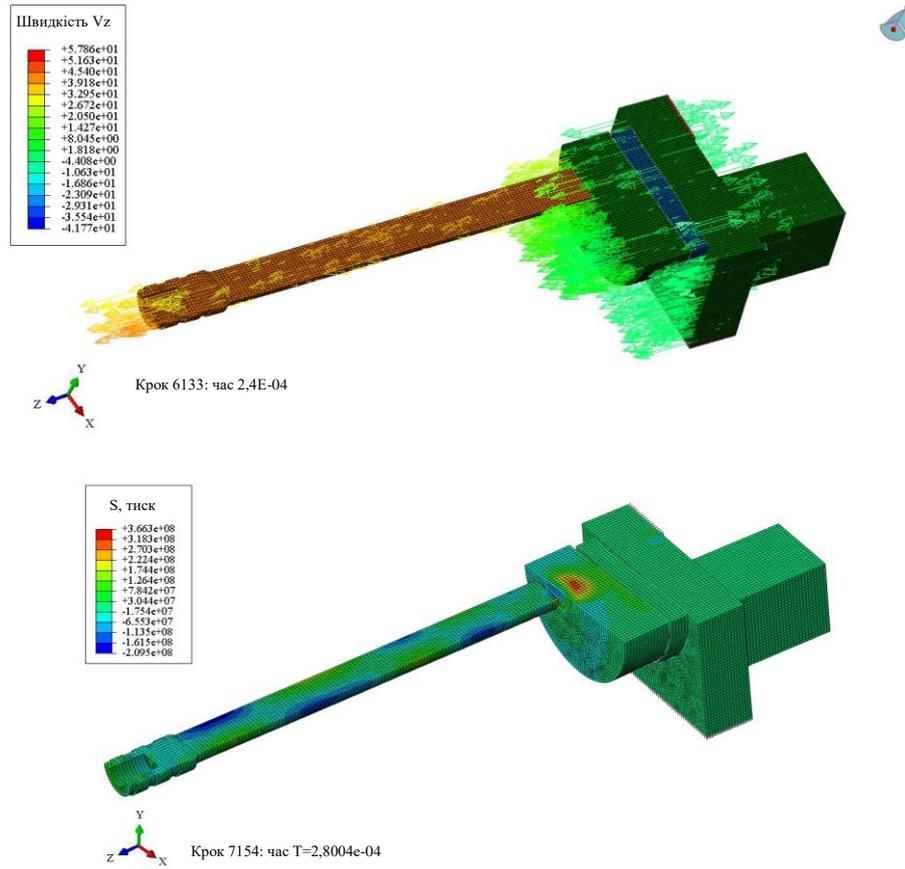


Рисунок 3.3 – Кінцево-елементна модель механічного ударника з фрагментом елемента, що навантажується; результати розрахунку: $t = 0,24$ мс (вгорі), $t=0,28$ мс (унизу)

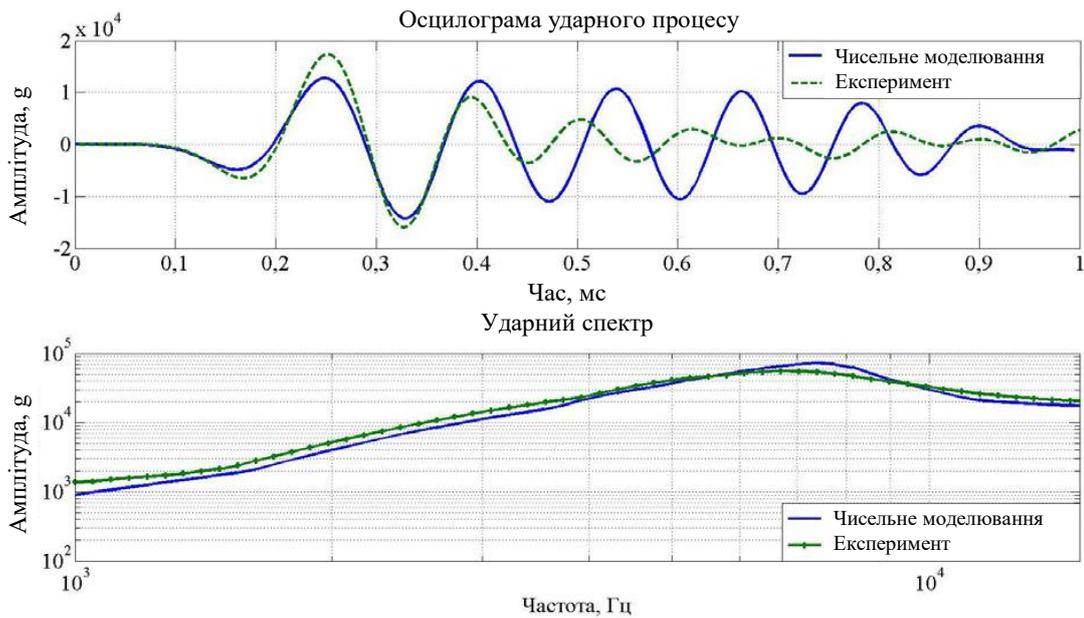


Рисунок 3.4 – Осцилограма процесу та ударний спектр для першого етапу розрахунку

3.2 Чисельне моделювання віброударного навантаження конструкції

3.2.1 Метод розв'язку

Моделювання динамічного відгуку конструкції з прикладу бака здійснювалося з використанням методу скінчених елементів. Крім кінцевих елементів суцільного середовища, у розрахунку використовувалися кінцеві елементи ізопараметричного типу, що використовують припущення теорії оболонок [32]. У сучасних розрахункових пакетах реалізовані співвідношення теорії Кірхгофа-Лява та Рейсснера-Міндліна для тонких і товстих оболонок відповідно. Вибір варіанту теорії для вирішення динамічних завдань визначається співвідношенням товщини фрагмента оболонки h і довжини хвилі λ_{ch} , що відповідає максимальній значущій частоті f_{ch} [33]:

Теорія Кірхгофа-Лява

$$h \leq \frac{\lambda_{ch}}{15}$$

Теорія Рейсснера-Міндліна.

$$h > \frac{\lambda_{ch}}{15}$$

У цій задачі товщина $h=4 \cdot 10^{-3}$ мм, $f_{ch}=10$ кГц, тоді:

$$\frac{\lambda_{ch}}{15} = \frac{1}{15} \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \pi}{f_{ch}}\right) \cdot \left(\frac{E \cdot h^2}{12 \cdot \rho_0 \cdot (1 - \nu^2)}\right)^{\frac{1}{2}}} = 4,2 \cdot 10^{-3} \quad (3.2)$$

Вибір кінцевого елемента здійснювався у припущенні сумісності деформації вигину та розтягування. Для визначення полів деформації та переміщень усередині кінцевого елемента використовуються функції форми, що задовольняють умові безперервності переміщень у вузлових точках кінцевого елемента та між елементами [34].

3.2.2 Побудова математичної моделі типової конструкції

Кінцево-елементна модель фрагмента оболонки з площиною симетрії YOZ та областю навантаження представлена на рис. 3.5.

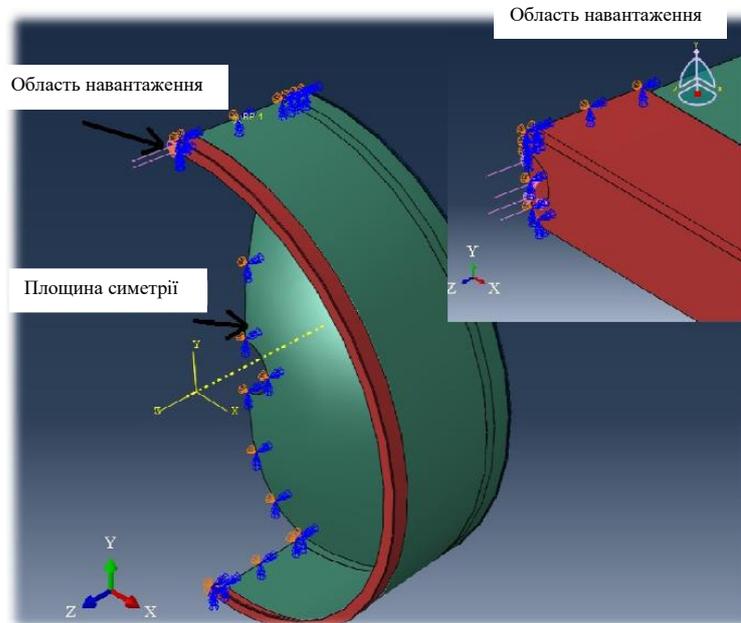


Рисунок 3.5 – Кінцево-елементна модель ємності

Елементи типу CIN3D8R задають значення імпедансу на вільній межі елемента рівне імпедансу матеріалу, тим самим у процесі розрахунку відсутня відбита ("паразитна") хвиля від вільної поверхні, викликана виключеною частиною розрахункової області (рис. 3.6).

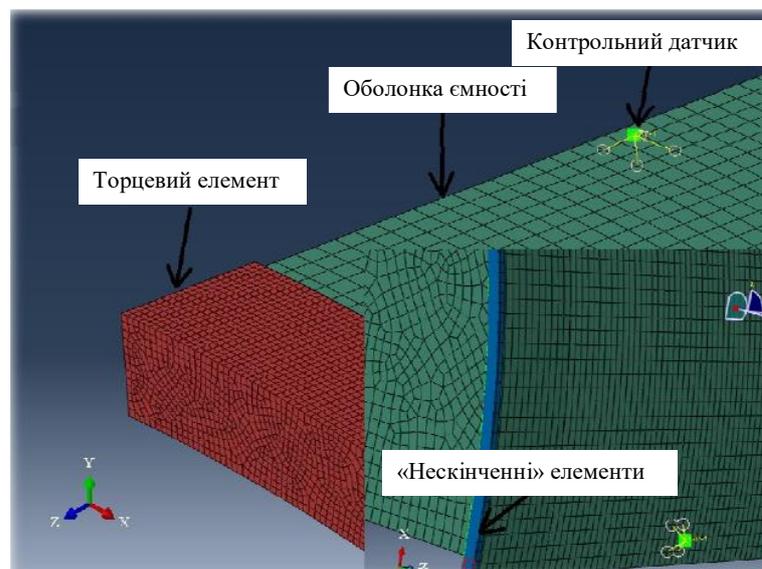
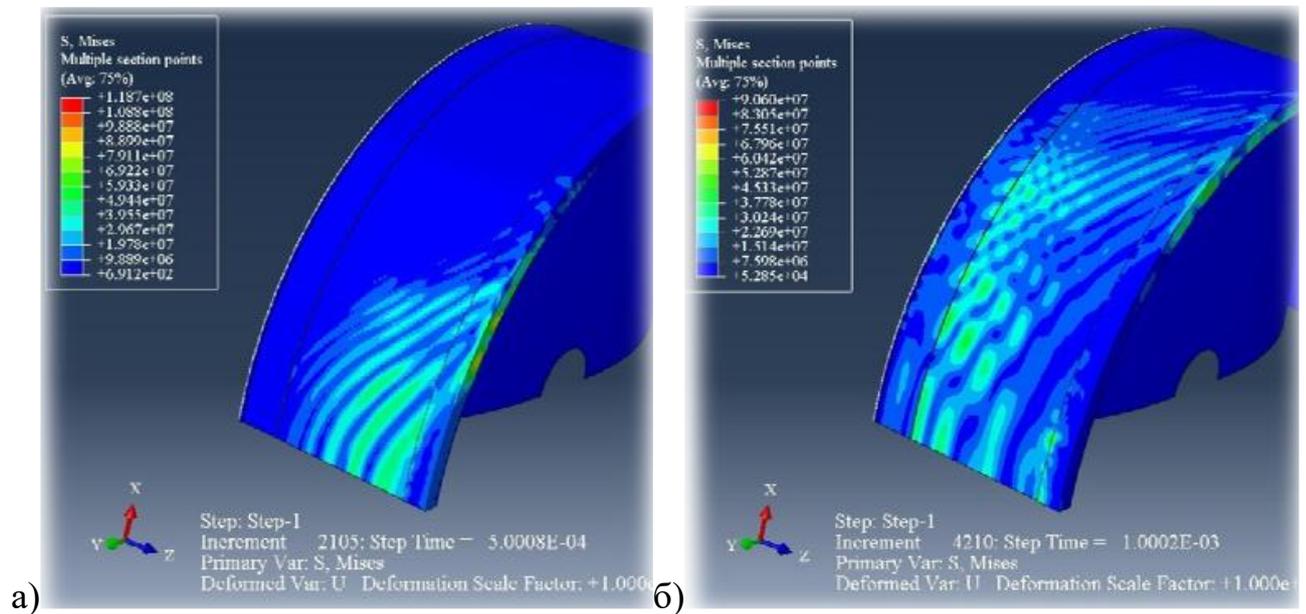


Рисунок 3.6 – Склад кінцево-елементної моделі ємності

3.2.3 Результати чисельного віброударного моделювання навантаження типової конструкції

На рис. 3.7 представлені результати чисельного моделювання відгуку ємності на динамічне навантаження $F(t)$, характерне для режимів, відтворюваних пристроєм локального навантаження спільно з гумометалевим демпфером.

На рис. 3.8 представлені графіки відгуку конструкції на ударне навантаження та обчислені ударні спектри прискорень за трьома напрямками.



а) для $t=0,5$ мс; б) для $t=1$ мс

Рисунок 3.7 – Кінцево-елементна модель ємності та результати розрахунку

3.3 Експериментальне відпрацювання пристрою локального навантаження

На рис. 3.9 представлені осцилограми віброударних процесів та ударних спектрів навантаження отриманих в експерименті та при чисельному моделюванні.

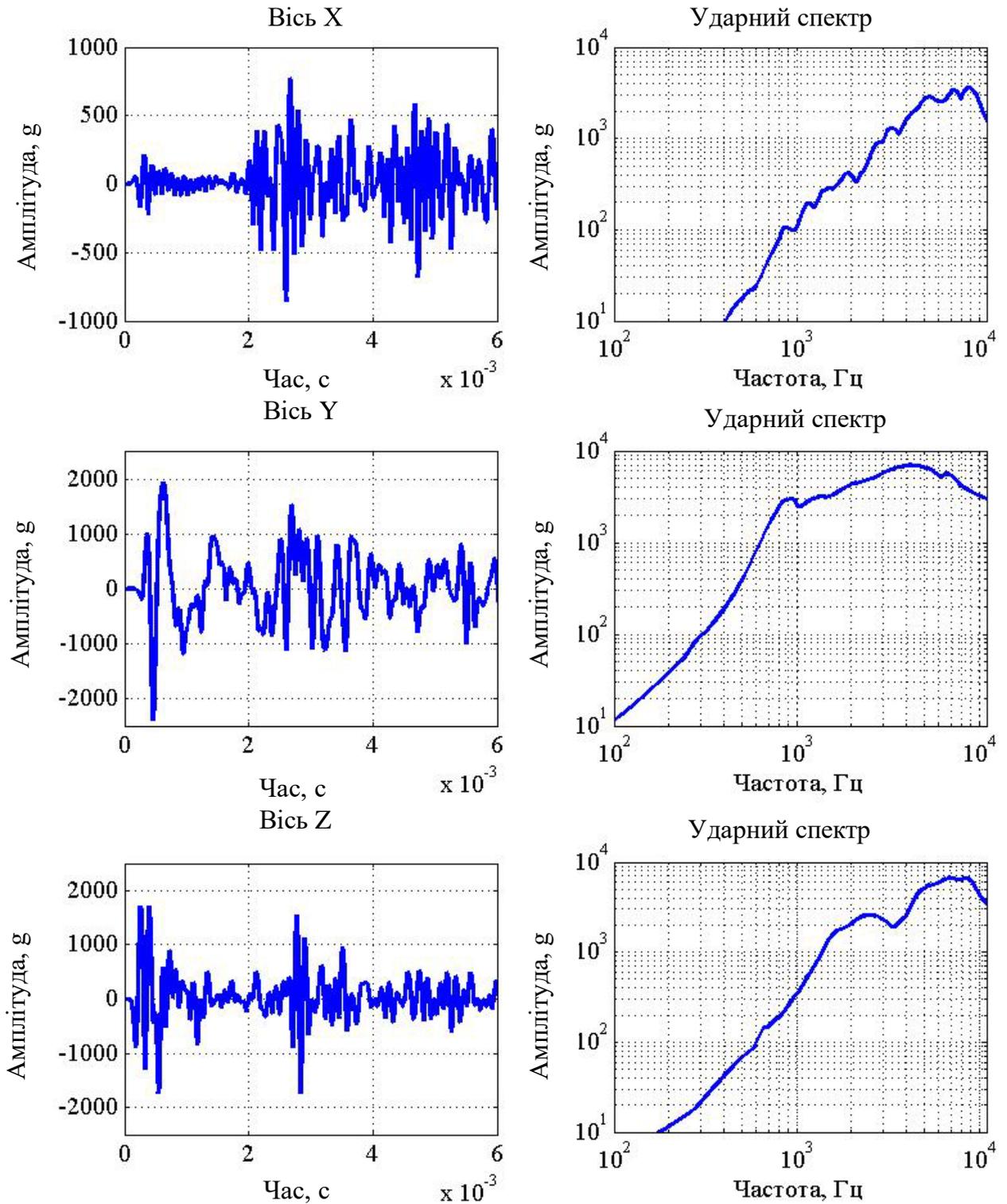


Рисунок 3.8 – Результати чисельного моделювання

Слід зазначити наявність екстремальних значень прискорень в області 1 і 7 кГц, що досить добре відповідає характерним пікам ударного спектру за умов експерименту. Розбіжності на віброударних осцилограмах процесів можна пояснити тим, що математична модель не враховує наявності зварних швів та

вафельної структури оболонки. Врахувати ці фактори складно через відсутність механічних характеристик зварних швів при ударно-хвильових процесах та через неприйнятне збільшення часу розрахунку.

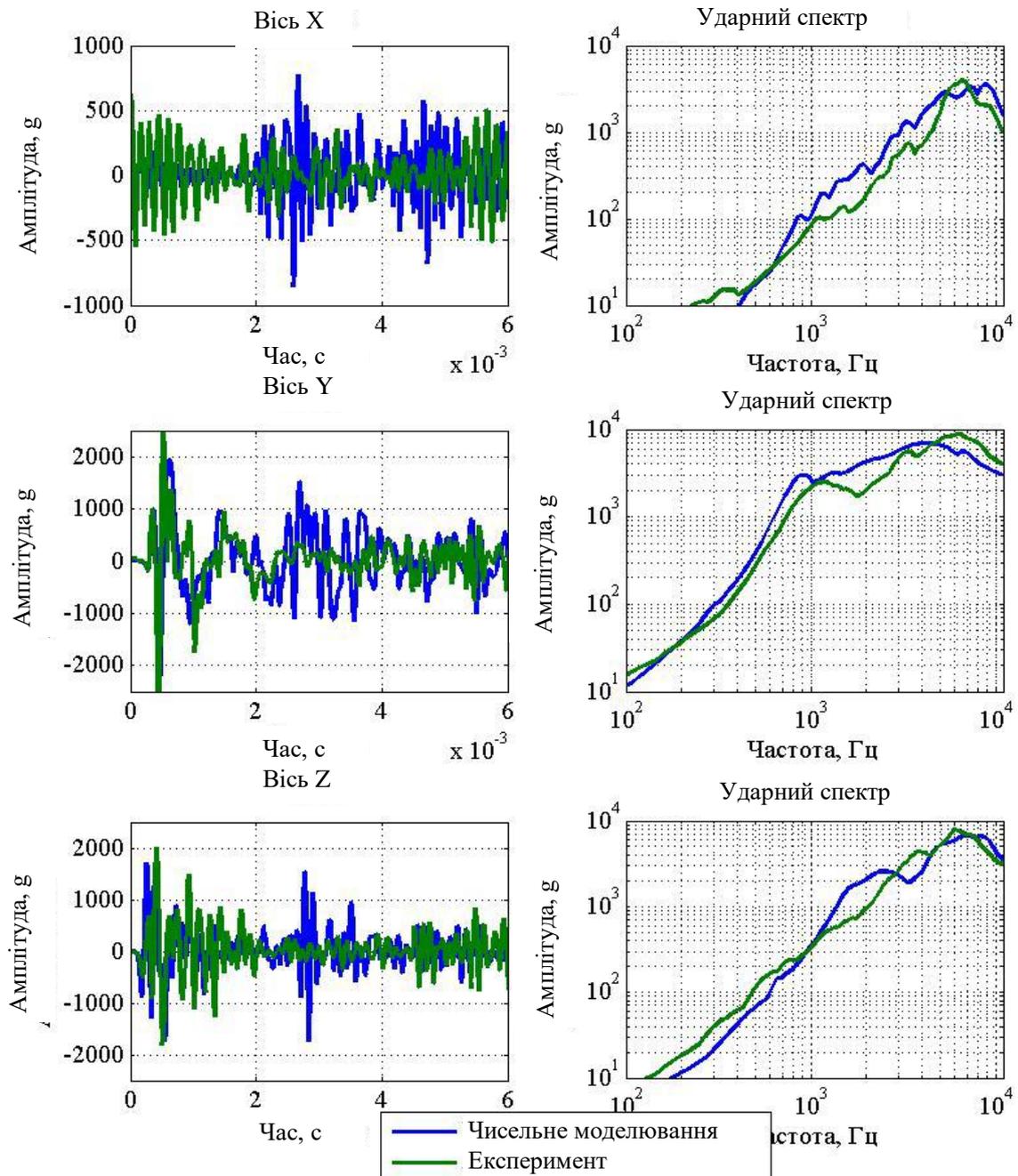


Рисунок 3.9 – Осцилограми процесів та ударні спектри при чисельному моделюванні та в експерименті

4 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ СТАЦІОНАРНОГО ВІБРОУДАРНОГО СТЕНДУ

4.1 Вихідні дані для чисельного розрахунку навантаження від вибухового джерела

На рис. 4.1 представлена типова конструкція навантажувального пристрою, що використовується при випробуваннях на віброударному стенді вибухової дії. До складу пристрою входить гума, спінений полістирол EPS та листові вибухова речовина. Нижче наведено огляд використовуваних рівнянь стану для кожного матеріалу, що застосовується в конструкції вибухового пристрою.

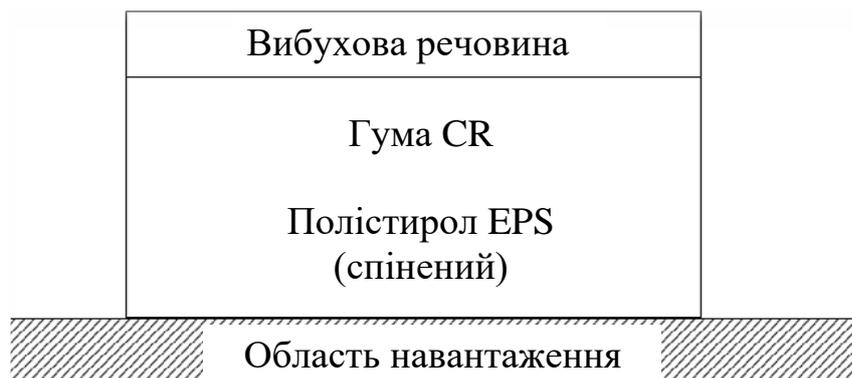


Рисунок 4.1 – Конструкція вибухового навантажувального пристрою віброударного стенду

4.1.1 Рівняння стану вибухової речовини

Для опису процесів детонації вибухової речовини та розльоту продуктів вибуху широке застосування отримало напівемпіричне рівняння стану продуктів детонації у формі Джонса-Вілкінса-Лі (JWL) [35]:

$$P=A \cdot \left(1 - \frac{\omega \cdot \eta}{R_1}\right) \cdot e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega \cdot \eta}{R_2}\right) \cdot e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \frac{\omega \cdot E}{\eta} \quad (4.1)$$

де A, B, R_1, R_2 – константи, що визначаються за експериментальними даними; E – внутрішня енергія вибухової речовини в одиниці об'єму; $\eta = \rho_0 / \rho$, ρ_0 – початкова щільність вибухової речовини, ρ – поточна густина.

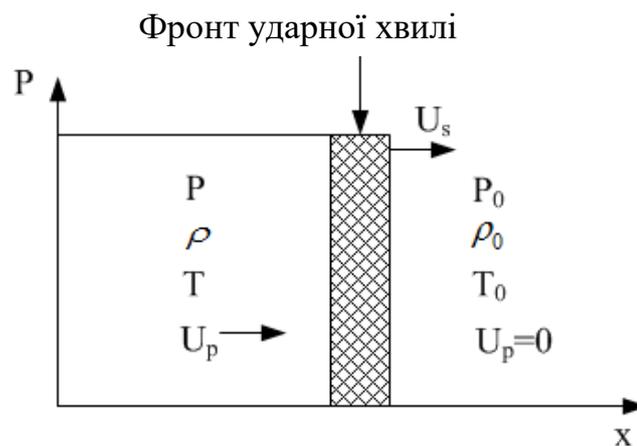
Значення констант для різних типів вибухової речовини наведені в [36]. При розрахунку роботи імпульсного пристрою використовувалися фізико-механічні характеристики вибухової речовини марки EL-500С, аналогічної тій, що використовувалась в експерименті.

Таблиця 4.1 – Параметри рівняння стану для вибухової речовини EL-500С

$\rho_0, \text{кг/м}^3$	$A, \text{ГПа}$	$B, \text{МПа}$	R_1	R_2	$E \cdot 10^6, \text{кДж/м}^3$	$D, \text{м/с}$	ω
1480	349	4,524	4,1	1,2	6,2	7000	0,3

4.1.2 Рівняння стан гуми

У практиці чисельних розрахунків використовується ударна стисливість (Адіабату Гюгонію) [37]. На рис. 4.2 схематично представлений фронт ударної хвилі



U_s - швидкість фронту ударної хвилі; U_p - масова швидкість частинок за фронтом ударної хвилі; T - температура; P - тиск; ρ - густина матеріалу

Рисунок 4.2 – Розповсюдження фронту ударної хвилі у матеріалі

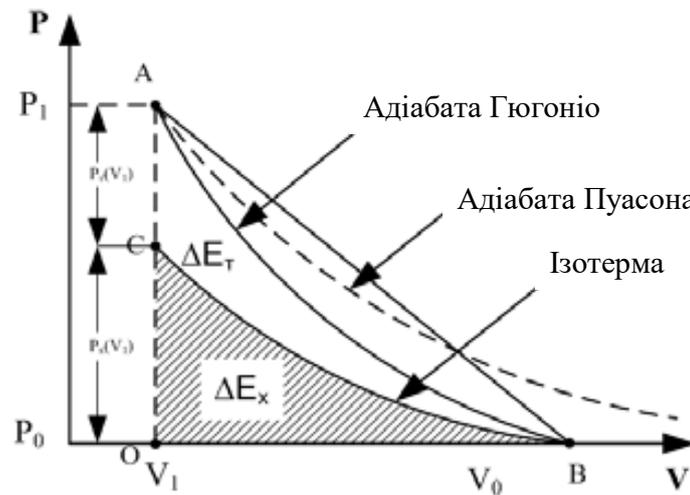


Рисунок 4.3 – Повне збільшення внутрішньої енергії при ударному стисканні матеріалу

Адіабата — це лінія на термодинамічній діаграмі, яка зображує процес, що відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем. Ізотерма (дав.-гр. ἰσός — «однаковий»; дав.-гр. θερμη — «тепло») — це лінія, що з'єднує точки з однаковими показниками певної величини, яка може бути температурою, тиском, концентрацією тощо.

Рівняння ударної адіабати

$$P_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu}{(1 - S\mu)^2}$$

$$E_H = \frac{P_H \mu}{2\rho_0}$$

$$\mu = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} = 1 - \frac{V}{V_0} = \frac{U_p}{U_s} \quad (4.2)$$

Характеристики полімерних матеріалів за умов високих швидкостей деформацій зазнають змін; так у гуми, що практично стискається в статиці, при ударному навантаженні коефіцієнт Пуассона знижується від 0,4998 до 0,36 [38]. При чисельному моделюванні для гуми при ударному стисканні використовується описана вище модель з характеристиками, представленими в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Фізико-механічні характеристики для гуми [39]

Густина кг/м ³	C ₀ м/с	S	Г	G, МПа	S _{max} , МПа
1340	1500	2,83	1,1	2	100

4.1.3 Рівняння стану пористих матеріалів

Стан пористого матеріалу описується рівнянням:

$$\alpha = A(P, P_t, P_{\max}), \quad (4.3)$$

де P_t - похідна тиску за часом.

Якщо $P_t > 0$ то відбувається стиск матеріалу, при $P_t < 0$ - розвантаження. P_{\max} – максимальний тиск, який здатний витримати матеріал до появи пластичних деформацій. Характерний графік функції $A(P, P_t, P_{\max})$ представлений рис. 4.1.4.

При $\alpha > 1$ швидкість звуку в пористому матеріалі визначається як

$$c = c_s + (c_e - c_s) \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha_0 - 1}, \quad (4.4)$$

де c_s і c_e - швидкість звуку в суцільному і пористому матеріалах відповідно.

Відповідно до даної моделі стиснення та розвантаження пористого матеріалу відбувається у кілька етапів (рис. 4.4): пружні деформації вздовж прямої A_{el} до моменту досягнення тиском величини P_e , пластичні деформації вздовж A_{pl} при тиску $P > P_e$, розвантаження по прямій A_{el}^B . Повторне навантаження матеріалу відбувається по пластичній ділянці. При наступному навантаженні матеріалу, якщо $P > P_{\max}$, матеріал перебуває в пластичній ділянці, інакше працює пружна модель.

Отже, деформування матеріалу відбувається згідно наступного правила:

$$\alpha = A(P, \alpha_{\min}) = \begin{cases} A_{pl}(P), & \text{если } A_{pl}(P) \leq \alpha_{\min} \\ A_{el}(P, \alpha_{\min}). \end{cases} \quad (4.5)$$

Пружність:

$$A_{el}(P, \alpha_{min}) = \alpha_{min} + \frac{d\bar{A}_{el}(\alpha_{min})}{dP} (P - P_{pl}(\alpha_{min})) \quad (4.6)$$

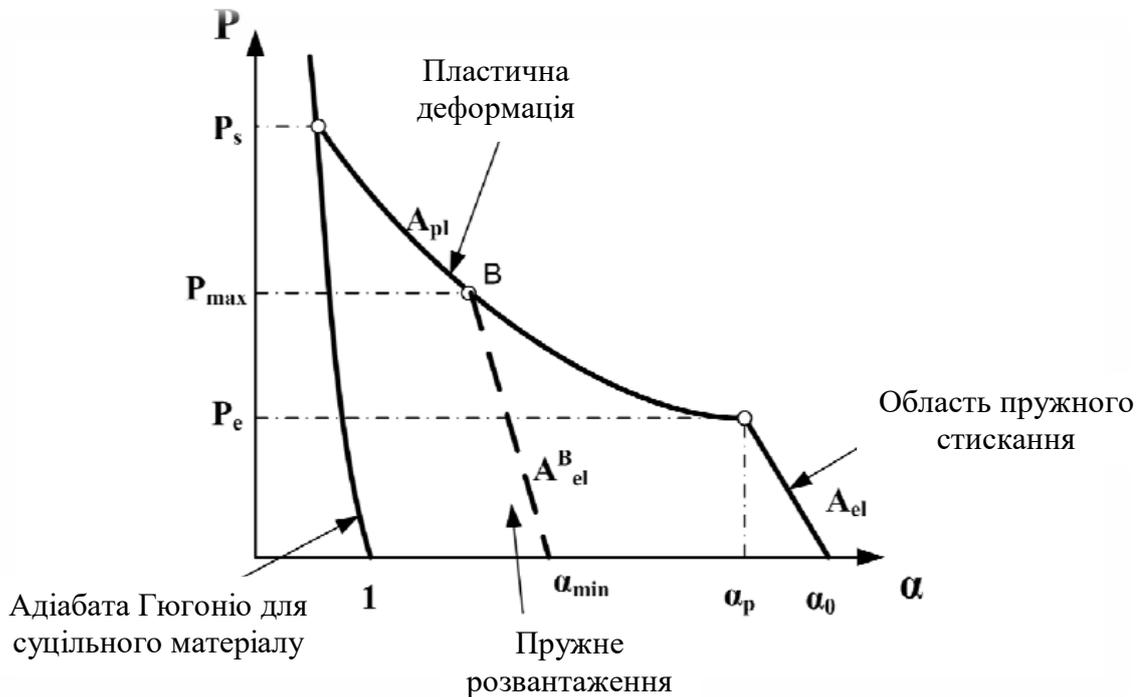


Рисунок 4.4 – Модель P- α для опису процесу стиснення пористого матеріалу

Пластичність:

$$A_{pl}(P) = 1 + (\alpha_e - 1) \cdot \left(\frac{P_s - P}{P_s - P_e} \right)^2 \quad (4.7)$$

Рівняння стану у формі P- α (4.4–4.7) вирішується спільно з рівнянням стану Мі-Грюнайзена та параметрами ударної адіабати, відповідного вихідного (за відсутності пор) матеріалу. Чисельна реалізація рішення представлена в [40].

4.1.4 Рівняння стану сталі

При верифікації розрахункової методики для сталі C235JR використовувалася пружна модель поведінки матеріалу. Фізико-механічні характеристики представлені у табл. 4.3 [9].

Таблиця 4.3 - Фізико-механічні показники сталі С235JR

Матеріал	Модуль об'ємного стискання К, ГПа	Модуль зсуву G, ГПа	Коефіцієнт Пуасона	Густина, кг/м ³
Сталь	175	81	0,3	8129

4.2 Чисельне моделювання ударно-хвильового навантаження пакету матеріалів

На першому етапі, який може розглядатися як верифікація, підтверджується правильність чисельного розрахунку при підриві заряду вибухової речовини на основі порівняння з існуючими надійними аналітичними розрахунками. У якості критерію прийнято величину питомого імпульсу, що надається поверхні навантаження при підриві вибухової речовини (рис. 4.5) [6]:

$$i = \frac{8}{27} \rho_0 l D, \quad (4.8)$$

де i - питомий імпульс при відбитті хвилі детонації від жорсткої стінки, ρ_0 - щільність вибухової речовини; l - товщина вибухової речовини; D - швидкість детонаційної хвилі у вибуховій речовині.

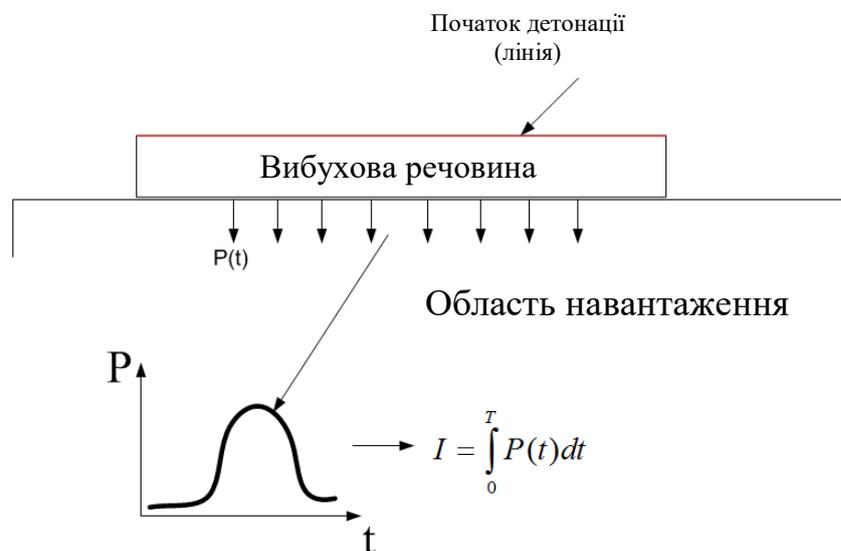


Рисунок 4.5 – До розрахунку повного імпульсу від підриву ВР

Формула (4.8) одержана в одновимірному наближенні; для її узагальнення на тривимірний випадок додатково вводять поняття активної маси заряду m_a - маса продуктів детонації, які розлітаються за нормаллю до навантажуваної поверхні. Питомий імпульс відкритого циліндричного заряду з урахуванням активної маси заряду, що дорівнює [2]:

$$i = \frac{8}{27} D \rho_0 l \left(\frac{4}{9} - \frac{8}{81} \frac{l}{r_0} + \frac{16}{2187} \frac{l^2}{r_0^2} \right), \text{ при } l < \frac{9}{2} r_0$$

$$i = \frac{16}{81} D \rho_0 r_0, \text{ при } l \geq \frac{9}{2} r_0, \quad (4.9)$$

де r_0 - початковий радіус заряду.

Для розрахунку питомого імпульсу на стенд вибухової дії слід застосовувати перше рівняння (4.9), оскільки висота заряду завжди набагато менше радіусу основи ($l \sim 1$ мм, $r_0 \sim 25$ мм). При цьому весь імпульс передається плиті за короткий проміжок часу [6]:

$$\tau \approx 2l/D. \quad (4.10)$$

На другому етапі перевіряється правильність обраних фізико-механічних параметрів для рівнянь стану матеріалів демпфуючого пакета: в даному випадку гуми та спіненого полістиролу EPS. Критерієм точності моделювання є час приходу, амплітуда та профіль швидкості фронту ударної хвилі, а також питомий імпульс, наданий навантажувальній поверхні. Ці дані отримують експериментально, тому другий етап можна розглядати як валідацію методики.

4.2.1 Метод розв'язку

Чисельне моделювання ударно-хвильового навантаження пакету матеріалів здійснювалося з використанням методу скінчених елементів та методу згладжених частинок (SPH). Схема застосування методу скінчених елементів докладно викладена у розділі 3. Чисельне моделювання виконувалося у дво- та тривимірній постановці. У першому випадку використовувалися 4-х

вузлові плоскі елементи з білінійною функцією форми та редукованою схемою інтегрування у центральній точці кінцевого елемента [5]. Як і раніше, контактна взаємодія у розрахунковій області здійснювалася з використанням методу жорсткого контакту – для нормальної компоненти та ізотропної моделі тертя Кулона – для дотичної компоненти.

Застосування методу згладжених частинок (SPH) обумовлено його високою точністю моделювання розпаду-розриву на фронті детонаційної хвилі порівняно із сітковими методами. У процесі моделювання вирішуються представлені в розділі 2 рівняння збереження маси, імпульсу та енергії, де похідні обчислюються за допомогою сплайн-інтерполяції за точками (згладженим частинкам), в яких задаються параметри середовища, що деформується. За допомогою інтерполяційних функцій, для яких згладжені частинки є точками інтерполяції, обчислюється рішення у всій області інтегрування [7].

Моделювання проводиться у програмних пакетах. Для окремих розрахункових задач з метою підвищення точності моделювання використовувалися дві кінцево-елементні моделі, побудовані у програмних пакетах.

4.2.2 Верифікація методики чисельного моделювання

Для обґрунтування правильності розрахунків проведено ряд чисельних експериментів. Отримані під час розрахунку інтегральні величини тиску порівнювалися з аналітичними значеннями згідно (4.8). Для вибухової речовини використані рівняння стану у формі (4.1) з параметрами матеріалу, наведеними у табл. 4.1. Розміри заряду вибухової речовини: $l=30$ мм, $r=10$ мм. Граничні умови для моделювання жорсткої стінки та одномірного наближення відповідали відсутності переміщення вздовж осей OX та OY (рис. 4.6, 4.7). Вісь симетрії проходить вздовж осі OX . У точках 1-6 реєструвалися профілі тиску у часі.

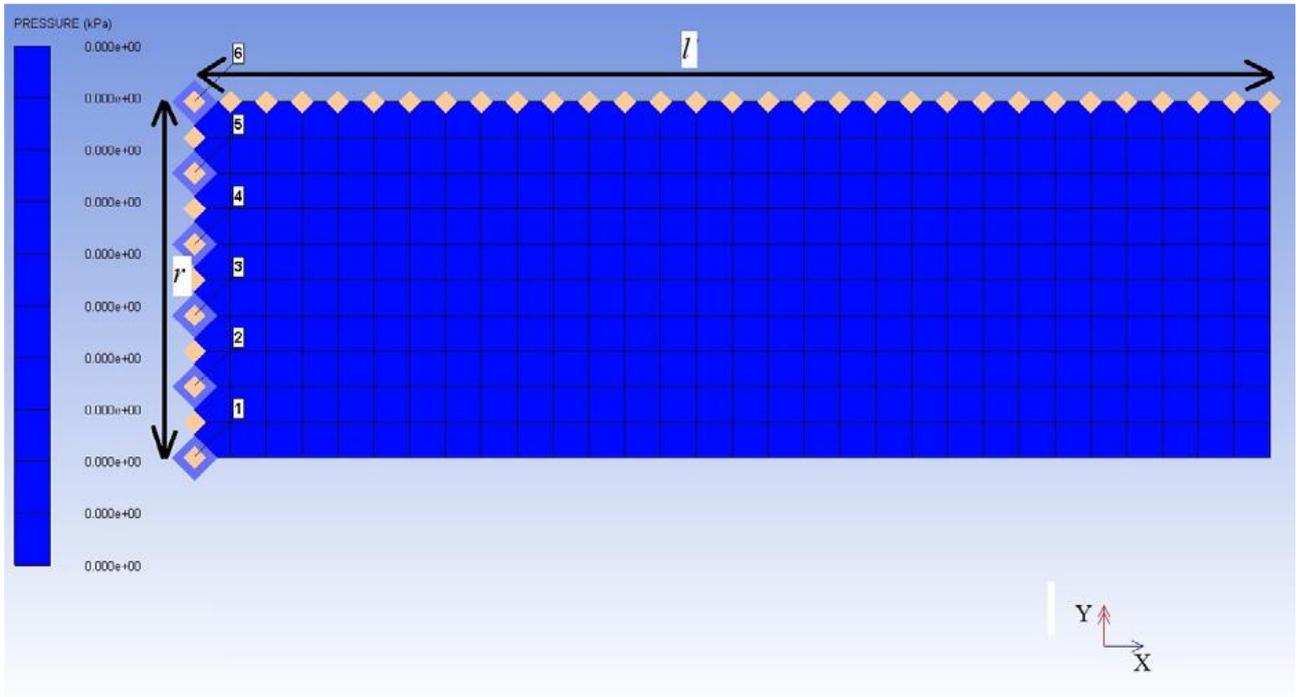


Рисунок 4.6 – Початковий стан для розрахунку питомого імпульсу жорстку стінку в одновимірному наближенні ($t=0$)

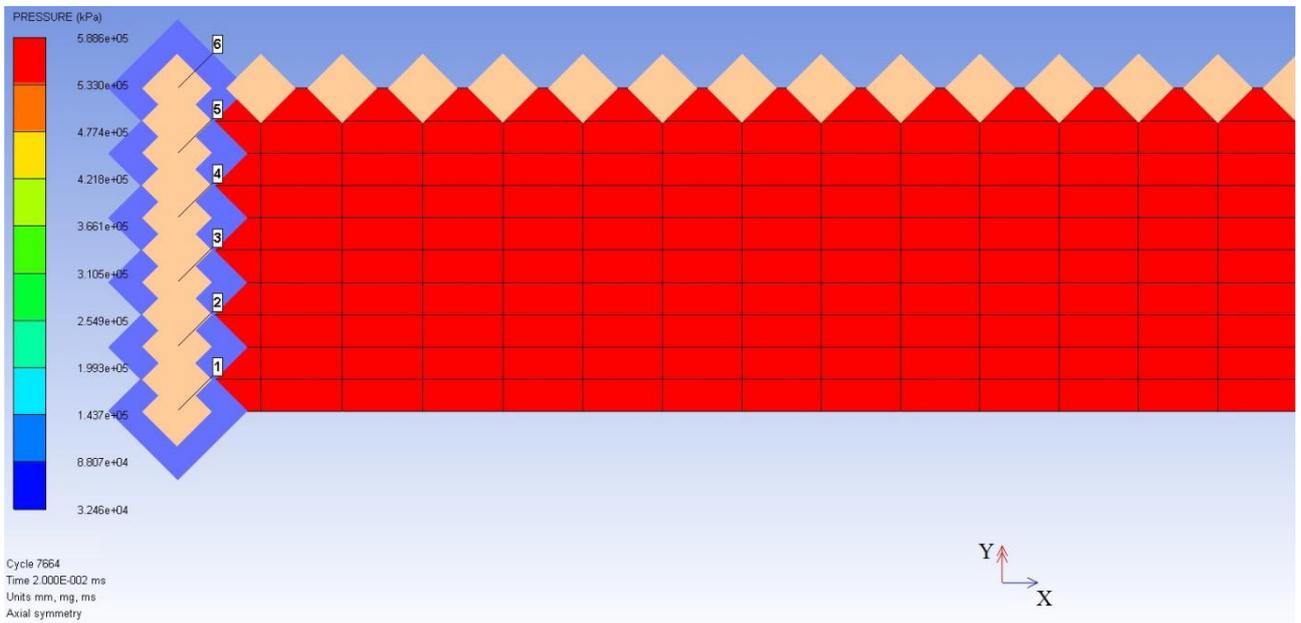


Рисунок 4.7 – Розрахунок питомого імпульсу на жорстку стінку в одновимірному наближенні ($t=20$ мкс)

Профіль тиску на жорстку стінку представлений рис. 4.8.

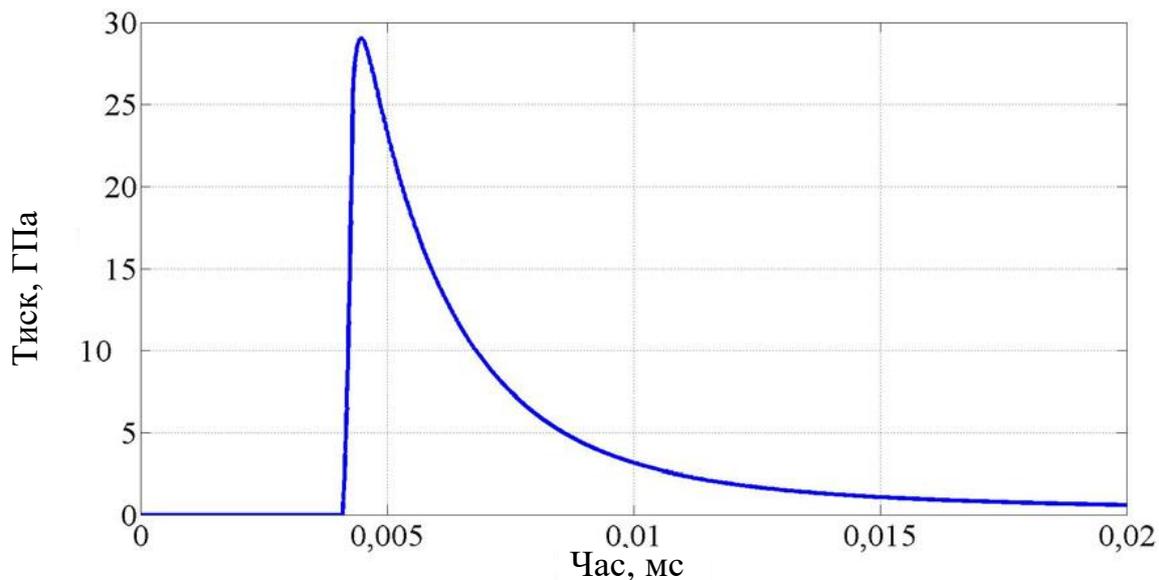


Рисунок 4.8 – Профіль тиску на жорстку стінку

На рис. 4.9, 4.10 представлена модель заряду з осью симетрією та вільним граничними умовами вздовж осі ОУ, що відповідає розрахунку питомого імпульсу з урахуванням активної маси заряду.

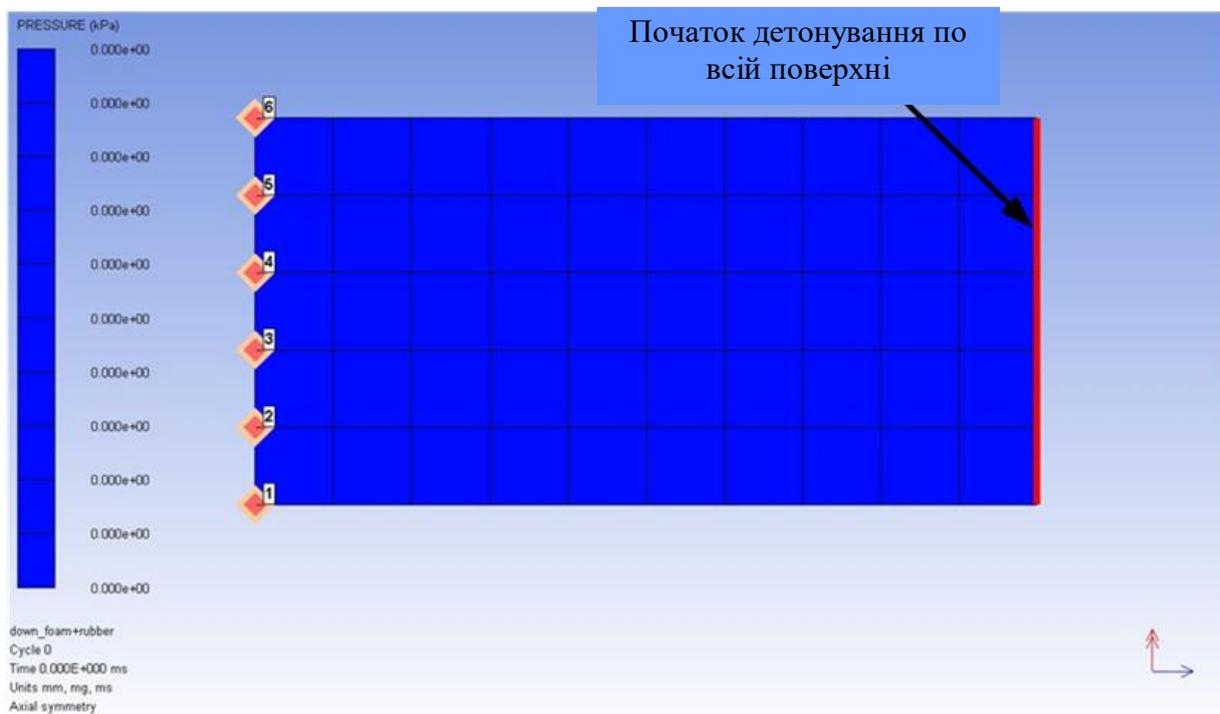


Рисунок 4.9 – Початковий стан для розрахунку питомого імпульсу жорстку стінку тривимірному наближенні ($t=0$).

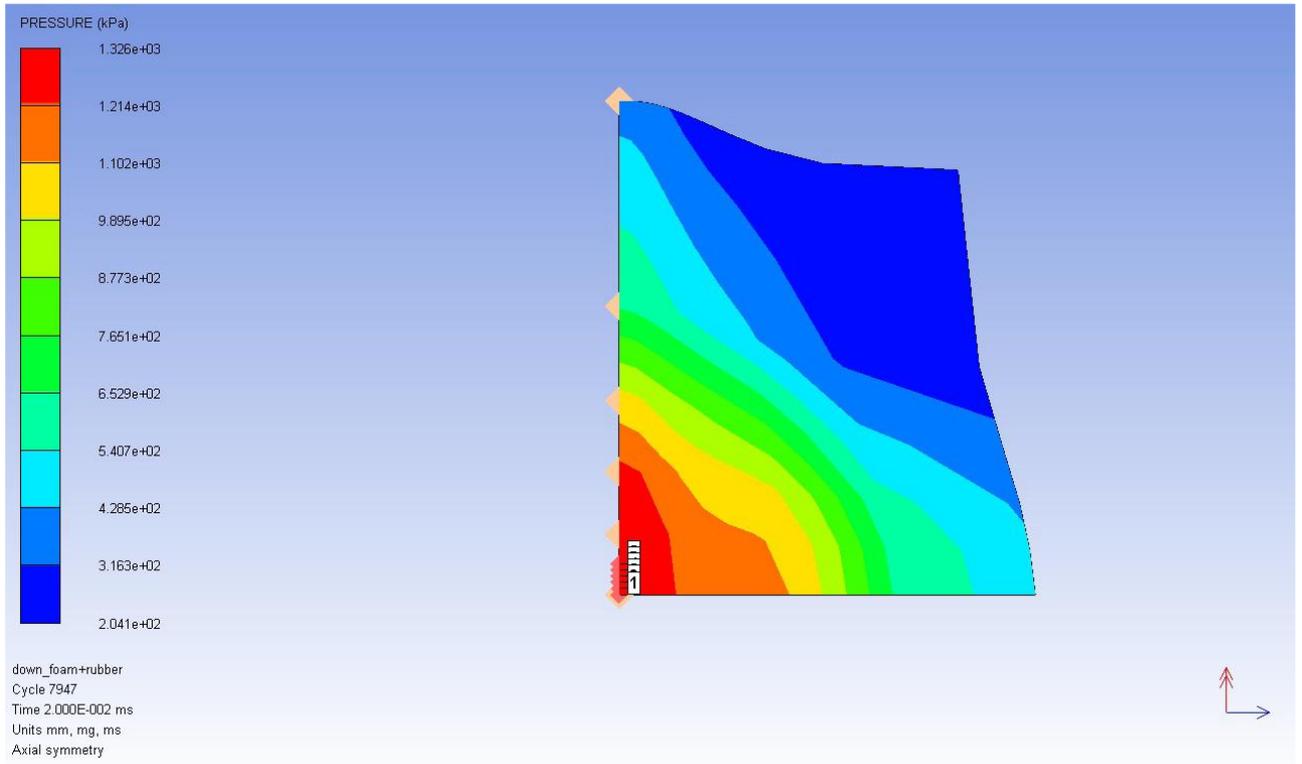


Рисунок 4.10 – Розрахунок питомого імпульсу на жорстку стінку у тривимірному наближенні ($t=20$ мкс)

Профіль тиску на жорстку стінку та питомий імпульс представлені на рис. 4.11, 4.12.

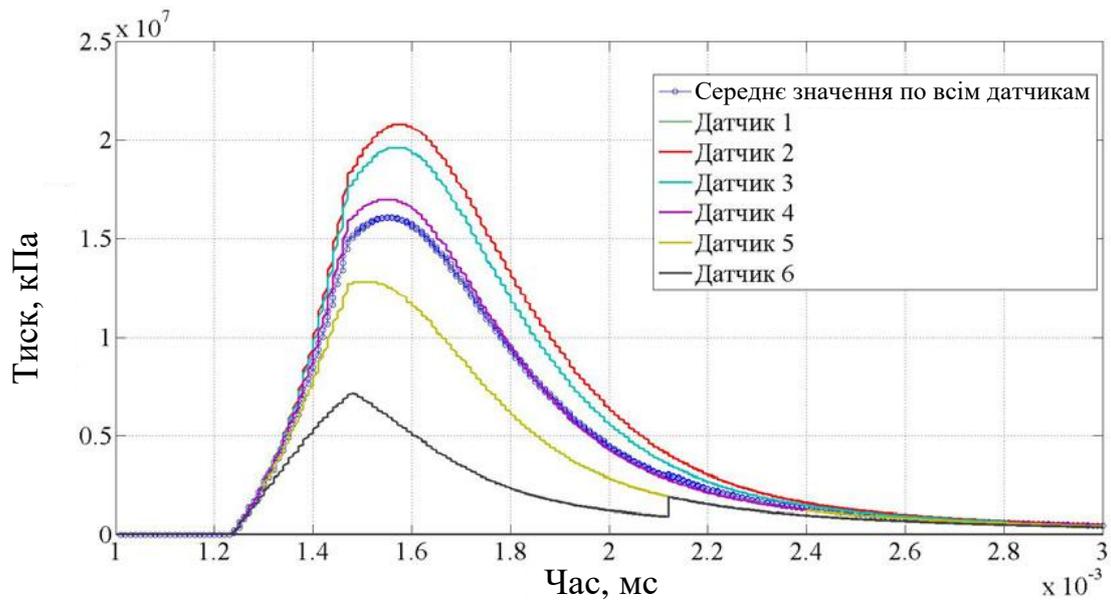


Рисунок 4.11 – Профіль тиску на жорстку стінку

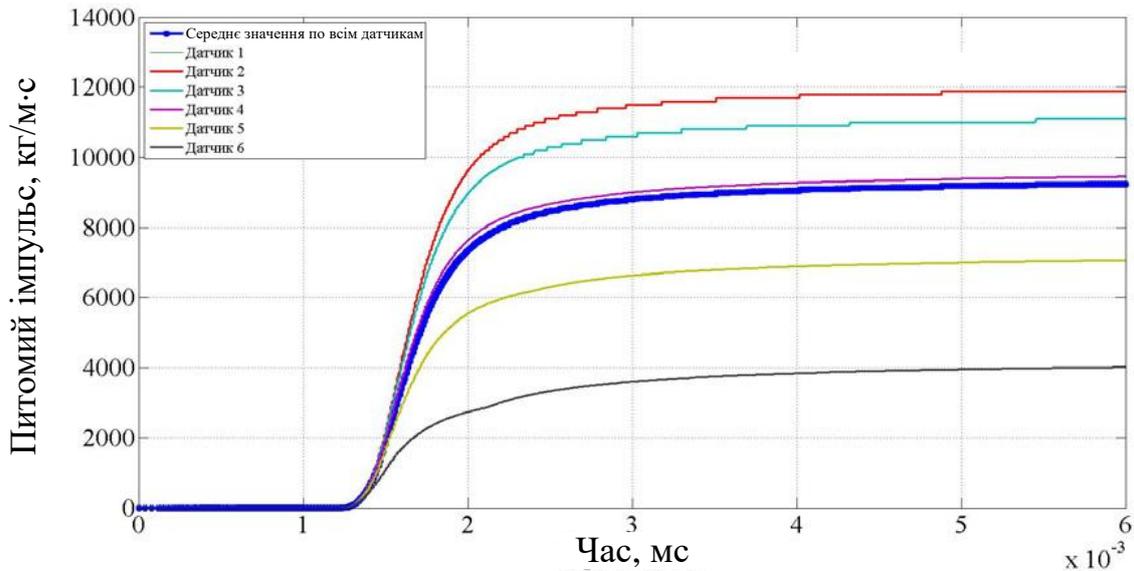


Рисунок 4.12 – Питомий імпульс детонуючої вибухової речовини
 $(i_{\text{ср}}=9,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}\cdot\text{с})$

Вихідні дані для заряду: $l=10$ мм, $r=5$ мм, $\rho_0=1480$ кг/м³, $D=7000$ м/с. Для розрахунку питомого імпульсу заряду необхідно використати перше рівняння (4.9), оскільки $l = 10 < 22,5$ мм [2]. Величина питомого імпульсу на стінку $i_A=8,5 \cdot 10^3$ кг/м·с. Розрахункове (середнє) значення питомого імпульсу (рис. 4.12) $i_{\text{ср}} = 9,2 \cdot 10^3$ кг / (м с).

Досить точний збіг результатів чисельного та аналітичного розрахунку можуть вважатися обґрунтуванням коректності розробленої методики: вибору кінцево-елементної апроксимації та рівнянь стану.

4.2.3 Валідація результатів чисельного моделювання

Валідація розрахунків швидкості фронту хвилі.

Фізичне обґрунтування (валідація) здійснювалось шляхом порівняння розрахункових значень профілів швидкостей фронтів ударних хвиль експериментальними даними. Експериментальне складання являло собою пакет із шару спіненого полістиролу EPS товщиною 13 мм, шару гуми товщиною 10 мм та шару листової вибухової речовини товщиною 1,5 мм (рис. 4.13). У

процесі випробувань системою вимірювань (СІ) реєструвалася швидкість v руху рамок (червоні лінії рис. 4.13) в магнітному полі \vec{B} .

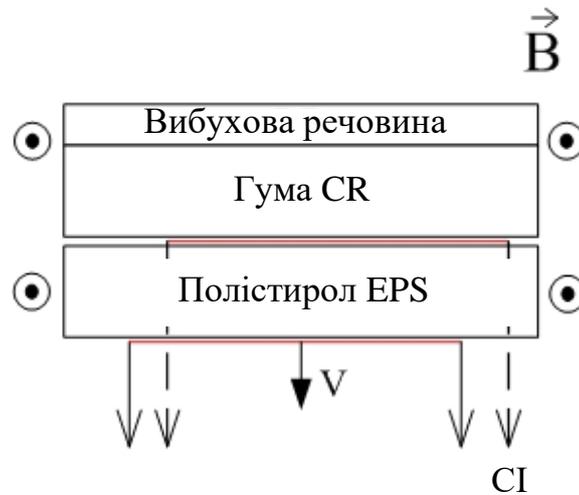


Рисунок 4.13 – Експериментальне складання

На рис. 4.14, 4.15 представлені результати чисельного моделювання процесу поширення ударної хвилі в пакеті матеріалів та їх деформація для моментів часу $t_1=4$ мкс та $t_2=50$ мкс, відповідно. Отримані при моделюванні дані про поведінку матеріалів в умовах ударно-хвильового навантаження, порівнювалися з експериментальними даними.

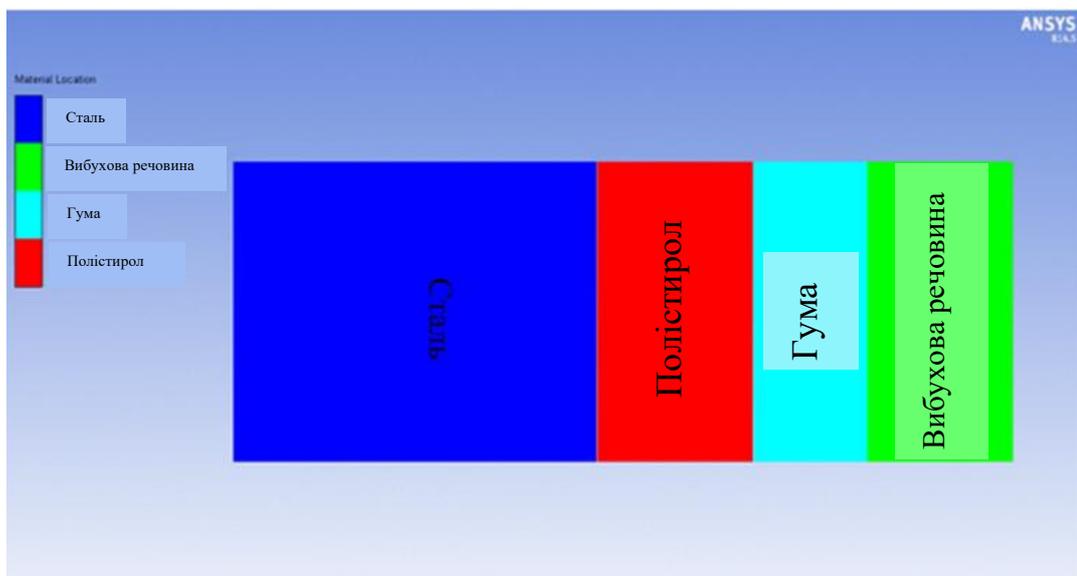


Рисунок 4.14 – Деформація пакету матеріалів для $t_1 \approx 4$ мкс

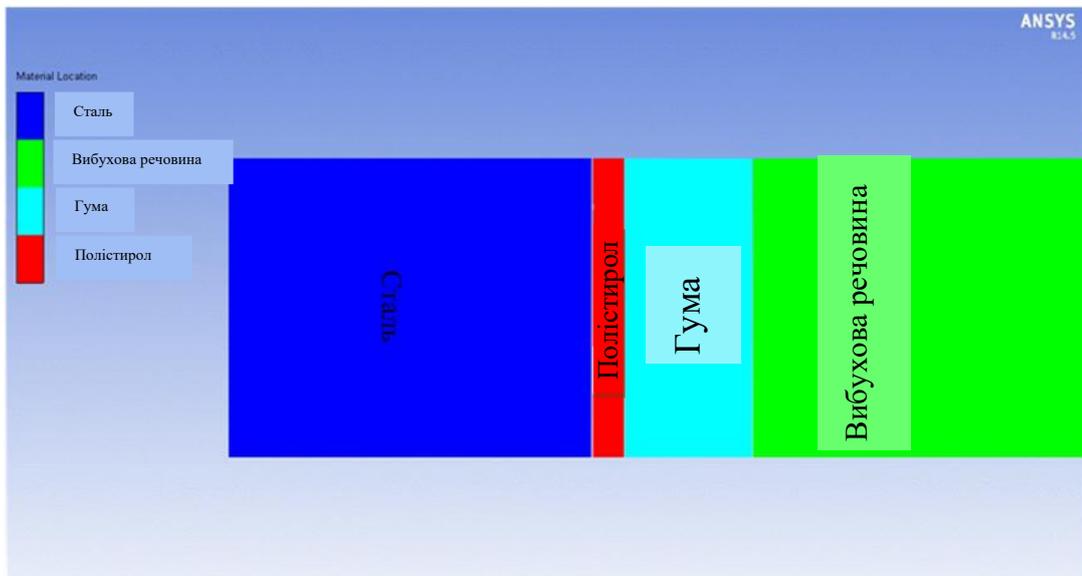


Рисунок 4.15 – Деформація пакету матеріалів для $t_2 \approx 50$ мкс

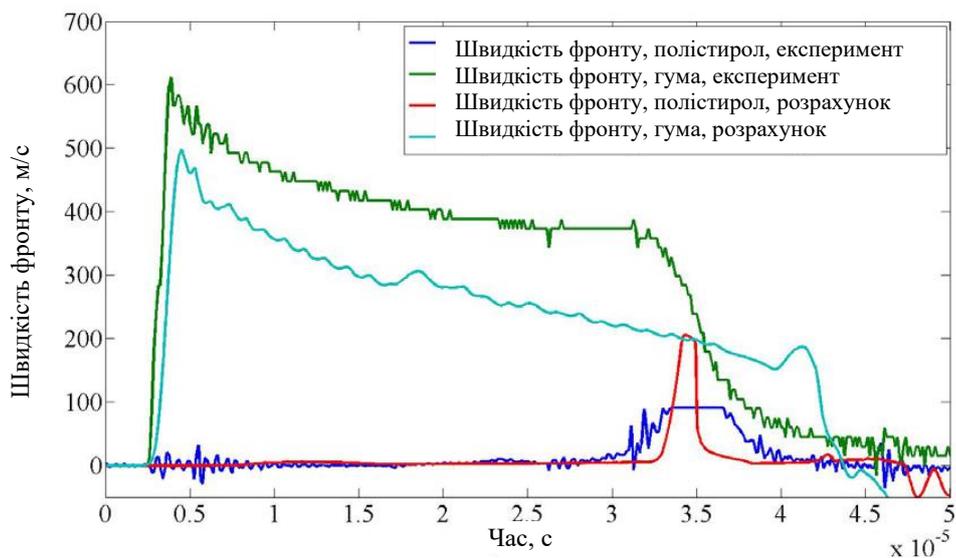


Рисунок 4.16 – Зміна швидкості фронту хвилі в окремих матеріалах демпфера (розрахунок та експеримент)

На рис. 4.16 представлені результати чисельного розрахунку та експериментальні дані, отримані для того самого пакету матеріалів. Процес руху поверхні контакту гуми CR та полістиролу EPS збігається з розрахунковими даними. Через недостатню роздільну здатність систем вимірювання для графіка швидкості фронту полістиролу EPS в експерименті було отримано перевищення сигналу і цим пояснюється пряма лінія на графіку

в момент часу 35 мкс. Отримані результати свідчать про достатню точність запропонованої методики: кінцево-елементної апроксимації розрахункової галузі, моделей матеріалів, вихідних даних з фізико-механічних властивостей матеріалів, а також оцінку точності моделювання.

Валідація розрахунків амплітуди та профілю тиску.

Наступний етап валідації – порівняння законів зміни тиску, повідомляється навантажуваної поверхні, в розрахунку та експерименті. Схема експерименту представлена на рис. 4.17. Для реєстрації тиску використовувався манганінові датчики P1 і P2, що живляться від імпульсного джерела живлення напругою 400 В. Датчики тиску розташовувалися вздовж напрямку поширення фронту детонаційної хвилі. В якості навантажуваної поверхні використовувалася плита з полістиролу EPS. Датчики тиску встановлювалися між двома зразками з полістиролу EPS для запобігання короткому замиканню при запитуванні датчика та для безперешкодного проходження ударної хвилі крізь складання з метою мінімізації інтерференції хвиль.

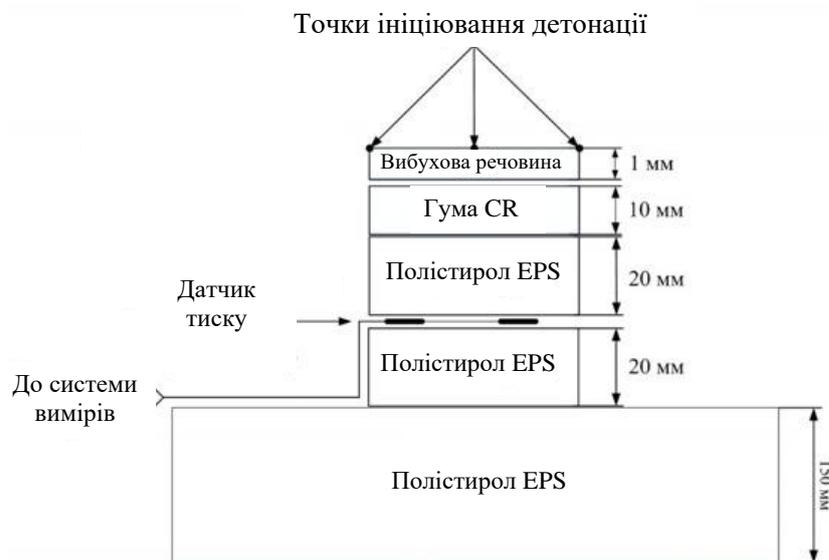


Рисунок 4.17 – Схема експериментальна

Фізико-механічні властивості вибухової речовини та гуми CR відповідають даним табл. 4.1 та 4.2. Для полістиролу EPS використовувалося рівняння стану у формі Мі-Грюнайзена у поєднанні з моделлю пластичності Мізеса. Фізико-механічні властивості полістиролу EPS представлені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Фізико-механічні властивості полістиролу EPS

Щільність, кг/м ³	C ₀ , м/с	S	Г	G, МПа	T, МПа
1,186	2598	1,516	0,97	775	134,5

На рис. 4.18 представлені результати чисельного моделювання ударно-хвильового навантаження експериментального складання за методом згладжених частинок (ANSYS Autodyn).

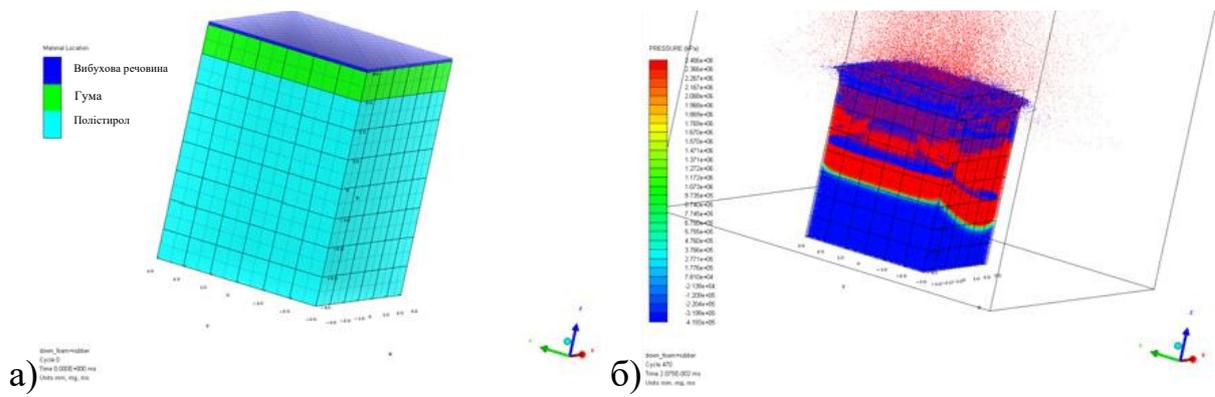
а) $t=0$ мкс; б) $t=20,75$ мкс

Рисунок 4.18 – Чисельна модель

На рисунках 4.19 та 4.20 представлені кінцево-елементні моделі експериментального складання та результати чисельного моделювання ударно-хвильового навантаження використанням сіткових методів (ABAQUS Explicit).

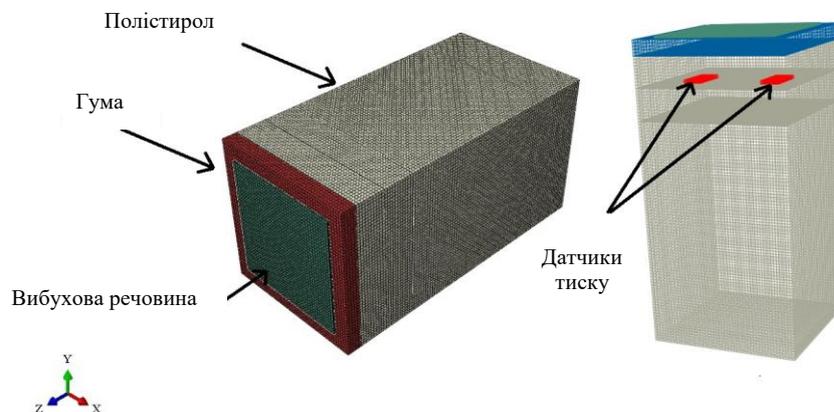


Рисунок 4.19 – Кінцево-елементна модель експериментального складання (сітковий метод)

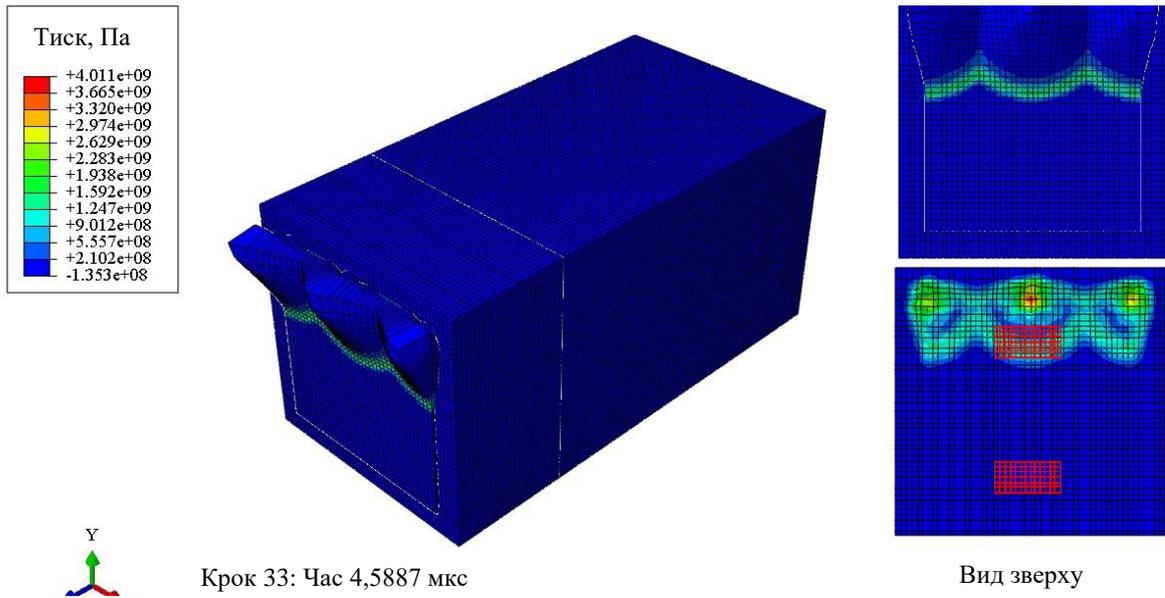


Рисунок 4.20 – Результати моделювання на момент часу $t=4,5$ мкс

На рис. 4.21 представлено порівняння амплітуди та профілю тиску, отриманих у розрахунках та експерименті для датчиків тиску P1 та P2.

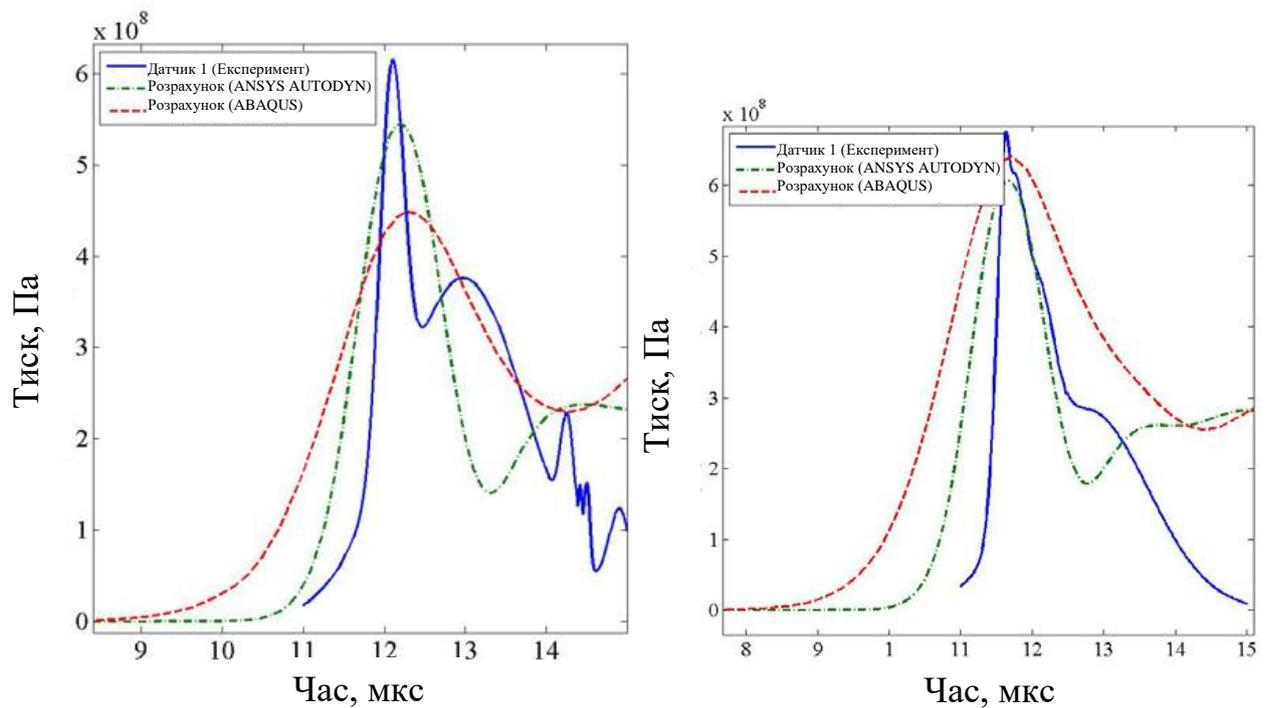


Рисунок 4.21 – Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних

У табл. 4.5 представлені величини питомих імпульсів, отриманих з експериментальних даних та обчислених у програмних пакетах. Теоретичні розрахунки із використанням (4.9) – $i_A=1304$ кг/м·с.

Як видно з графіків, параметри ударної хвилі в експерименті і при чисельному моделюванні, є близькими.

Таблиця 4.5 – Величини питомої імпульсу ($i_A=1304$ кг/м·с)

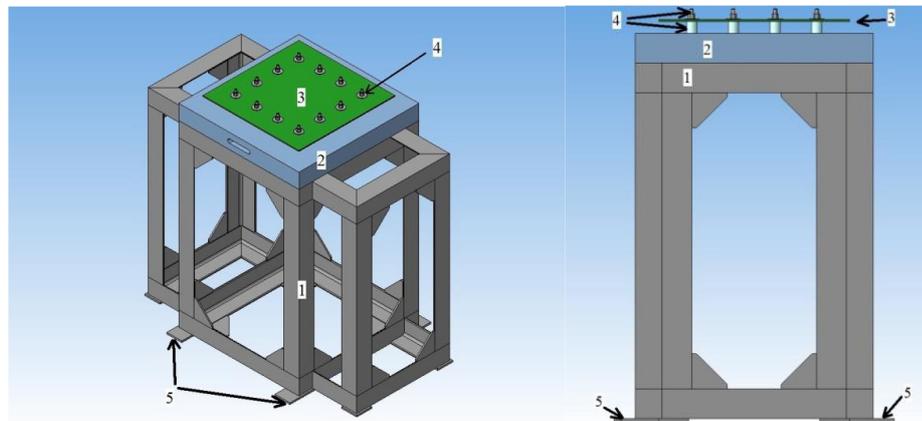
Датчик	Питомий імпульс, експеримент, кг/м·с ($t = 140$ мс)	Питомий імпульс, розрахунок (SPH), кг/м·с ($t = 140$ мс)	Питомий імпульс, розрахунок (МКЕ), кг/м·с ($t=140$ мс)
P1	843	883	1134
P2	887	1115	1718

В результаті проведених розрахункових та експериментальних робіт було отримано оцінку точності розробленої методики, що підтверджує можливість використання її для розрахунку імпульсних пристроїв та визначення результуючої сили, що надається навантажуваній поверхні стенду при використанні накладного заряду вибухової речовини.

5 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВІБРОУДАРНОЇ ДІЇ НА КОНСТРУКЦІЮ

5.1 Динамічна схема стану

Каркас стану виконаний із кутового сталевого профілю №10 завтовшки 8 мм та довжиною грані 100 мм. Висота каркасу 1000 мм. У процесі випробувань станд розташовується у вибуховій камері та кріпиться за вільну площину каркаса до напрямних прогонів в основі вибухової камери, з використанням болтового з'єднання типу "сухар" (рис. 5.1).



(а) – вид збоку; б) – вид спереду); 1 – каркас; 2 – нижня плита; 3 – верхня плита; 4 – елементи кріплення (втулки, шпильки); 5 – місця кріплення типу «сухар»

Рисунок 5.1 – Віброударний станд

На верхній поверхні каркаса розташовується основна сталева плита (квадратної форми у плані) з розмірами 800×800×100 мм. Верхня плита виготовлена з алюмінієвого листа товщиною 6 мм та довжиною грані 640 мм, і кріпиться до основної плити за допомогою 12 кріпильних елементів.

5.2 Модальний аналіз віброударного стану

Для проведення модального аналізу конструкції стану в програмному комплексі ABAQUS Standard побудовано кінцево-елементну модель стану

(рис. 5.2) з урахуванням фізико-механічних характеристик. У моделі використовувалися кінцеві елементи типу C3D8R. Крок сітки становив 0,01 м. Граничні умови задавалися як відсутність поступальних та обертальних ступенів свободи у місцях кріплення стенда до силової підлоги ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$). З'єднання елементів стенду один з одним, у місцях зварювання виконано з використанням з'єднання типу жорсткого обмеження (Tie constraint). Частотний аналіз здійснювався із застосуванням методу Ланцоша [6] у діапазоні частот від 100 до 2000 Гц, оскільки при побудові спектра удару початкова частота – 100 Гц, а злам на графіку ударного спектру лежить в діапазоні від 1000 до 2000 Гц.

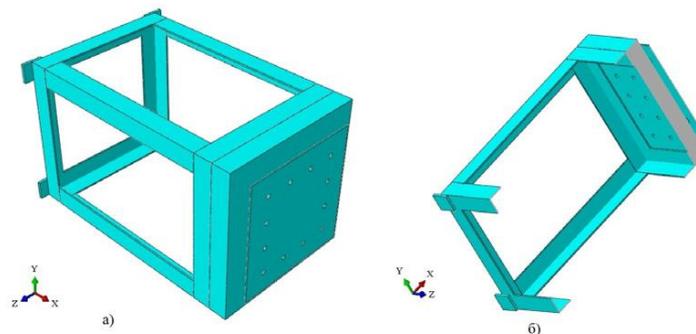


Рисунок 5.2 – Кінцево-елементна модель віброударного стенду для модального аналізу (а); розріз по площині XOY (б)

Результати модального аналізу наведено на рис. 5.3 – 5.9.

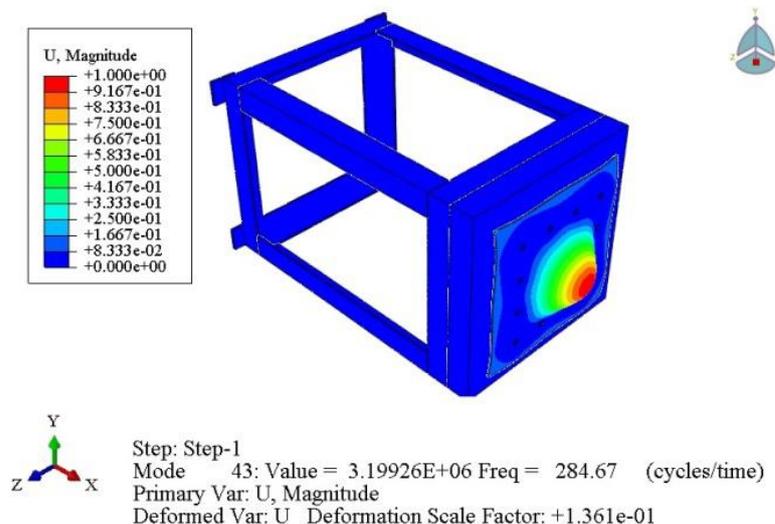
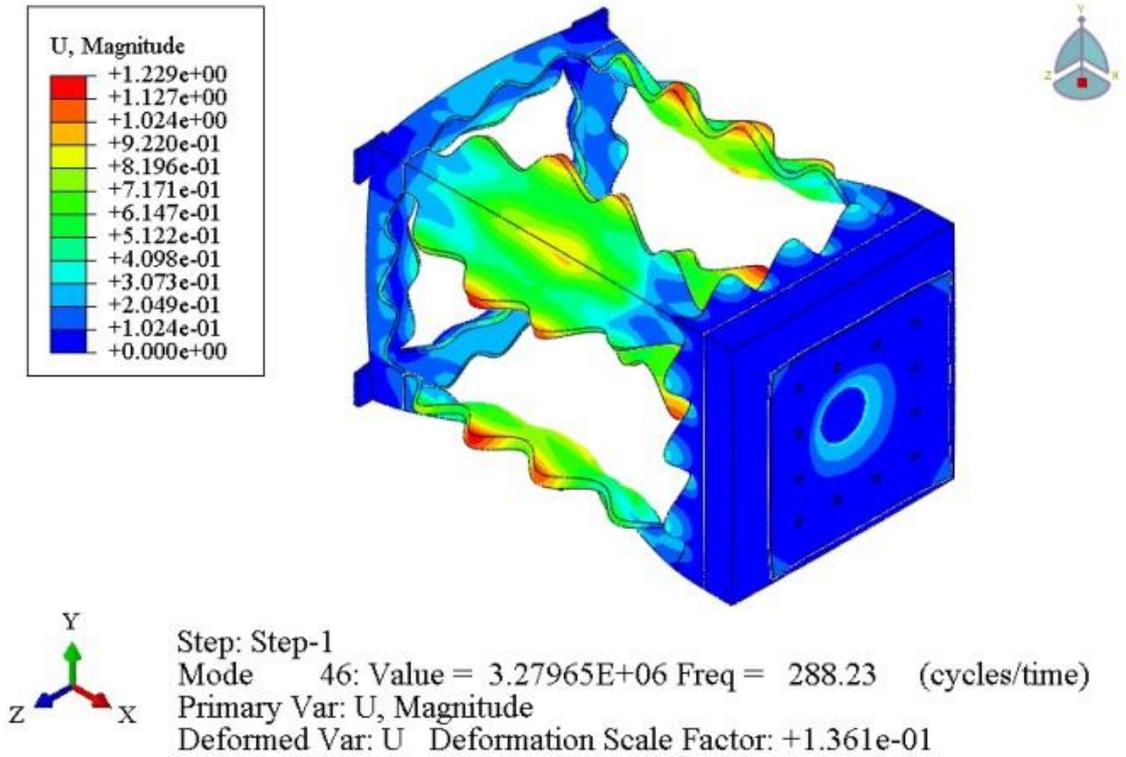
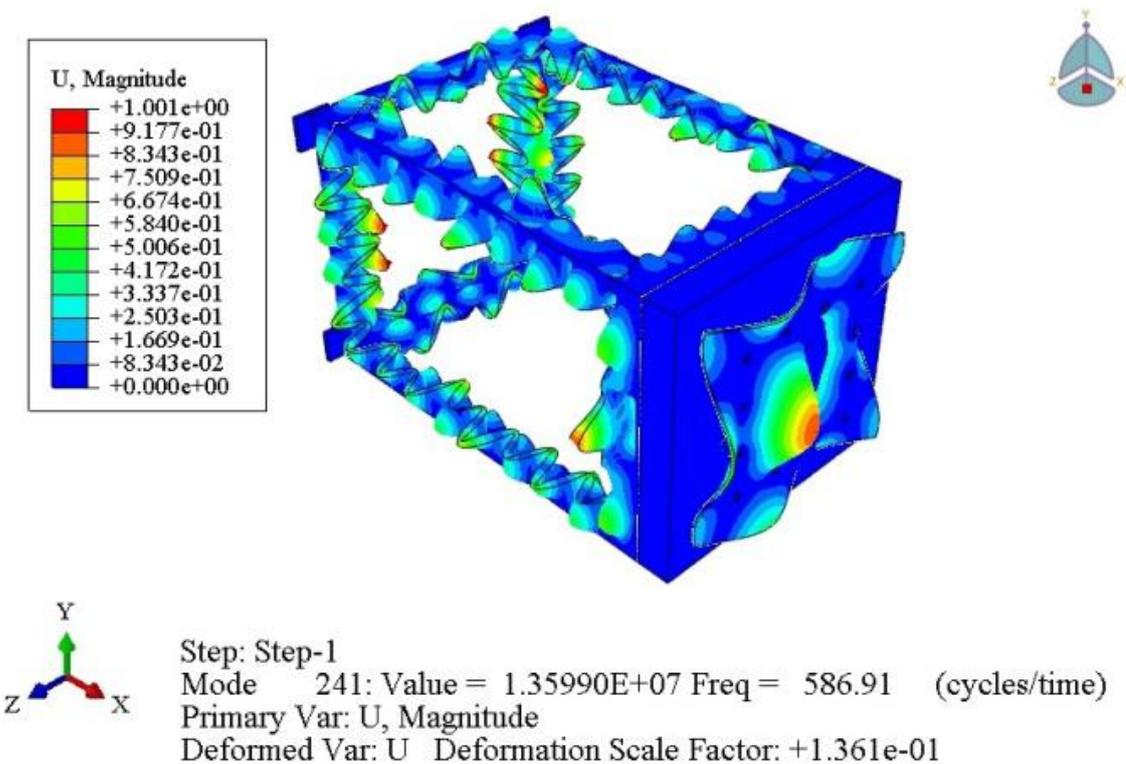
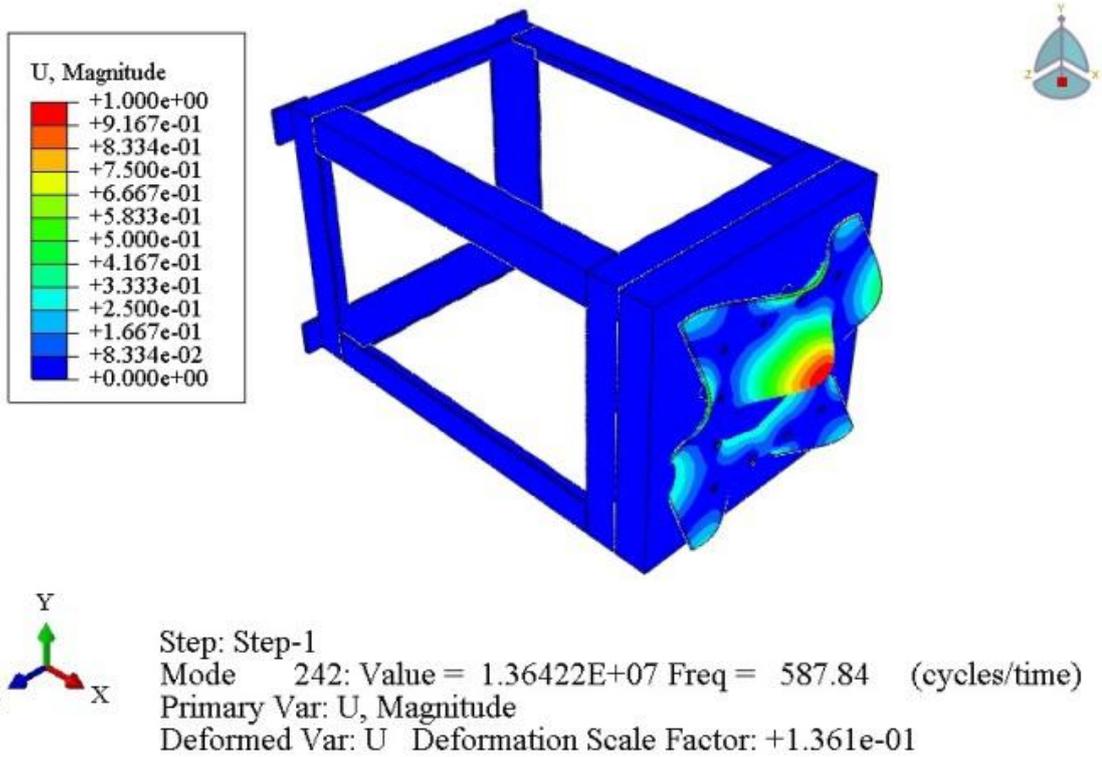
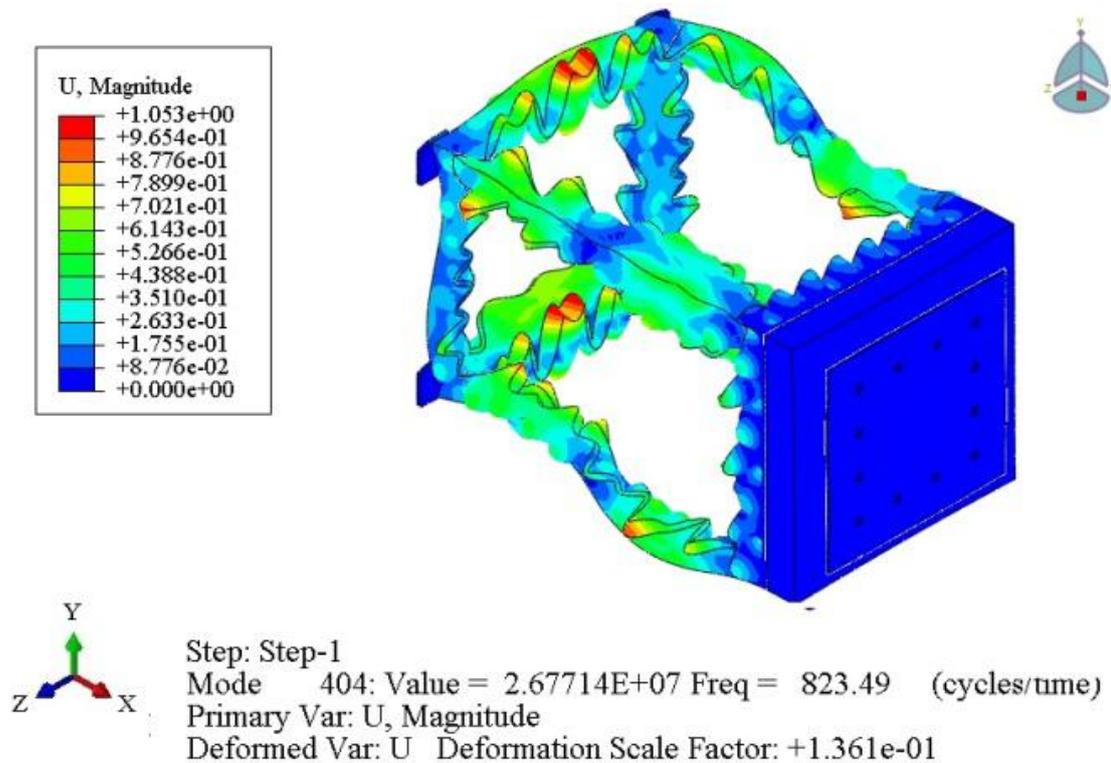
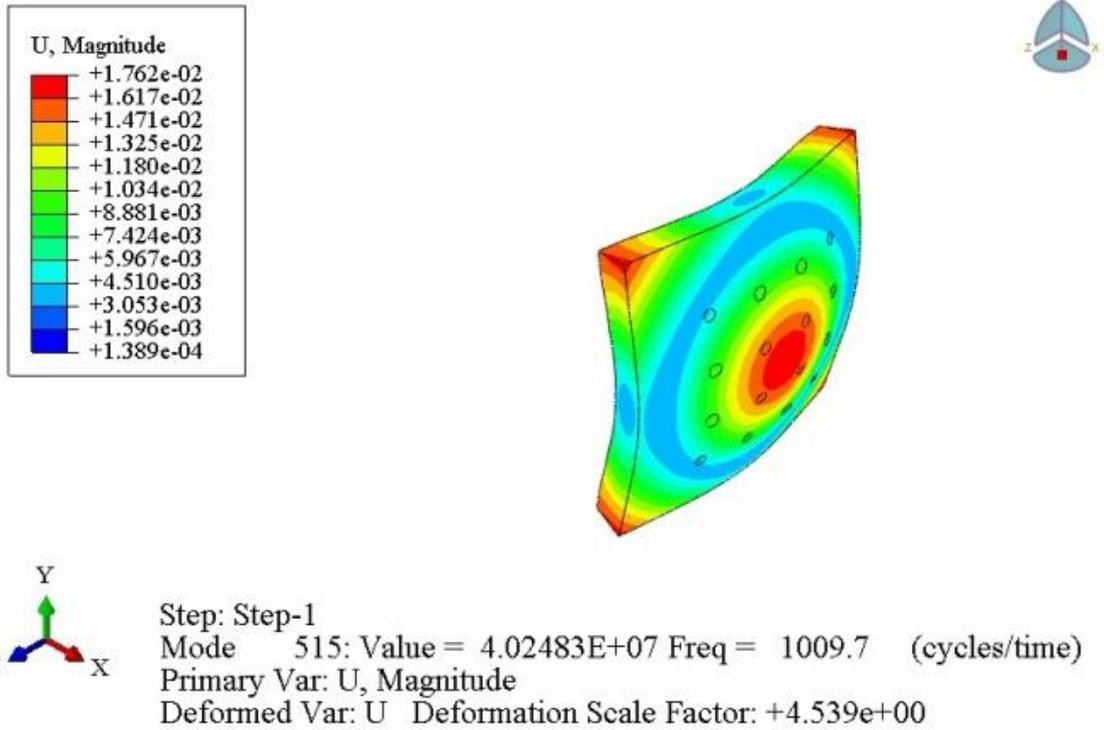
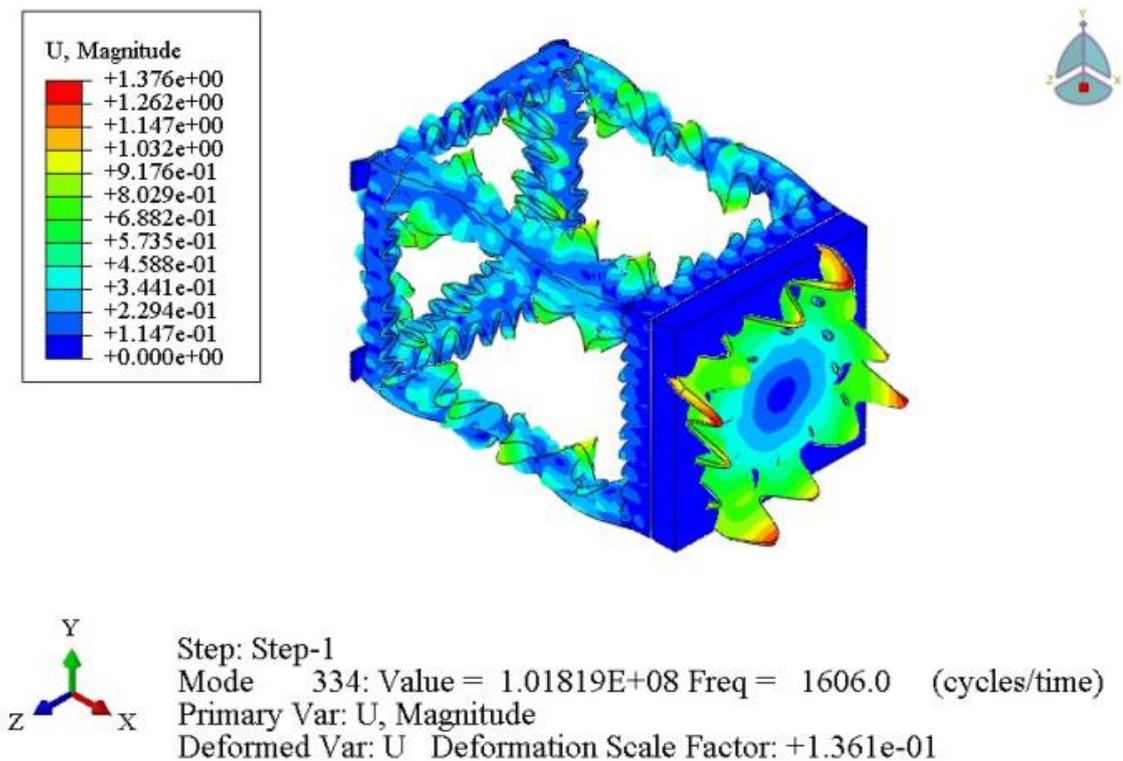


Рисунок 5.3 – Перший тон коливань верхньої плити $f=284,7$ Гц

Рисунок 5.4 – Перший тон коливань каркасу, $f=288,2$ ГцРисунок 5.5 – Другий тон коливань верхньої плити $f=586,9$ Гц

Рисунок 5.6 – Другий тон коливань верхньої плити $f=587,8$ ГцРисунок 5.7 – Другий тон коливань каркасу, $f=823,5$ Гц

Рисунок 5.8 – Перший тон коливань нижньої плити, $f=1009$ ГцРисунок 5.9 – Третій тон коливань каркасу, $f=1606,0$ Гц

Розглянемо графіки спектральних характеристик для сигналів з ортогональної розетки датчиків, розташованої в центрі верхньої плити (рис. 5.10), отриманих при навантаженні конструкції вздовж осі X з використанням джерела імпульсного навантаження (накладного заряду вибухової речовини).

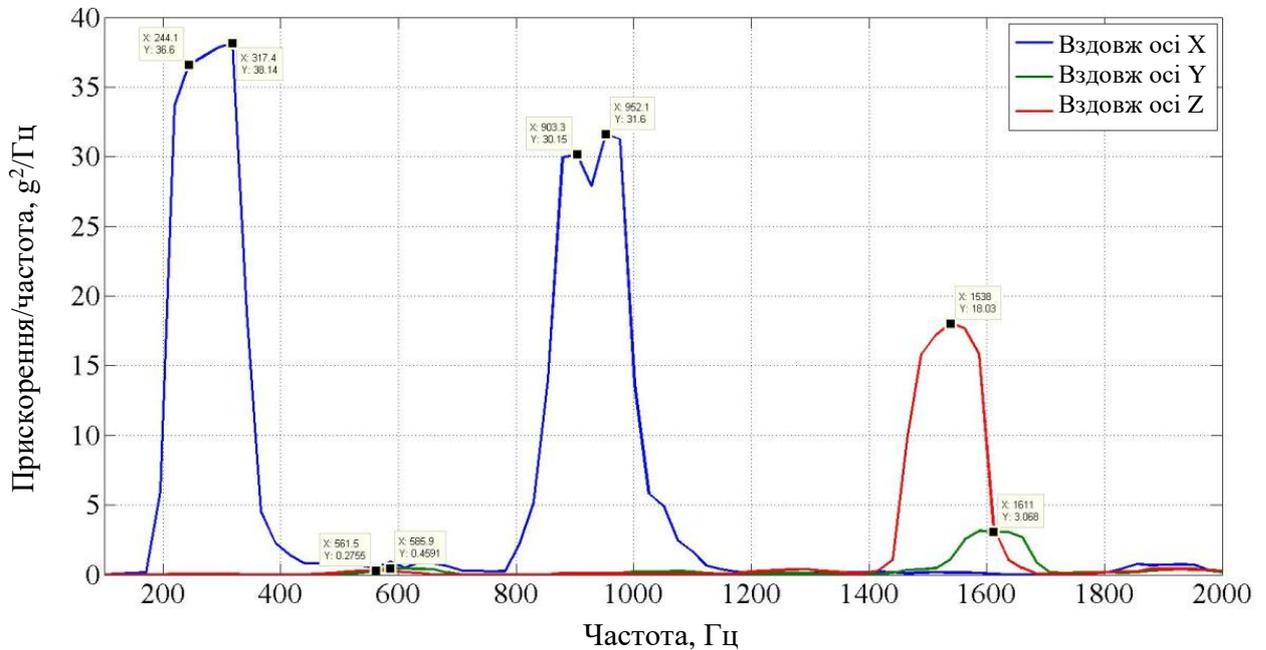


Рисунок 5.10 – Графіки спектральних характеристик прискорень

5.3 Чисельне моделювання віброударного навантаження

Моделювання віброударного навантаження здійснювалося з використанням методу кінцевих елементів. При побудові кінцево-елементної моделі було реалізовано 12 варіантів моделей стенду, що відрізняються різними елементами, що моделюють тривимірне тіло – верхню плиту стенду. Додатковою відмінністю була наявність або відсутність попередньо-напруженого стану від болтового з'єднання кінцево-елементної моделі стенду. Повний список характеристик розрахункових моделей представлений у табл. 5.1.

Алгоритм загального контакту не завжди є найнадійнішою реалізацією контактної взаємодії. Найчастіше явна вказівка поверхонь в алгоритмі контактних пар, особливо для оболонкових елементів, дозволяє забезпечити

більш надійне та чисельно правильне рішення. На рис. 5.11 наведена модель стяжки, де фрагмент верхньої плити (а) стягується з фрагментом нижньої плити (б) через сталеву шпильку, якій повідомляється осьове зусилля F_0 через багатоточковий зв'язок та сполучні елементи CONN3D2. Представлена розрахункова схема реалізована для двох типів контакту. За графіками на рис. 5.12 і 5.13 легко бачити різницю в обчислення контактної сили.

Таблиця 5.1 – Кінцево-елементні моделі, які використовуються при чисельному моделюванні

Параметри		Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6	Модель 7	Модель 8	Модель 9	Модель 10	Модель 11	Модель 12
Тип розрахункових елементів	Верхня плита	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	S4R	S4R	S4R	S4R	SC8R	SC8R	SC8R	SC8R
	Нижня плита	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R
	Каркас	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R
	Шпильки	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R
	Втулки	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R	C3D8R
Модель матеріалу	Верхня плита	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic
	Нижня плита	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
	Каркас	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
	Шпильки	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
	Втулки	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic	Elastic	Elastic	Plastic	Elastic
Моделі контактної взаємодії	Верхня плита-Втулки	General	General	General	General	Surface to Surface	Surface to Surface	Surface to Surface	Surface to Surface	General	General	General	General
	Нижня плита-Втулки	General	General	General	General	General	General	General	General	General	General	General	General
	Каркас-Нижня плита	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie	Tie
Болтове з'єднання	Попереднє затягування	+	+	+		+	+	+		+	+	+	
Багатоточковий зв'язок	Шпилька-Верхня плита	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam+CONN3D2	MPC-Beam
	Шпилька-Нижня плита	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam	MPC-Beam
	Датчик прискорення	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link	MPC-Link
Навантаження	Навантаження від детонатора	+				+				+			
	Навантаження від детонатора і вибухової речовини (маса 8 г)		+	+	+		+	+	+		+	+	+

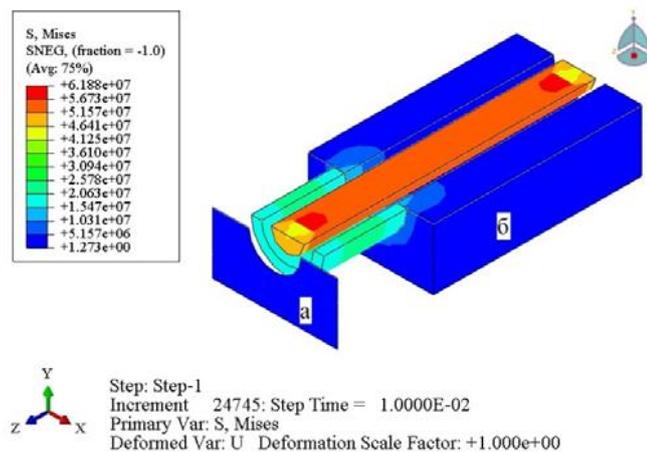


Рисунок 5.11 – Фрагмент конструкції стенду (вузол зв'язку верхньої та нижньої плити)

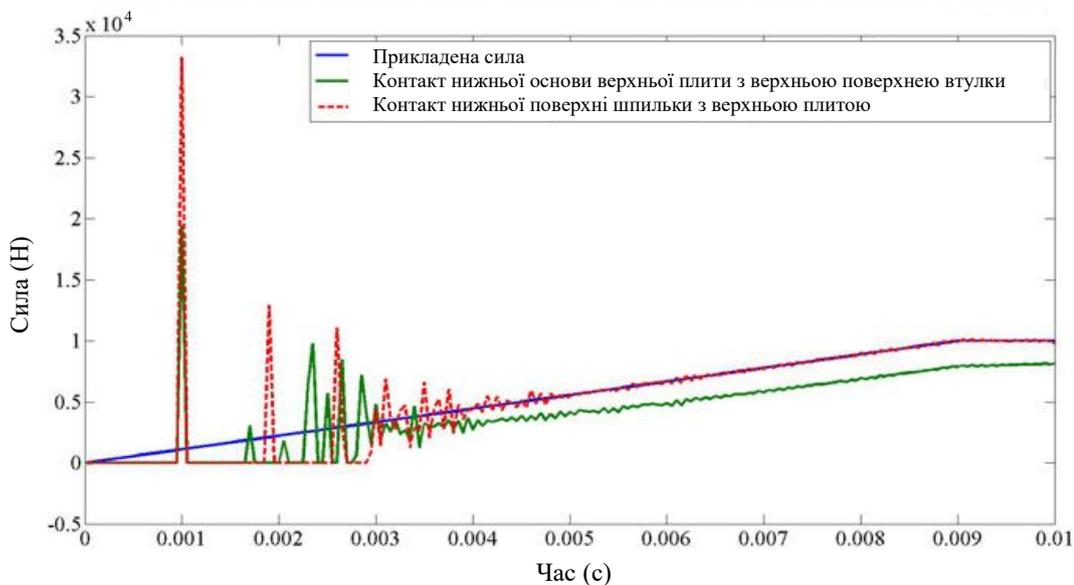


Рисунок 5.12 – Контактне зусилля у разі алгоритму спільного контакту

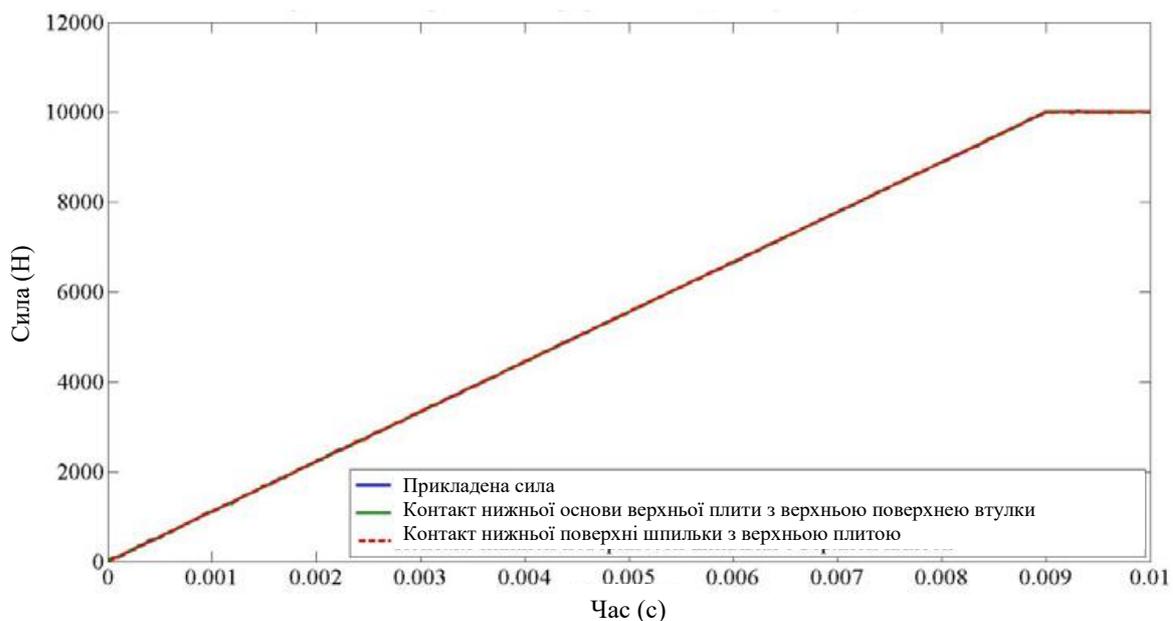


Рисунок 5.13 – Контактне зусилля у разі алгоритму контактних пар

5.4 Результати чисельного моделювання

Порівняння результатів експерименту та чисельного моделювання проводилося шляхом зіставлення ударних спектрів, як основною кількісною оцінкою, прийнятою на практиці при аналізі віброударних процесів. Якісні

характеристики подібності до отриманих результатів визначалися за результатами проведення статистичної обробки. При піротехнічних ударах екстремальні значення компонент вектора прискорень практично можна порівняти. Тому аналіз моделюваних штатних характеристик віброударного процесу доцільно провести для векторних результуючих прискорень; ці прискорення більш представницькі, оскільки їх величина не залежить від осей орієнтації датчиків розетки акселерометрів. На рис. 5.14–5.16 наведені покомпонентні спектри удару для випадку підриву детонатора. Еквівалентна маса вибухової речовини при чисельному моделюванні для зазначеного випадку становила 3 г. На рис. 5.17 представлений обчислений 3D вектор ударного спектру

$$UC_{3p} = \sqrt{UC_X^2 + UC_Y^2 + UC_Z^2}. \quad (5.1)$$

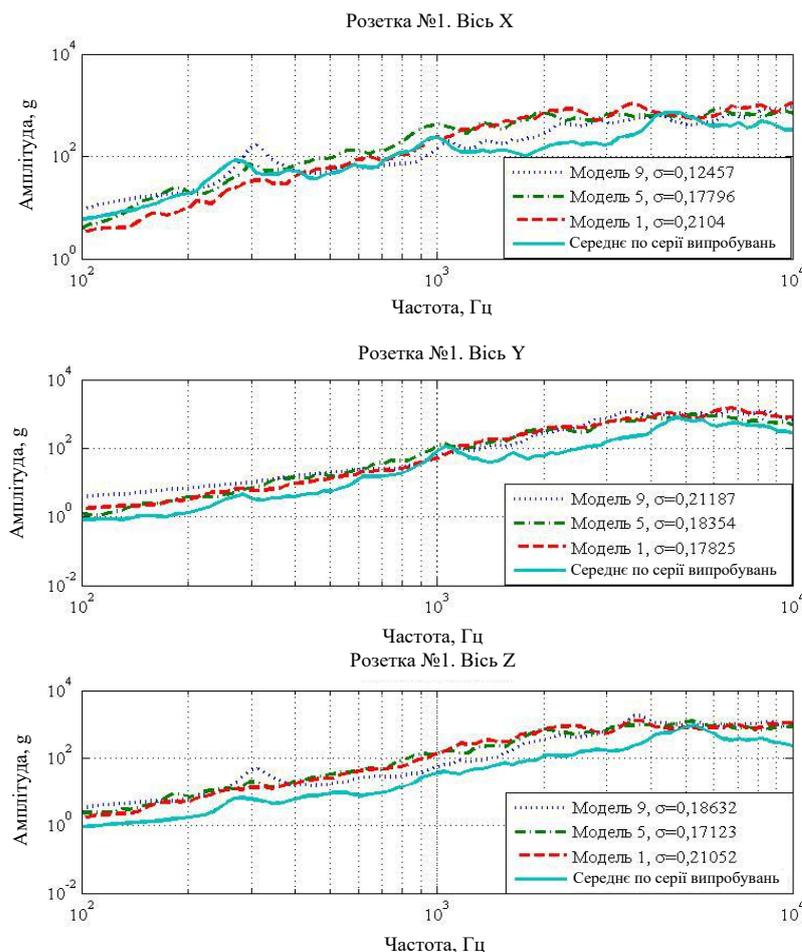


Рисунок 5.14 – Покомпонентні ударні спектри під час підриву детонатора (моделі 1, 5, 9, розетка №1)

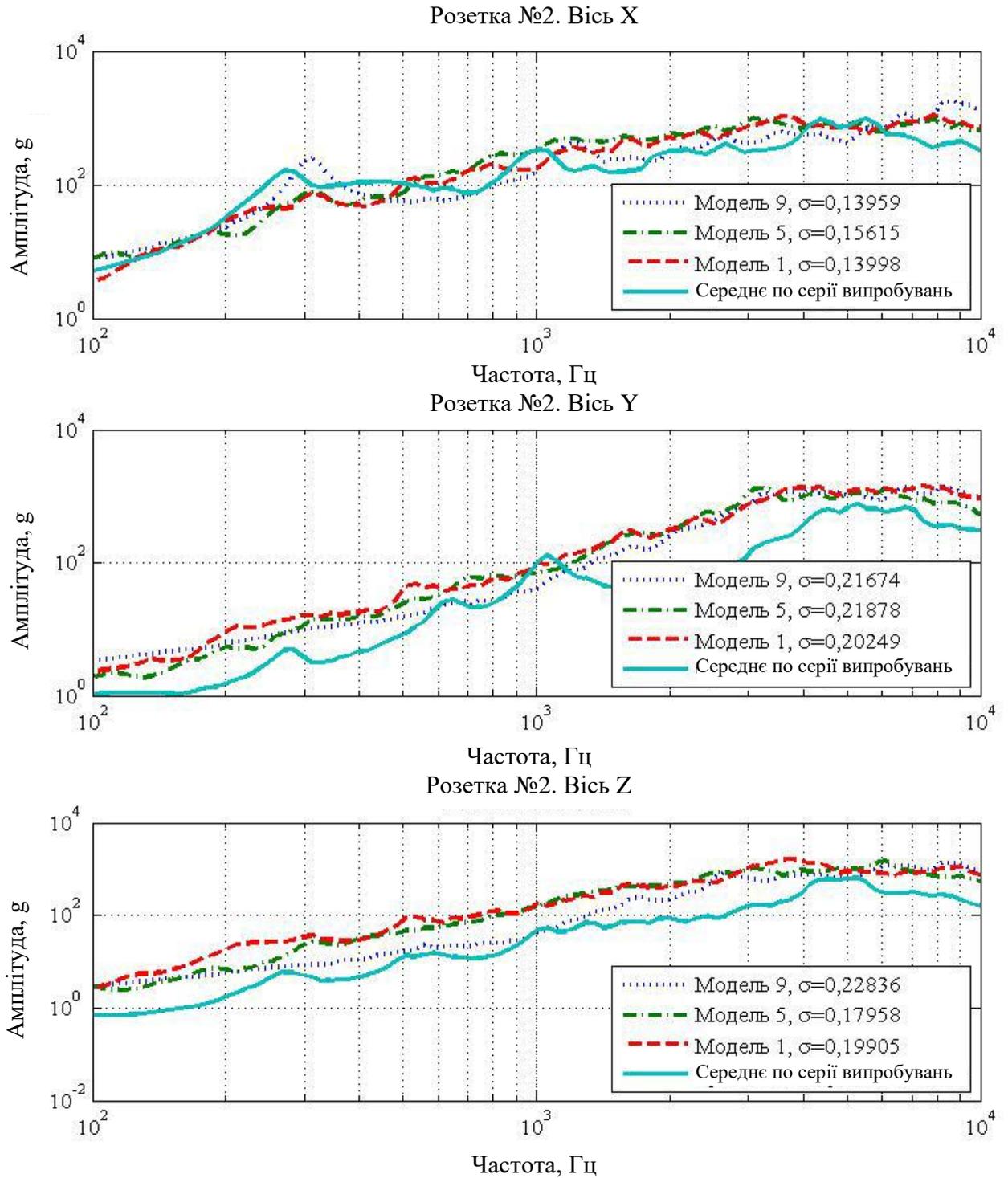


Рисунок 5.15 – Покомпонентні ударні спектри під час підриву детонатора (моделі 1, 5, 9, розетка №2)

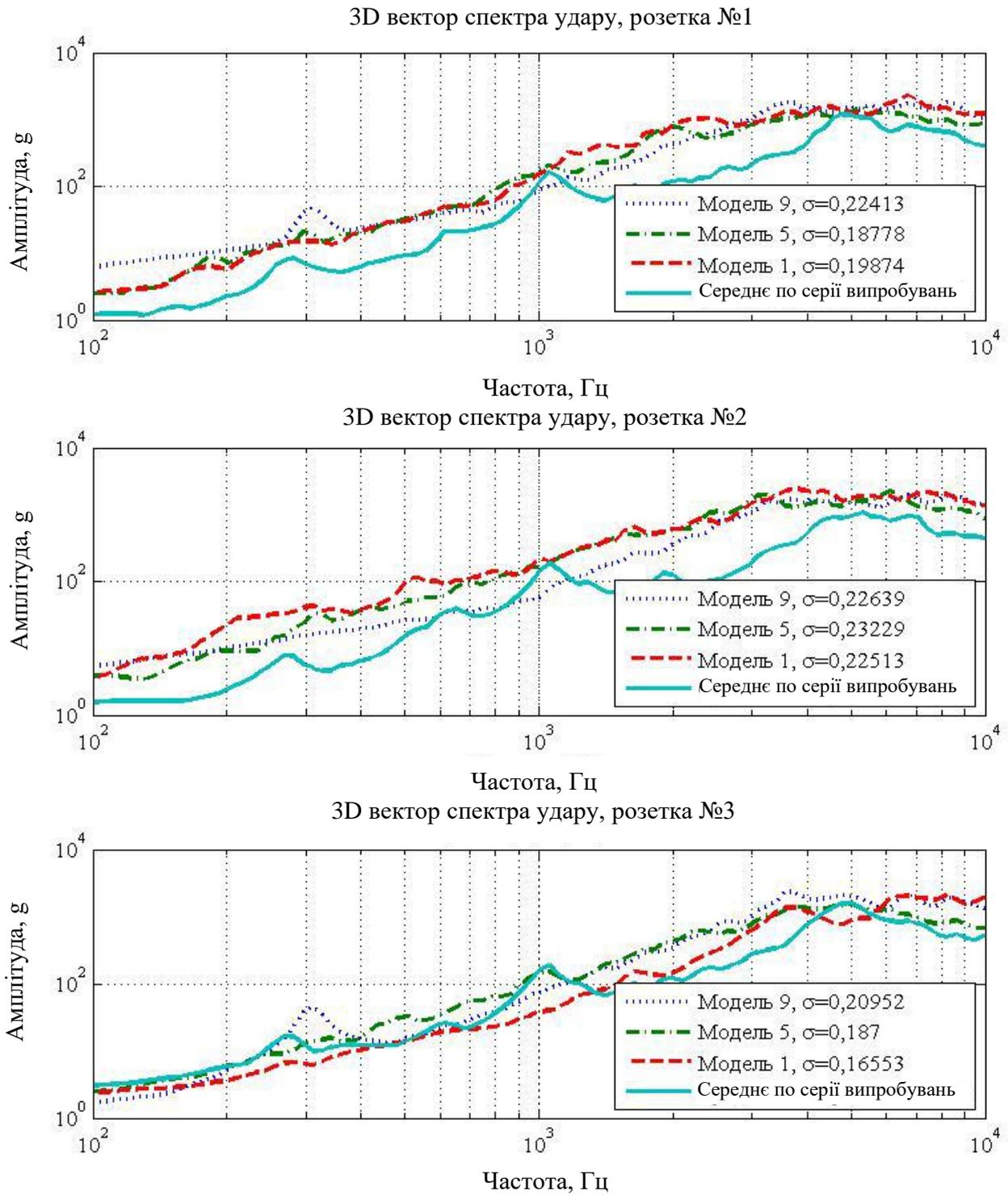


Рисунок 5.17 – 3D вектор віброударного навантаження при підриві детонатора (моделі 1, 5, 9)

Далі подано результати чисельного моделювання з урахуванням маси заряду та еквівалентної маси детонатора на прикладі математичних моделей 2,

6 та 10. За вихідне навантаження приймалося обчислене значення $F(t)$ для випадку заряду масою 8 г вибухової речовини.

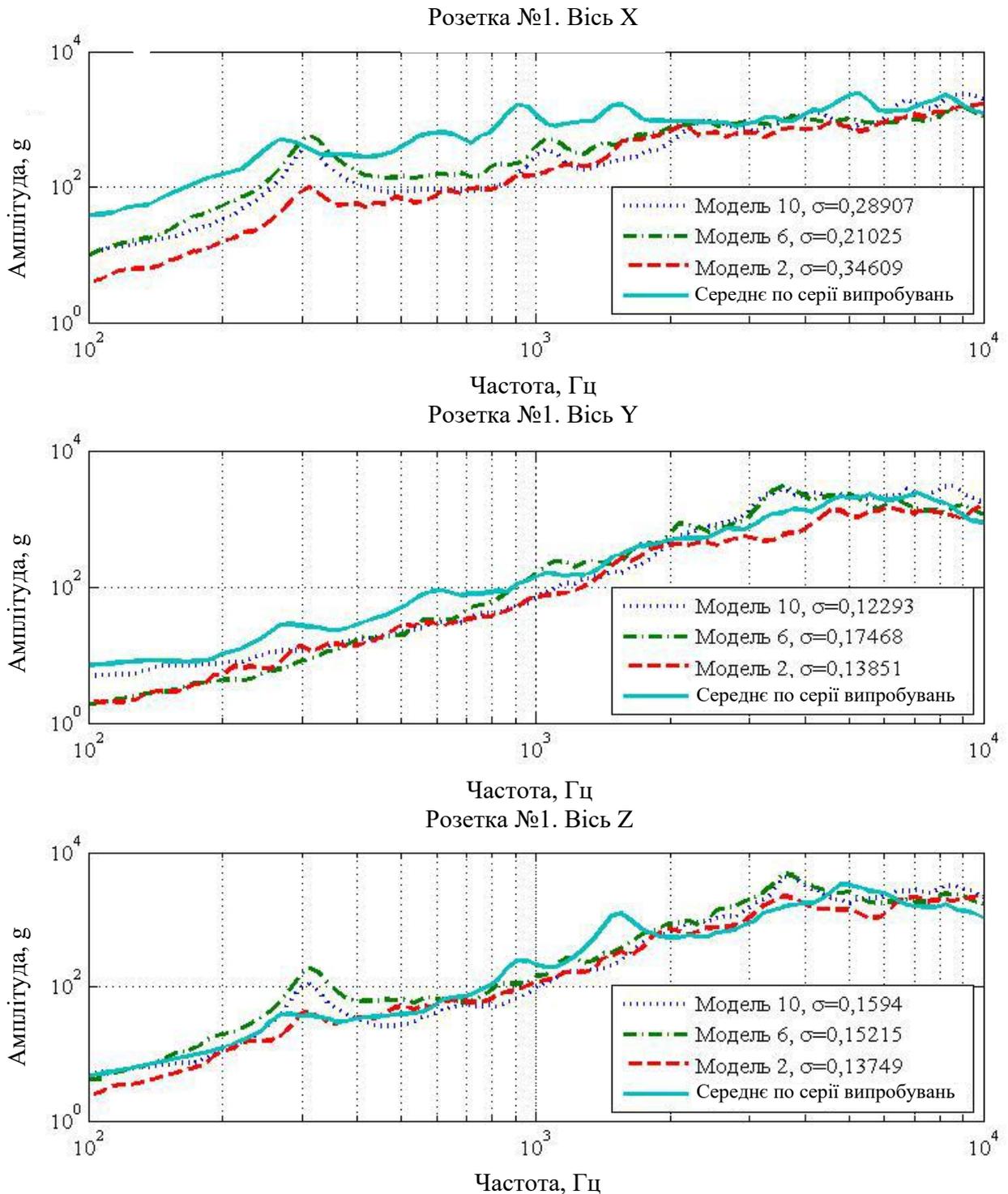


Рисунок 5.18 – Покомпонентні ударні спектри під час навантаження з урахуванням заряду детонатора (моделі 2, 6, 10, розетка №1)

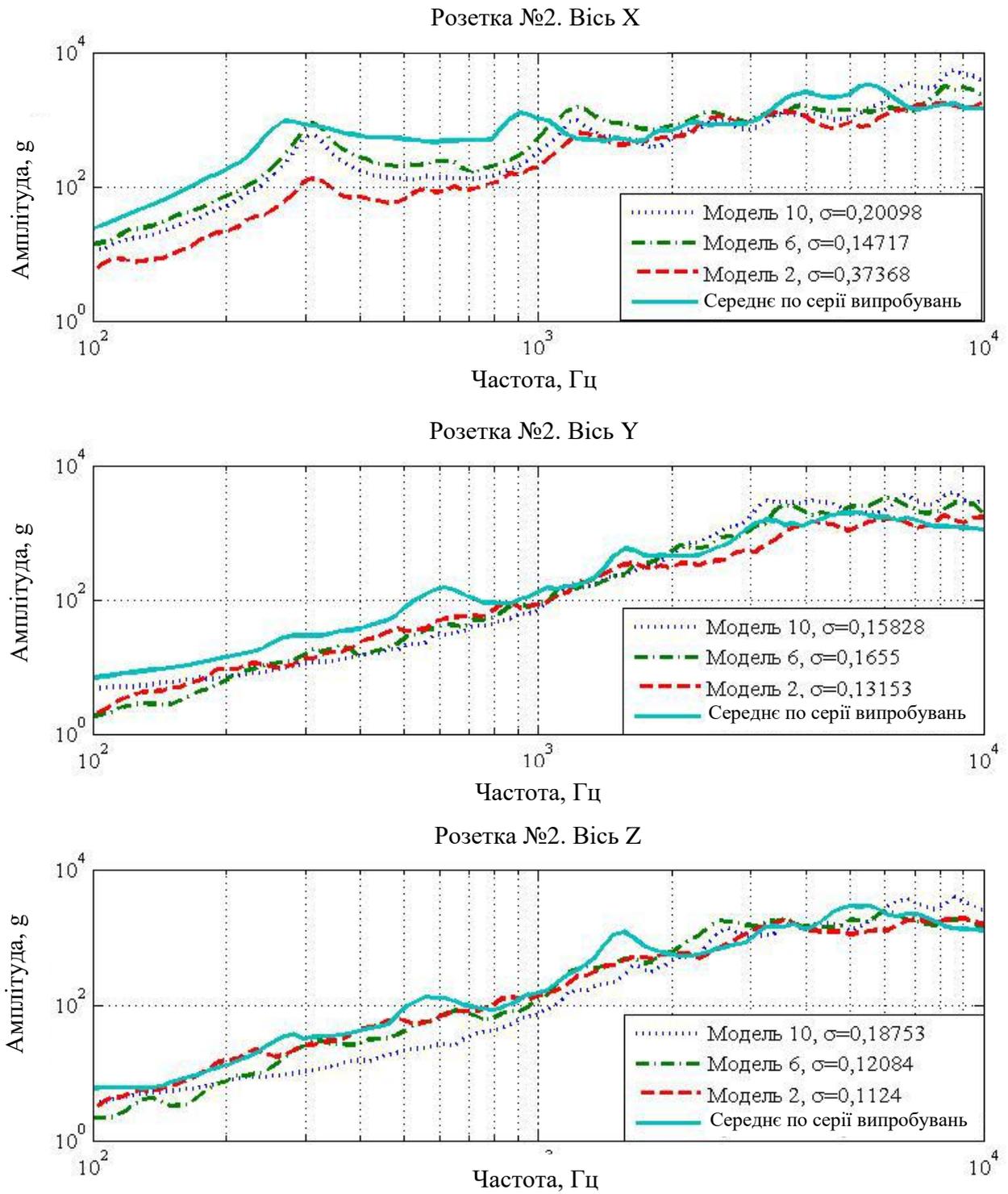


Рисунок 5.19 – Покомпонентні ударні спектри під час навантаження з урахуванням заряду детонатора (моделі 2, 6, 10, розетка №2)

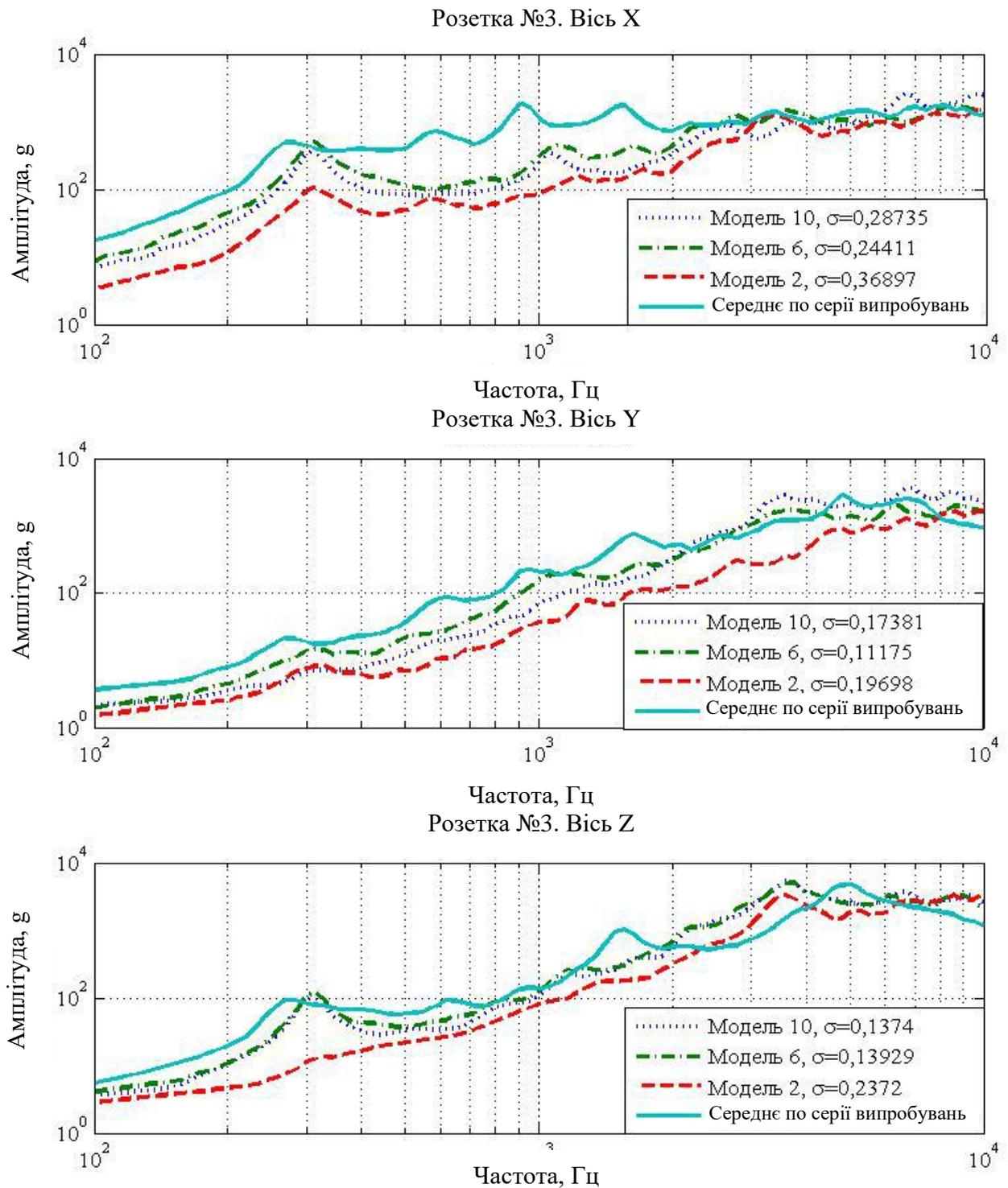


Рисунок 5.20 – Покомпонентні ударні спектри під час навантаження з урахуванням заряду детонатора (моделі 2, 6, 10, розетка №3)

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Основна мета проведення комерційного та технологічного аудиту є Удосконалення міцнісного відпрацювання елементів конструкцій і обладнання шляхом впровадження чисельного моделювання у практику імітації віброударного навантаження від спрацьовування піротехнічних засобів з використанням стаціонарних віброударних стендів та пристроїв локального навантаження вибухової дії.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету, кафедри галузевого машинобудування: Савуляк В. І., Шиліна О. П., Бакалець Д. В.

Для проведення технологічного аудиту було використано табл. 6.1 [1] в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

Таблиця 6.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів

Продовження табл. 6.1

5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 6.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

В таблиці 6.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 6.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Савуляк В. І.	Шиліна О. П.	Бакалець Д. В.
	Бали, виставлені експертами:		
1	2	2	2
2	2	3	2
3	3	3	3
4	4	3	4
5	3	3	3
6	3	4	3
7	1	2	1
8	3	3	3
9	3	3	3
10	2	1	1
11	4	3	4
12	1	2	1
Сума балів	СБ ₁ =30	СБ ₂ =31	СБ ₃ =30
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_1^3 СБ_i}{3} = \frac{30 + 31 + 30}{3} = 30,33$		

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 30,33 бали, і згідно з табл. 6.2, це вказує на середній рівень комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Користувачами результатів магістерської кваліфікаційної роботи є галузі, які використовують гірничовидобувну та дробильно-сортувальну техніку,

машини важкого машинобудування, будівельні та дорожні машини, обладнання в металургії, транспортну та морську техніку, машини та конструкції цивільної інфраструктури, енергетичне обладнання, сільськогосподарські машини, військову техніку.

Проведемо оцінку якості і конкурентоспроможності нової розробки порівняно з аналогом.

В якості аналога для розробки було обрано в'язкоеластичні шаруваті конструкції. Основними недоліками аналога є залежність властивостей від температури, чутливість до швидкості деформації (частоти коливань), нелінійна поведінка під великими навантаженнями, повзучість і релаксація напружень, складність прогнозування поведінки. Також до недоліків можна віднести вплив середовища та старіння, обмеження по силі зсуву і товщині шару, погана робота при багаторазових сильних ударах, потреба у ретельному з'єднанні шарів, обмежений ресурс.

У розробці дана проблема вирішується комбінацією матеріалів, в якості яких прийняті конструкційна сталь, полімер і гума.

Також система випереджає аналог за такими параметрами як робота в умовах сильних або багаторазових ударних імпульсів, інтенсивних вібрацій при великих амплітудах, високотемпературної експлуатації, умов активного старіння полімерів.

В таблиці 6.4 наведені основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки.

Проведемо оцінку якості продукції, яка є найефективнішим засобом забезпечення вимог споживачів та порівняємо її з аналогом.

Визначимо відносні одиничні показники якості по кожному параметру за формулами (6.1) та (6.2) і занесемо їх у відповідну колонку табл. 6.5.

$$q_i = \frac{P_{Hi}}{P_{Bi}} \quad (6.1)$$

або

Таблиця 6.4 – Основні параметри нової розробки та товару-конкурента

Показник	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)		
1	2	3	4	5
Коефіцієнт втрат	0.10–0.25	0.06–0.18	1,67	30%
Ефективність при одиничному імпульсі, %	40	70	1,75	25%
Робоча температура (робочий діапазон), °C	–20 ... +60	–50 ... +120	2,5	20%
Ресурс (при 10 циклах/день), років	1,5	6	4	15%
Масо-габарити, кг	80	100	1,25	10%

$$q_i = \frac{P_{Bi}}{P_{Hi}} \quad (6.2)$$

де P_{Hi} , P_{Bi} – числові значення i -го параметру відповідно нового і базового виробів.

$$q_1 = \frac{0,1}{0,06} = 1,67;$$

$$q_2 = \frac{70}{40} = 1,75;$$

$$q_3 = \frac{50}{20} = 2,5;$$

$$q_4 = \frac{6}{1,5} = 4;$$

$$q_5 = \frac{100}{80} = 1,25.$$

Відносний рівень якості нової розробки визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i \quad (6.3)$$

$$K_{\text{я.в.}} = 1,67 \cdot 0,3 + 1,75 \cdot 0,25 + 2,5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 1,25 \cdot 0,1 = 2,16$$

Відносний коефіцієнт показника якості нової розробки більший одиниці, отже нова розробка якісніший базового товару-конкурента.

Наступним кроком є визначення конкурентоспроможності товару. Конкурентоспроможність товару є головною умовою конкурентоспроможності підприємства на ринку і важливою основою прибутковості його діяльності.

Однією із умов вибору товару споживачем є збіг основних ринкових характеристик виробу з умовними характеристиками конкретної потреби покупця. Такими характеристиками найчастіше вважають нормативні та технічні параметри, а також ціну придбання та вартість споживання товару.

В табл. 6.5 наведено технічні та економічні показники для розрахунку конкурентоспроможності нової розробки відносно товару-аналога, технічні дані взяті з попередніх розрахунків.

Таблиця 6.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри нової розробки і товару-виробника

Показники	Варіанти	
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
1	2	3
<i>1. Нормативно-технічні показники</i>		
Коефіцієнт втрат	0.10–0.25	0.06–0.18
Ефективність при одиничному імпульсі, %	40	70
Робоча температура (робочий діапазон), °C	–20 ... +60	–50 ... +120
Ресурс (при 10 циклах/день), років	1,5	6
Масо-габарити, кг	80	100
<i>2. Економічні показники</i>		
Ціна придбання, грн	2 520 000	1 250 000

Загальний показник конкурентоспроможності інноваційного рішення (К) з урахуванням вищезазначених груп показників можна визначити за формулою:

$$K = \frac{I_{m.n.}}{I_{e.n.}}, \quad (6.4)$$

де $I_{m.n.}$ – індекс технічних параметрів; $I_{e.n.}$ – індекс економічних параметрів.

Індекс технічних параметрів є відносним рівнем якості інноваційного рішення. Індекс економічних параметрів визначається за формулою (6.5)

$$I_{e.n.} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Hei}}{\sum_{i=1}^n P_{Bei}}, \quad (6.5)$$

де P_{Hei} , P_{Bei} – економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

$$I_{e.n.} = \frac{1250000}{2520000} = 0,49;$$

$$K = \frac{2,16}{0,49} = 4,4.$$

Зважаючи на розрахунки, можна зробити висновок, що нова розробка буде конкурентоспроможніше, ніж конкурентний товар.

Розробка буде реалізована у важкому машинобудуванні. Розробкою будуть користуватись для нормативних вимог щодо відпрацювання віброударної міцності елементів конструкцій і деталей машин.

6.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи групуються за такими статтями: витрати на оплату праці, витрати на соціальні заходи, матеріали, паливо та енергія для науково-виробничих цілей, витрати на службові відрядження, програмне забезпечення для наукових робіт, інші витрати, накладні витрати.

1. Основна заробітна плата кожного із дослідників Z_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери визначається за формулою:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (6.6)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p \approx 21...23$ дні;

t – число робочих днів роботи дослідника.

Зведемо сумарні розрахунки до табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – Заробітна плата дослідника в науковій установі бюджетної сфери

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату грн.
Керівник	20000	952,4	5	4762
Інженер	25000	1190,5	20	23810
Всього				28571

2. Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (6.7)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{zm}}, \quad (6.8)$$

де M_m – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середня кількість робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Таблиця 6.7 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
1. Підготовчі	2	1	47,6	95,2
2. Монтажні	2	3	64,3	128,6
3. Інтеграційні	2	5	81,0	161,9
4. Налаштувальні	6	2	52,4	314,3
5. Випробувальні	4	4	71,4	285,7
Всього				985,7

3. Розрахунок додаткової заробітної плати робітників

Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які приймали участь в розробці нового технічного рішення розраховується як 10 - 12 % від основної заробітної плати робітників.

На даному підприємстві додаткова заробітна плата начисляється в розмірі 11% від основної заробітної плати.

$$Z_d = (Z_o + Z_p) * \frac{H_{\text{дод}}}{100\%} \quad (6.9)$$

$$Z_d = 0,11 * (28571 + 985,7) = 3251,29 \text{ (грн)}$$

4. Нарахування на заробітну плату $H_{зп}$ дослідників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою (6.10):

$$H_{зп} = (Z_o + Z_p + Z_d) * \frac{\beta}{100} \text{ (грн)} \quad (6.10)$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

Z_p – основну заробітну плату робітників, грн.;

β – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % .

Дана діяльність відноситься до бюджетної сфери, тому ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування буде складати 22%, тоді:

$$H_{зп} = (28571 + 985,7 + 3251,29) * \frac{22}{100} = 7217,85 \text{ (грн)}$$

5. Сировина та матеріали.

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{i=1}^n V_j \cdot C_{вj}, \quad (6.11)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

V_j – маса відходів j -го найменування, кг;

$C_{вj}$ – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

Проведені розрахунки зведені в табл. 6.8.

6. Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі вироби (K_e), які використовують при дослідженні нового технічного рішення, розраховуються, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (6.12)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

Проведені розрахунки бажано звести до табл. 6.9.

Таблиця 6.8 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, шт	Вартість витраченого матеріалу, грн
Алюмінієвий сплав 2024-T3	530	40	21200
Полістирол EPS	55	10	550
Гума CR	950	10	9500
Сталь C235JR	35	10000	350000
З врахуванням коефіцієнта транспортування			419375

Таблиця 6.9 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Втулка	1	420	420
Шпилька	1	67	67
Гвинти	12	100	1200
Болти	12	20	240
Шайби	12	15	180
Витратні матеріали	1	40	40
Всього з врахуванням транспортних витрат			2361,70

7. Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість програмного забезпечення розраховують за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{прог},i} \cdot C_{\text{прог},i} \cdot K_i, \quad (6.13)$$

де $C_{\text{прог}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог},i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу

тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

Отримані результати необхідно звести до табл. 6.10.

Таблиця 6.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
CAE / FEM (ANSYS, Abaqus)	1	420 000	420000
Всього з врахуванням налагодження			462000

8. Витрати на «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт»

Балансову вартість спецустаткування розраховують за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (6.14)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

Отримані результати необхідно звести до табл. 6.11

Таблиця 6.11 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пристрій локального навантаження	1	40 000	40000
Балістичне устаткування	1	60 000	60000
Імпульсний пристрій	1	30 000	30000
Всього з врахуванням транспортних витрат			143000

9. Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б.}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (6.15)$$

де $Ц_{б.}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до табл. 6.12.

Таблиця 6.12 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
1. Таль для переміщення та позиціонування важких елементів	4800	4	1	100,00
2. Зварювальний апарат	6200	4	1	129,17
3. Гайковерт	2000	4	1	41,67
4. Вимірювальні прилади	2300	4	1	47,92
5. Ріжучий та обробний інструмент	46000	4	1	958,33
Всього				1277,08

10. До статті «Паливо та енергія для науково-виробничих цілей» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються з технологічною метою на проведення досліджень.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{впi}}{\eta_i} \quad (6.16)$$

де W_{yt} – встановлена потужність обладнання на певному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

$K_{впi}$ – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{впi} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

Для написання магістерської роботи використовується персональний комп'ютер для якого розрахуємо витрати на електроенергію.

$$B_e = \frac{0,9 \cdot 180 \cdot 12,69 \cdot 0,5}{0,8} = 1284,86$$

11. Службові відрядження.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуються як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{св} = (З_о + З_р) * \frac{H_{св}}{100\%}, \quad (6.17)$$

де $H_{св}$ – норма нарахування за статтею «Службові відрядження».

$$B_{св} = 0,2 * (28571 + 985,7) = 5911,43$$

12. Накладні (загальновиробничі) витрати $B_{нзв}$ охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо. Накладні (загальновиробничі) витрати $B_{нзв}$ можна прийняти як (100...150)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$B_{нзв} = (З_о + З_р) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (6.18)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$B_{\text{нзв}} = (28571 + 985,7) \cdot \frac{100}{100\%} = 29557,14 \text{ грн}$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$B = 28571 + 985,7 + 3251,29 + 7217,85 + 419375 + 2361,7 + 462000 + 143000 + 1277,08 + 1284,86 + 5911,43 + 29557,14 = 1104793,50 \text{ грн}$$

Прогнозування загальних втрат ЗВ на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{B}{\eta}, \quad (6.19)$$

де η – коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то коефіцієнт $\beta = 0,7$.

Звідси:

$$ЗВ = \frac{1104793,50}{0,7} = 1578276,43 \text{ грн.}$$

6.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства $\Delta\Pi_i$, для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (6.20)$$

де ΔC_o – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

C_0 – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

l – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт $l = 0,8333$.

p – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. $p = 0,25$;

x – ставка податку на прибуток. У 2025 році – 18%.

Припустимо, що ціна зростає на 1000 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 7 шт., протягом другого року – на 9 шт., протягом третього року на 10 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 1 шт., а її ціна до 1 250 000 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 &= [1000 \cdot 1 + (1250000 + 1000) \cdot 7] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 1496098,5 \text{ грн.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_2 &= [1000 \cdot 1 + (1250000 + 1000) \cdot (7 + 9)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 3420263,2 \text{ грн.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_3 &= [1000 \cdot 1 + (1250000 + 1000) \cdot (7 + 9 + 10)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 5557302,7 \text{ грн.} \end{aligned}$$

6.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

Розрахуємо величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки.

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B, \quad (6.21)$$

де $k_{\text{інв}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо ($k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$).

$$PV = 2 \cdot 1578276,43 = 3156552,86$$

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій $E_{\text{абс}}$ згідно наступної формули:

$$E_{\text{абс}} = (ПП - PV) \quad (6.22)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (6.23)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.;

T – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;

t – період часу (в роках).

$$ПП = \frac{1496098,5}{(1 + 0,2)^1} + \frac{3420263,2}{(1 + 0,2)^2} + \frac{5557302,7}{(1 + 0,2)^3} = 6852921,49 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{абс}} = (6852921,49 - 3156552,86) = 3696368,64 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{\text{абс}} > 0$ то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій $E_{\text{в}}$. Для цього користуються формулою:

$$E_g = \sqrt[T_{жс}]{\left(1 + \frac{E_{abc}}{PV}\right)} - 1, \quad (6.24)$$

де $T_{жс}$ - життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_B = \sqrt[3]{1 + \frac{3696368,64}{3156552,86}} - 1 = 0,5 = 50\%$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (6.25)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05 \dots 0,1)$.

$$\tau_{\min} = 0,18 + 0,05 = 0,23$$

Оскільки $E_g > \tau_{\min}$ то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g} \quad (6.26)$$

$$T_{ок} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ роки}$$

Оскільки $T_{ок} \leq 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

ВИСНОВКИ

Розроблено та експериментально обґрунтовано комплекс методик для чисельного моделювання та прогнозування режимів випробувань виробів на вплив віброударних навантажень від спрацьовування піротехнічних засобів з використанням пристроїв локального навантаження та стаціонарних віброударних стендів.

1. Для визначення навантажень, що реалізуються в локальних пристроях навантаження та металевих установок вибухового типу, запропонований спосіб визначення невідомих констант, що входять до рівняння стану горіння пороху, за відомими значеннями енергетичних, фізичних та геометричних величин заряду, що дозволило розробити методику чисельного розрахунку.

2. Запропонований спосіб використаний для визначення необхідних констант у рівняннях стану пороху, що використовуються в пороховій балістичній установці та у пристроях локального навантаження індустриальними патронами. Проведено валідацію чисельної методики визначення динамічних навантажень, створених продуктами горіння порохів, на основі експериментів на пороховій балістичній установці. Експериментально підтверджено обґрунтованість застосування методики для прогнозування випробувальних режимів, що реалізуються пристроєм локального навантаження.

3. Розроблено методику чисельного моделювання віброударних процесів у типових конструктивних елементах, при імітації спрацьовування пірозасобів за допомогою пристрою локального навантаження вибухового типу. Методика дозволяє моделювати складові конструкції, що включають тонкостінні оболонки та конструктивні елементи, які при розрахунку короткочасних процесів деформації в близькій зоні від джерела навантаження повинні розглядатися як тривимірні.

4. Проведено валідацію розробленої чисельної методики на основі експериментів з ударного навантаження типової конструкції тонкостінного

корпусу із сполучним шпангоутом з використанням пристрою ударного навантаження. Експериментально обґрунтовано можливість застосування розробленої методики чисельного моделювання для розрахунку віброударного навантаження виробів на локальні віброударні навантаження від спрацьовування пірозасобів та прогнозування напружено-деформованого стану конструкцій під час експериментів з метою скорочення обсягу випробувань.

5. Для визначення навантажень, що реалізуються в стаціонарних віброударних стендах вибухового типу, розроблено методику чисельного моделювання режимів роботи джерел навантаження – імпульсних пристроїв основі вибухової речовини та демпфуючих елементів.

6. Проведено верифікацію методики чисельного моделювання роботи імпульсних пристроїв та розрахунку параметрів навантаження, що повідомляється імпульсним пристроєм пружної плити стенду, на основі відомих аналітичних рішень в одновимірному наближенні. Валідацію методики виконано з використанням проведених експериментів з визначення швидкості фронту та тиску в ударної хвилі, що проходить з демпфуючого пакету імпульсного пристрою до пружної плити стенду. Відповідність експериментальних та чисельних результатів підтверджує обґрунтованість запропонованої методики та можливість використання її визначення параметрів навантаження, створюваної вибуховим джерелом енергії віброударного стенду.

7. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на середній рівень комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 2 роки. Загальні витрати складають 1578276,43 грн. Прибуток за три роки складає 6852921,49 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Максименко, В., Барабаш, М., Костира, Н., & Бармін, І. (2024). Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК ліра-сапр. *Наука та будівництво*, 38(4). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>
2. Mennatullah Talaat, Ebtisam Yehia, Sherif A. Mazek, Magdy M.M. Genidi, Alaa G. Sherif. Finite element analysis of RC buildings subjected to blast loading. *Ain Shams Engineering Journal*. - Volume 13, Issue 4. – 2022. – 101689. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101689>.
3. Zhang, Peng, et al. Nylon/large-tow carbon fiber-wrapped yarn composites with improved interfacial shear and impact strength. *Polymer Composites*, 2025, 46.6: 5314-5324.
4. Abd-Elhamed, A.; Alkhatib, S.; Abdelfattah, A.M.H. Prediction of Blast-Induced Structural Response and Associated Damage Using Machine Learning. *Buildings* 2022, 12, 2093. doi.org/10.3390/buildings12122093
5. Javanshour, F., et al. Modulating impact resistance of flax epoxy composites with thermoplastic interfacial toughening. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 150: 106628.
6. Kiakojour, F., Tavakoli, H.R., Sheidaii, M.R. *et al.* Numerical analysis of all-steel sandwich panel with drilled I-core subjected to air blast scenarios. *Innov. Infrastruct. Solut.* **7**, 320 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00912-x>.
7. Li, Xin, et al. Deformation and failure of a novel fiber-metal hybrid lamina composite under quasi-static and impact loading. *Composites Science and Technology*, 2021, 216: 109067.
8. Taha, A.K., Gao, Z., Huang, D. *et al.* Numerical investigation of a new structural configuration of a concrete barrier wall under the effect of blast loads. *Int J Adv Struct Eng* **11** (Suppl 1), 19–34 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40091-019-00252-8>.

9. Chen, Jiwei; YAO, Weixing; LIN, Hanyu. Compressive fatigue response and reliability analysis of thermoplastic composite with low-velocity impact damage. *Polymer Composites*, 2021, 42.11: 5678-5690.
10. Shiqi, F., Xuanneng, G. Equivalent method for calculating internal blast loads in cylindrical lattice shell structure. *Sci Rep* **15**, 27656 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13066-4>.
11. Hyde, Alden, et al. Effects of microvoids on strength of unidirectional fiber-reinforced composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 187: 107844.
12. Dynamic certification and assessment of the buildings life cycle under regular explosive impacts / O.M. Trofymchuk, I.I. Kaliukh, V.A. Dunin, S.Y. Kyrash // Системні дослідження та інформаційні технології, ІПСА (IASA), 2022, № 4. С. 100-118.
13. Shin, Ju Hwan Jay; ZHOU, Min. Piezoelectric response of energetic composites under an electrostatic excitation. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129.24.
14. Математична модель вибуховоударного навантаження зміцнюваних елементів гірничого устаткування / В. В. Драгобецький [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії = Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 12 (1337). – С. 20-26.
15. Várdai, Róbert, et al. Impact modification of fiber reinforced polypropylene composites with flexible poly (ethylene terephthalate) fibers. *Polymer International*, 2021, 70.9: 1367-1375.
16. Anas, S.M.; Al-Dala'ien, R.N.; Benzerara, M.; Al-Ezzi, M.J. Computational and Experimental Insights into Blast Response and Failure Mechanisms of Square, Rectangular and Circular Reinforced Concrete Columns: A State-of-

- the-Art Review. *Buildings* 2025, 15, 3928. doi. org / 10.3390 / buildings 15213928.
- 17.Raut, Nikhil P.; Kolekar, A. B.; Gombi, S. L. Methods of damage detection on composites under low velocity impact. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27: 2823-2827.
- 18.Stanisław Dobrociński, Leszek Flis. NUMERICAL SIMULATIONS OF BLAST LOADS FROM NEAR-FIELD GROUND EXPLOSIONS IN AIR. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 37, No. 4, 2015. DOI: 10.1515/sgem-2015-0040
- 19.Joshi, Ashish; Mishra, Ashish; Saxena, Vikas Kumar. Impact response and energy absorption mechanisms of UHMWPE fabric and composites in ballistic applications: A comprehensive review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 108314.
- 20.Luca Viale, Alessandro Fasana. Progress in pyroshock simulation for qualification tests: A systematic literature review. *Progress in Aerospace Sciences*, Volume 157, 2025, 101126. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2025.101126>.
- 21.Zeng, Chengjun, et al. 4D printed continuous fiber reinforced shape memory polymer composites with enhanced mechanical properties and shape memory effects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 180: 108085.
- 22.Wang, X.; Liu, W.; Ding, J.; Sun, Y.; Dang, Y. Pyroshock Response Prediction of Spacecraft Structure in Wide Frequency Domain Based on Acceleration FRF. *Aerospace* 2022, 9, 54. <https://doi.org/10.3390/aerospace9020054>.
- 23.Firooz, Soheil; Steinmann, Paul; Javili, Ali. Homogenization of composites with extended general interfaces: comprehensive review and unified modeling. *Applied Mechanics Reviews*, 2021, 73.4: 040802.
- 24.Hongda Zhao, Wei Liu, Jifeng Ding, Yi Sun, Xiao Li, Yizhi Liu. Numerical study on separation shock characteristics of pyrotechnic separation nuts. *Acta*

- Astronautica*, Volume 151, 2018, pages 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.07.040>
25. Lin, Jia-Xiang, et al. Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers. *Journal of building engineering*, 2020, 29: 101097.
26. Wang J, Xiong S, Wen Y, Wang Y. Numerical simulation of actuation processes and decoupling pyroshock of a pressure cartridge-type pin puller. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2023;42(3):1363-1378. doi:10.1177/14613484231161422.
27. Zeng, Wei, et al. Investigation on the dynamic behavior of composite gradient double-arrow auxetic structure under local impact load. *Polymer Composites*, 2022, 43.5: 3068-3084.
28. Wang, X.; Gao, Z.; Cheng, D.; Deng, X.; Yu, T.; Qin, Z.; Chu, F. Research on a Honeycomb Structure for Pyroshock Isolation at the Spacecraft–Rocket Interface. *Aerospace* 2024, 11, 756. <https://doi.org/10.3390/aerospace11090756>.
29. Elamin, Mohammed; Li, Bing; Tan, K. T. Compression after impact performance of carbon-fiber foam-core sandwich composites in low temperature arctic conditions. *Composite Structures*, 2021, 261: 113568.
30. Stetsiuk, Y. (2019). Development of mathematical model of localization of a small explosive object with the help of a specialized protective device. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(2(47)), 26–30. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.173640>.
31. Bulut, Mehmet, et al. Mechanical and dynamic properties of basalt fiber-reinforced composites with nanoclay particles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45: 1017-1033.
32. Wang W, Huang K, Zhao F. Simulation of pyroshock environment and effect rules of shock response spectrum. *The Aeronautical Journal*. 2023; 127 (1316): 1659-1675. doi:10.1017/aer.2023.22

33. Wang, Shuai, et al. Strength-ductility synergy of in-situ TiB/Ti6Al4V composites with tailored hierarchical TiB distributions. *Ceramics International*, 2022, 48.23: 35069-35075.
34. Yalçinkaya, T.; Gürsoy, B. Numerical Validation of a Pyroshock Test System and Application to Qualification Tests. *Aerospace* 2022, 9, 400. <https://doi.org/10.3390/aerospace9080400>
35. Ye, Jia-Yu; Zhang, Lu-Wen. Damage evolution of polymer-matrix multiphase composites under coupled moisture effects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 388: 114213.
36. Wang, J., Xiong, S., Wen, Y., & Wang, Y. (2023). Numerical simulation of actuation processes and decoupling pyroshock of a pressure cartridge-type pin puller. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 42(3), 1363-1378. <https://doi.org/10.1177/14613484231161422>.
37. Haridharan, M. K., et al. Impact response of two-layered grouted aggregate fibrous concrete composite under falling mass impact. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120628.
38. Wang, X.; Liu, W.; Ding, J.; Sun, Y.; Dang, Y. Pyroshock Response Prediction of Spacecraft Structure in Wide Frequency Domain Based on Acceleration FRF. *Aerospace* 2022, 9, 54.
39. Li, Shengpeng, et al. Effect of Composite-Region Fraction and TiCp Content on the Mechanical Properties of H13 Steel Matrix Composites with Honeycomb Architecture. *Materials*, 2025, 18.5: 1128.
40. Xixiong Wang, Zhaoye Qin, Jifeng Ding, Fulei Chu. Finite element modeling and pyroshock response analysis of separation nuts. *Aerospace Science and Technology*, Volume 68, 2017, pages 380-390. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.05.028>.
41. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад.: В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 42 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОУДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

д. т. н., професор Леонід ПОЛІЩУК,

(підпис)

« ____ » _____ 2025

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Моделювання віброударного навантаження конструкцій

Розробив студент

Спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

Павло БЛАГОДІР

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник: д. т. н., професор

Роман СИВАК

1 Найменування і область застосування

Найменування – методики чисельного моделювання віброударних навантажень на конструкції та обладнання при їх відтворенні за допомогою стаціонарних віброударних стендів та пристроїв локального навантаження вибухової дії; використання методик на практиці скоротить витрати на проведення налагоджувальних випробувань, підвищить достовірність та інформативність експериментальних результатів.

2 Підстава для виконання роботи

Підставою для розробки даної МКР є індивідуальне завдання на магістерську кваліфікаційну роботу та наказ ректора по ВНТУ про закріплення тем.

3 Мета і призначення дослідження

Мета: удосконалення міцнісного відпрацювання виробів машинобудування шляхом впровадження чисельного моделювання у практику імітації віброударного навантаження від спрацьовування піротехнічних засобів з використанням стаціонарних віброударних стендів та пристроїв локального навантаження вибухової дії.

Призначення розробки – методики можуть бути використані при розробленні нормативних вимог щодо відпрацювання віброударної міцності виробів.

4 Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

4.1 Максименко, В., Барабаш, М., Костира, Н., & Бармін, І. (2024). Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК ліра-сапр. *Наука та будівництво*, 38(4). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>

4.2 Mennatullah Talaat, Ebtisam Yehia, Sherif A. Mazek, Magdy M.M. Genidi, Alaa G. Sherif. Finite element analysis of RC buildings subjected to blast loading.

Ain Shams Engineering Journal. - Volume 13, Issue 4. – 2022. – 101689.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101689>.

4.3 Zhang, Peng, et al. Nylon/large-tow carbon fiber-wrapped yarn composites with improved interfacial shear and impact strength. *Polymer Composites*, 2025, 46.6: 5314-5324.

4.4 Abd-Elhamed, A.; Alkhatib, S.; Abdelfattah, A.M.H. Prediction of Blast-Induced Structural Response and Associated Damage Using Machine Learning. *Buildings* 2022, 12, 2093. doi.org/10.3390/buildings12122093

4.5 Javanshour, F., et al. Modulating impact resistance of flax epoxy composites with thermoplastic interfacial toughening. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 150: 106628.

5 Вихідні дані для розробки:

1	Кутник, мм	100x100x8
2	Висота каркаса, мм	1000
3	Плита нижня, мм	800x800x100
4	Плита верхня, мм	640x640x6
5	Товщина шару полістиролу, мм	13
6	Товщина шару гуми, мм	10
7	Товщина шару листової вибухової речовини, мм	1,5
8	Товщина оболонки ємності, мм	$4 \cdot 10^{-3}$
9	Матеріал	полістирол EPS, гума CR, сталь C235JR, алюмінієвий сплав 2024-T3

5.1 Технічні вимоги:

- перенавантаження – 1000...10000g;
- частота – 3...100 кГц;

- швидкість ударника – 60 м/с;
- ближня зона дії вибухової речовини – до 30 мм;
- середня зона дії вибухової речовини – до 30...600 мм;
- дальня зона дії вибухової речовини – від 600 мм

5.2 Вимоги до надійності: довговічність – не менше 10 тис. год; безвідмовність – напрацювання на відмову – 1 тис. год; збереженість – повинна забезпечуватися працездатність деталі в режимі очікування, роботи, консервації; ремонтпридатність – деталь повинна відповідати вимогам експлуатації.

5.3 Вимоги до технологічності розробки, виробництва і експлуатації – повинна гарантувати надійну і безпечну роботу обладнання, витримувати інтенсивні динамічні навантаження.

5.4 Вимоги до рівня уніфікації і стандартизації, вимоги до використання стандартних, уніфікованих і запозичених складальних одиниць і деталей при розробці, показники рівня уніфікації – по можливості під час відпрацювання деталей машин і елементів конструкцій на відбродарні навантаження використовувати уніфіковані деталі, стандартні вироби та загальнодоступні матеріали і речовини.

5.5 Вимоги безпеки життєдіяльності – забезпечується безпека під час монтажу і ремонті. Допустимі рівні вібраційних і шумових навантажень, допустимі випаровування робочої рідини у відповідності з санітарними нормами. Повинні бути розроблені заходи, що забезпечують технічну безпеку під час монтажу, експлуатації і ремонті пристрою.

5.6 Конструкція повинна відповідати естетичним і ергономічним вимогам, повинна бути зручною в обслуговуванні та управлінні.

5.7 Матеріали, що використовуються для деталей слід вибирати відповідно до рекомендацій.

5.8 Умови експлуатації, вимоги до технічного обслуговування і ремонту:

–умови експлуатації, при яких повинно забезпечуватися використання продукції з заданими технічними показниками – продукція призначена для використання у середньоширотних кліматичних умовах;

–час підготовки продукції до використання після транспортування і зберігання – 10 год;

–вид обслуговування - періодичний;

–періодичність і орієнтовна трудомісткість технічного обслуговування і ремонту – 2 дні (один раз в три місяці);

5.9 Вимоги по транспортуванню і збереженню

–можливість транспортування на будь-якому виді транспортних засобів;

–захист від ударів під час завантаження і розвантаження;

–зберігання на складі готової продукції;

–зберігання у законсервованому вигляді;

- складування на стелажах.

6 Економічні показники:

- орієнтований термін окупності витрат на розробку – 1,3 роки,

- освоєння виробництва продукції – 1 місяць,

- економічна перевага розробленої продукції у порівнянні з кращими зразками – прогнозований прибуток 6852921,49 грн. за три роки.

7 Виконавці НДР: студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Павло БЛАГОДІР

8 Етапи НДР і терміни їх виконання:

- теоретичне дослідження проблематики теми МКР;

- патентно-інформаційний огляд по темі МКР

- удосконалення міцнісного відпрацювання виробів машинобудування шляхом впровадження чисельного моделювання у практику імітації віброударного навантаження від спрацьовування піротехнічних засобів

- з використанням стаціонарних віброударних стендів та пристроїв локального навантаження вибухової дії;
- проектні та перевірочні розрахунки елементів обладнання;
 - техніко-економічне обґрунтування МКР;
 - висновки.
 - оформлення текстових документацій та ілюстративних матеріалів для захисту МКР.

9 Порядок контролю і прийомки

- попередній захист проекту
- захист проекту перед МКР

ДОДАТОК Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТІВ ПРИ ЛОКАЛЬНИХ УДАРНИХ
ВПЛИВАХ

АНАЛІЗ ЗАДАЧ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НА ВПЛИВ ВІБРОУДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

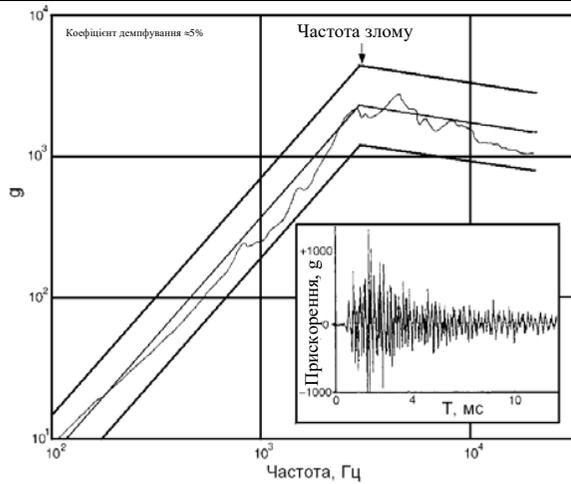


Рисунок 1 – Ударний спектр та залежність прискорення від часу для дальньої зони впливу

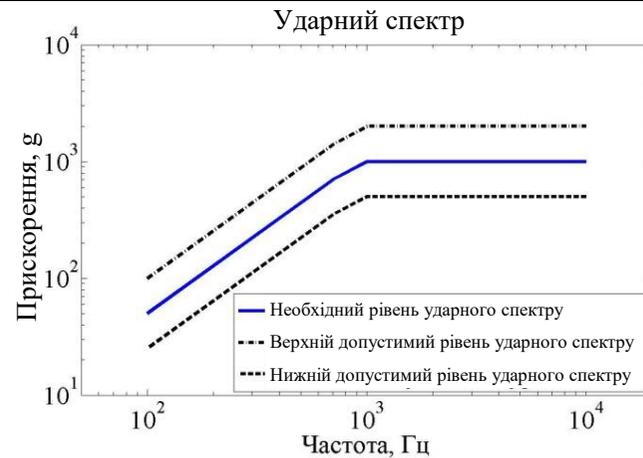


Рисунок 3 – Допустимий діапазон для ударного спектру згідно стандарту ECSS-E-10-03A

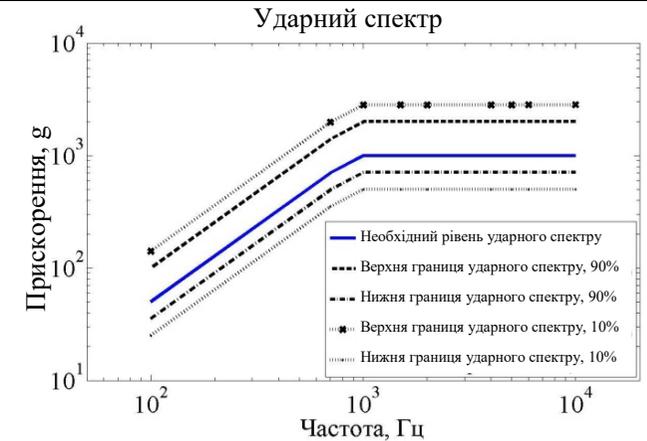


Рисунок 5 – Допустимий діапазон для ударного спектру згідно стандарту MIL-STD-810G (середня зона)

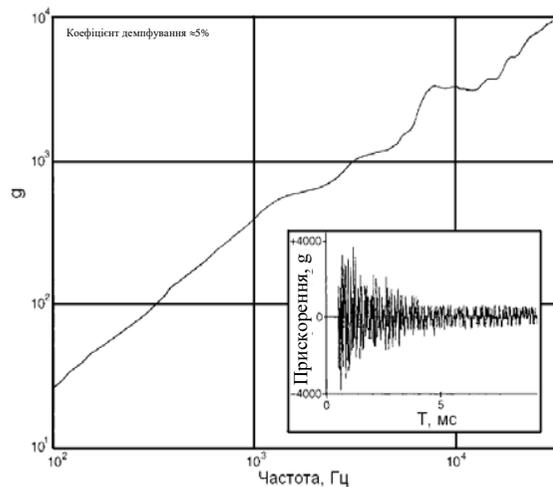


Рисунок 2 – Ударний спектр та залежність прискорення від часу для ближньої зони впливу

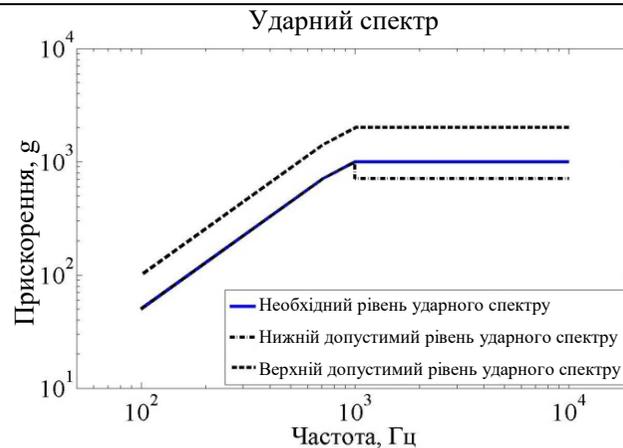


Рисунок 4 – Допустимий діапазон для ударного спектру згідно стандарту ECSS-E-005 (ESA)

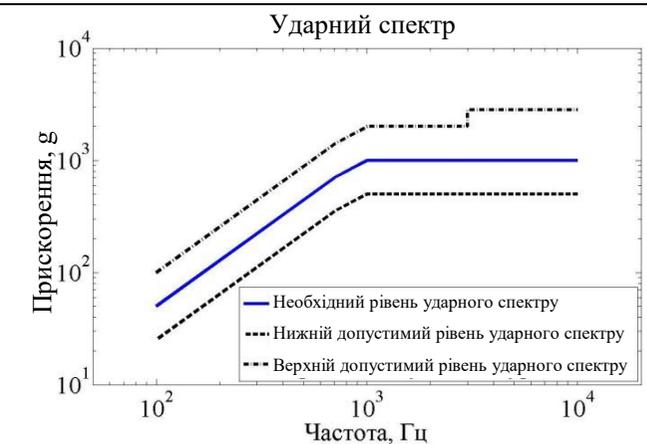


Рисунок 6 – Допустимий діапазон для ударного спектру згідно стандарту NASA-STD-7003A

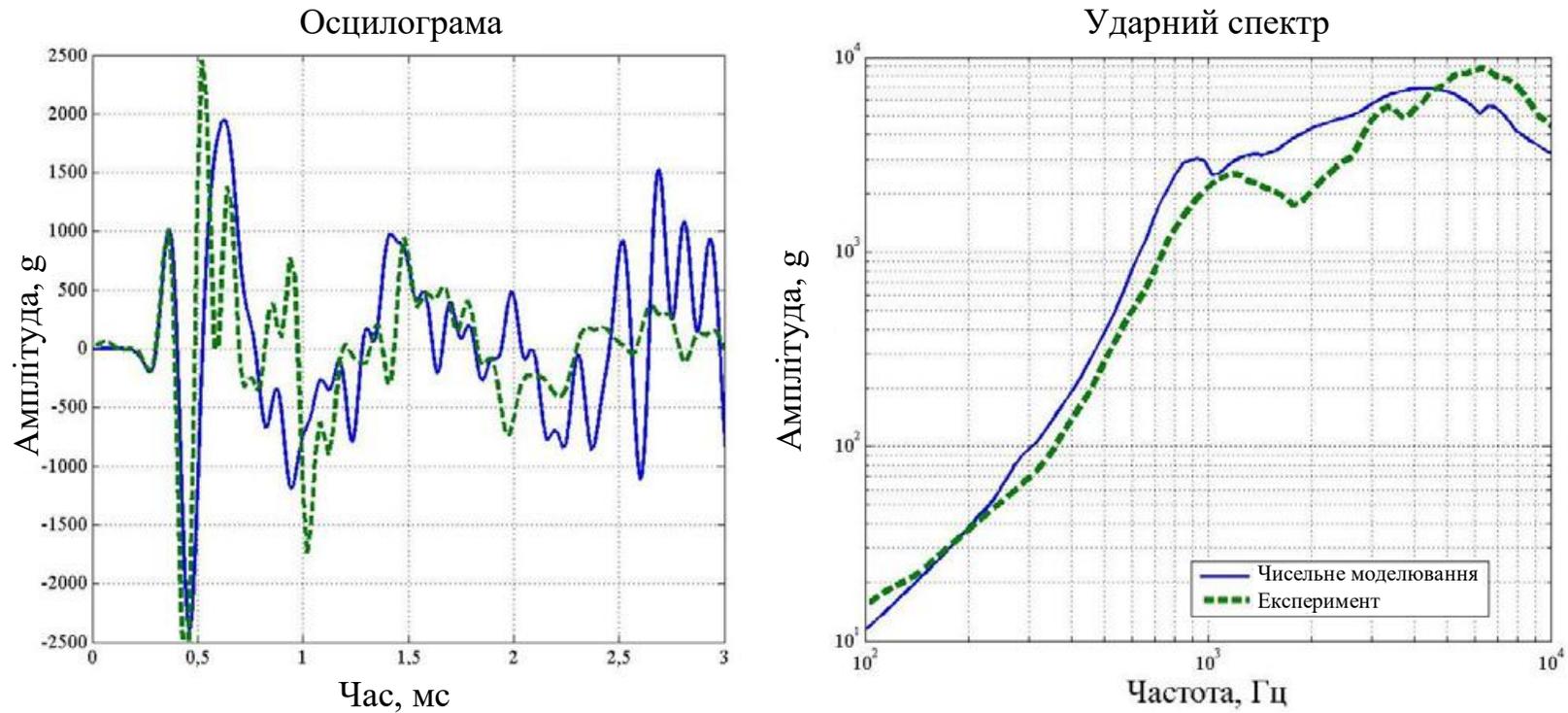


Рисунок 7 – Результати чисельного моделювання порівняно з експериментальними даними

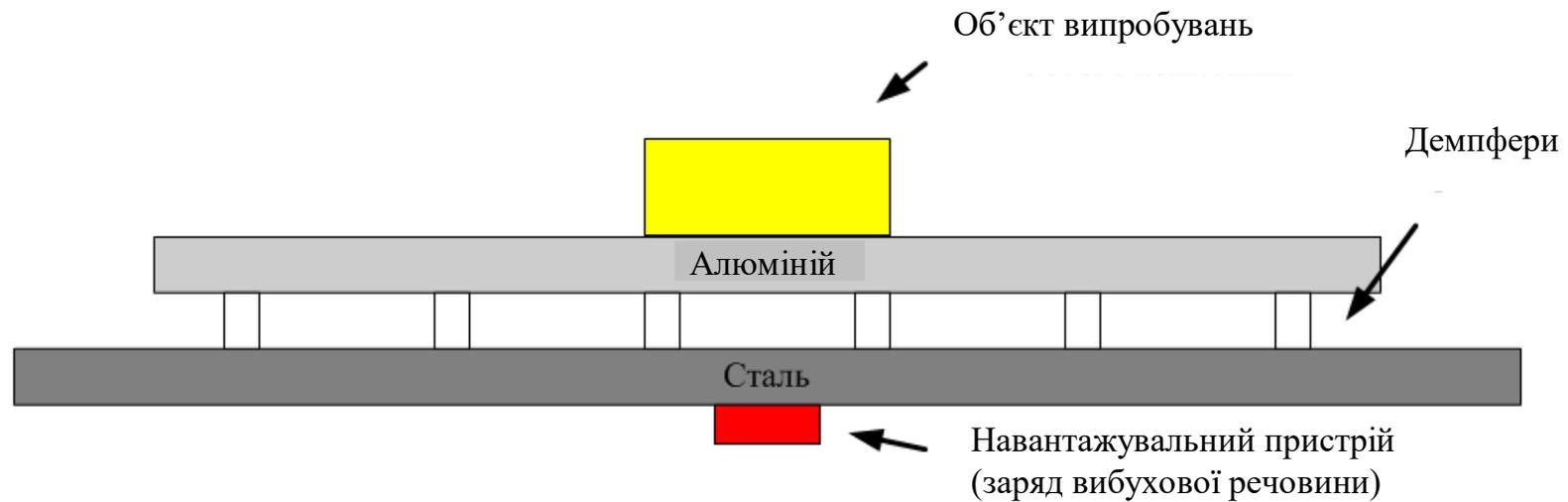


Рисунок 8 – Схема типового ударного стенду вибухової дії

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ПРИСТРОЮ ЛОКАЛЬНО НАВАНТАЖЕННЯ

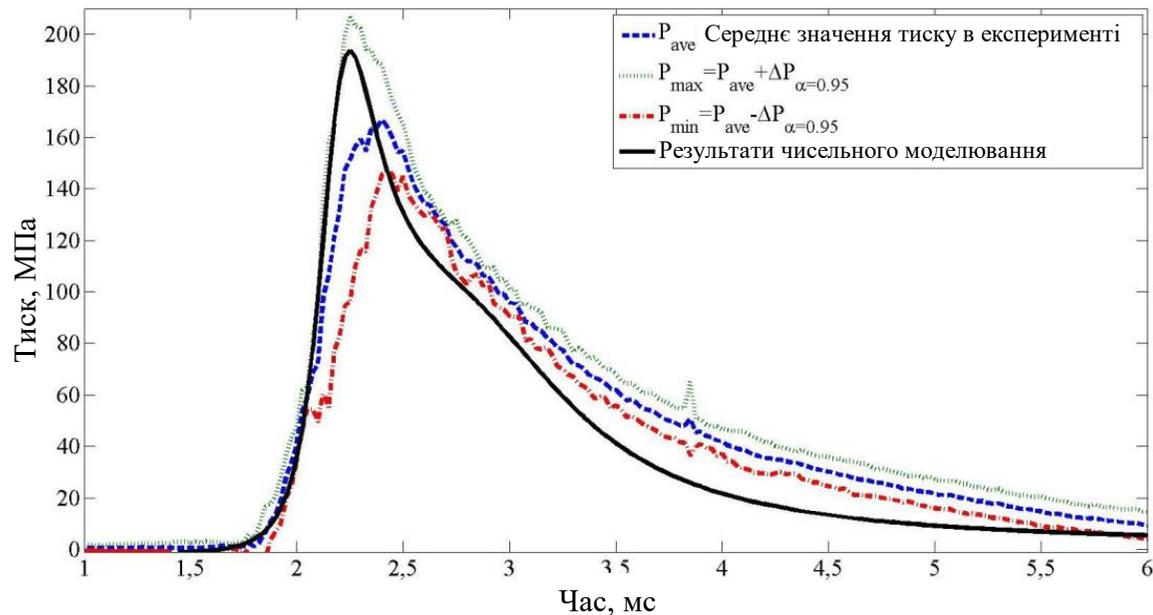
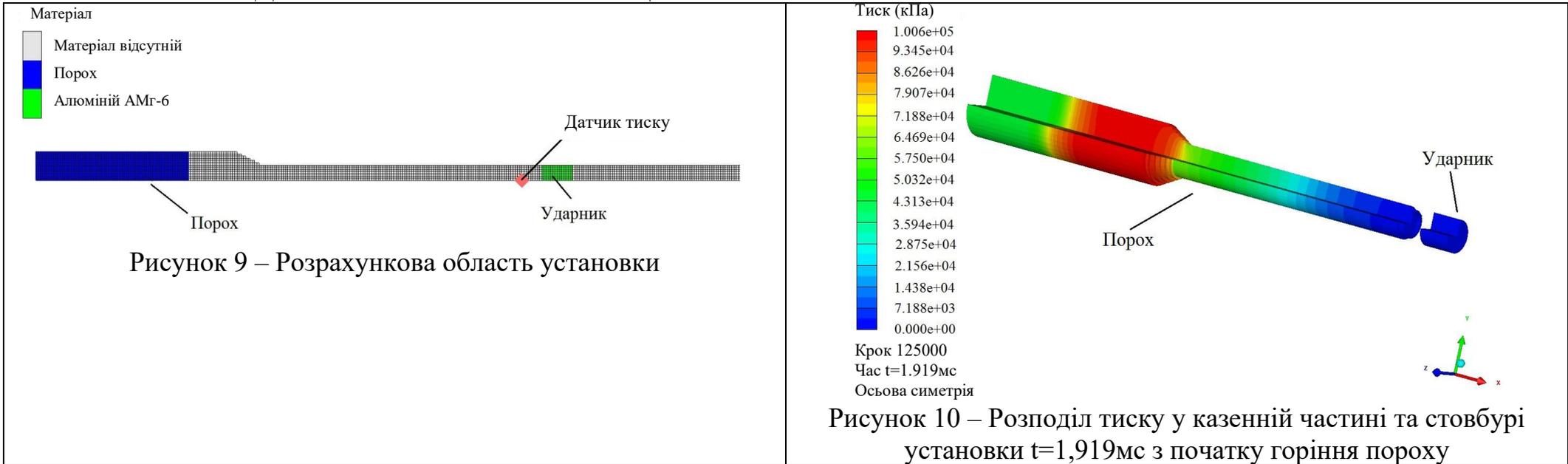


Рисунок 11 – Залежність тиску від часу (розрахунок та експеримент)

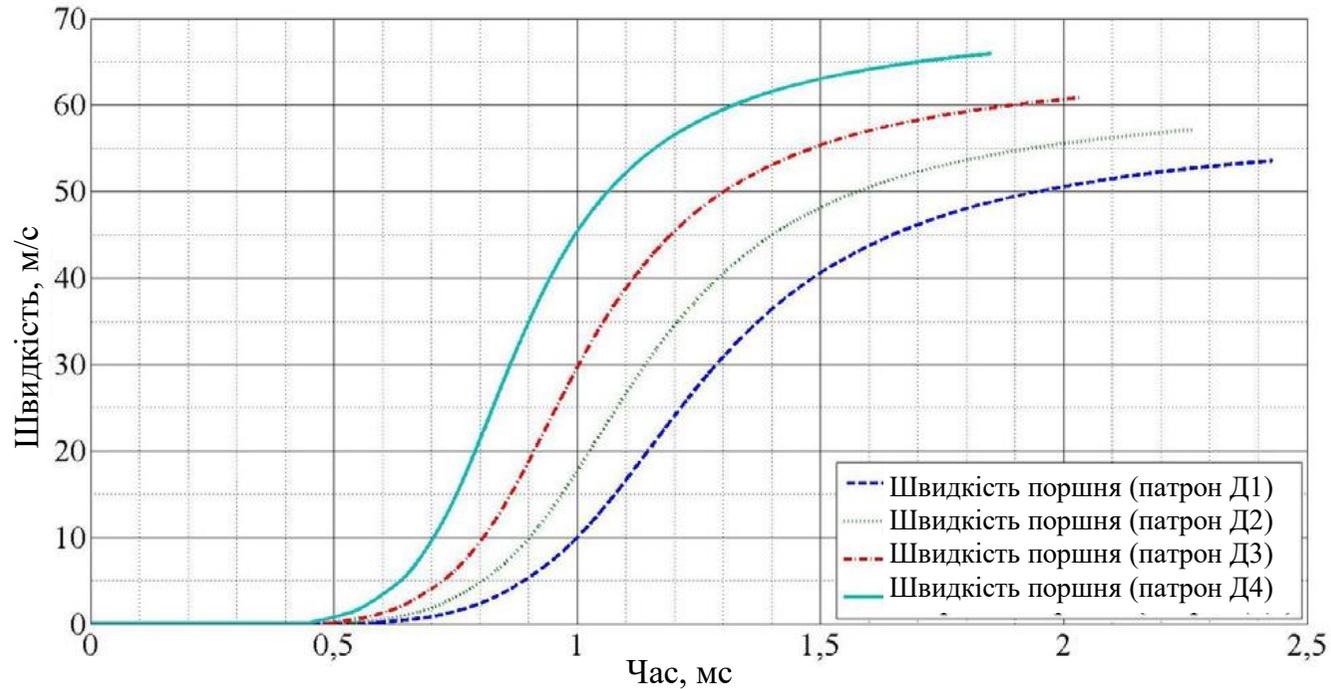
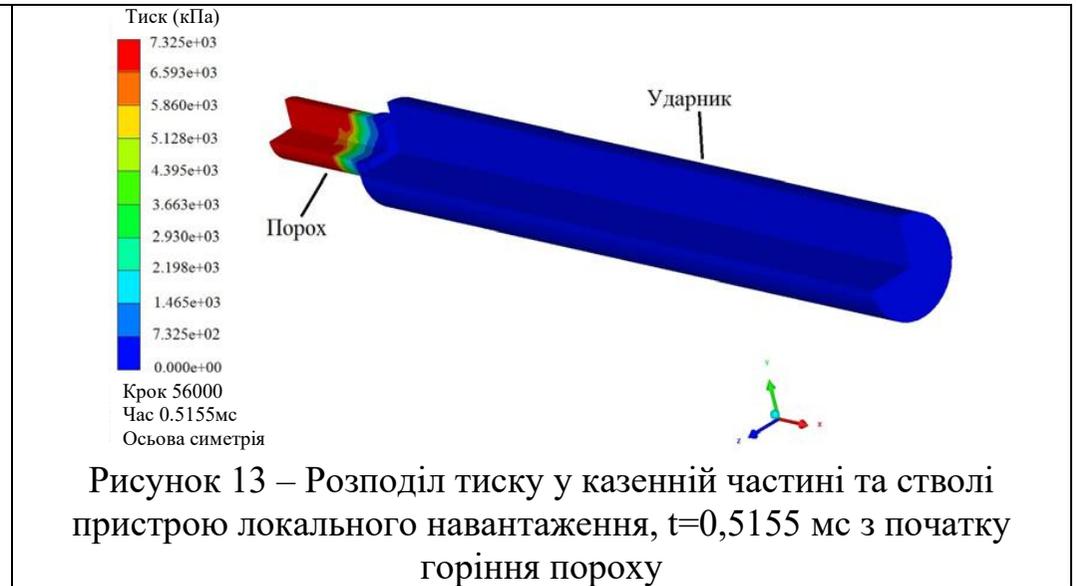
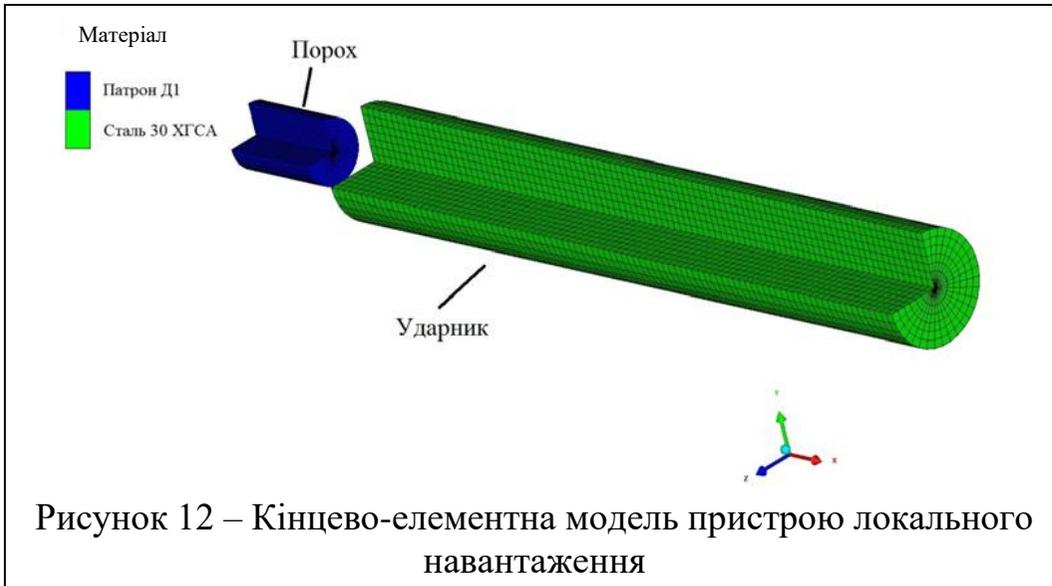


Рисунок 14 – Швидкість поршня у стволі для патронів Д1–Д4

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОУДАРНОЇ ДІЇ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИСТРОЮ ЛОКАЛЬНО НАВАНТАЖЕННЯ

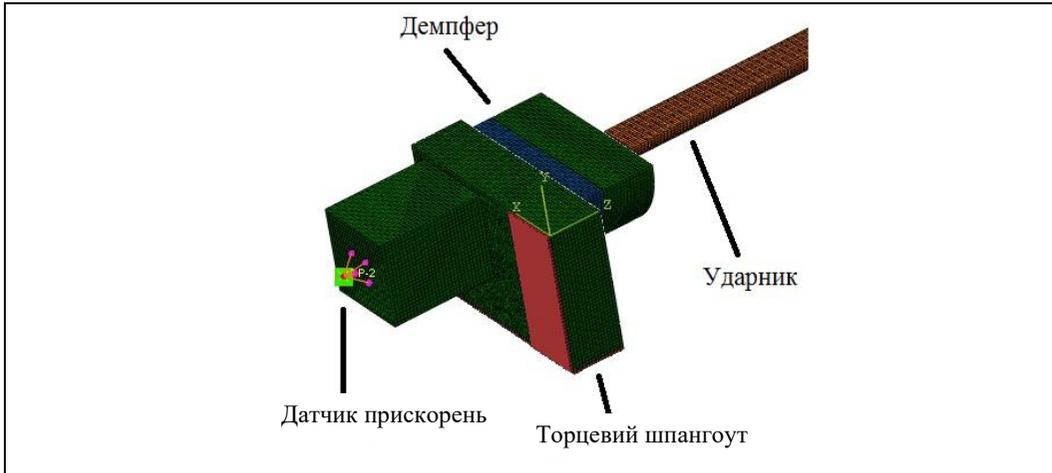


Рисунок 15 – Кінцево-елементна модель механічного ударника з фрагментом оболонки, що навантажується: конфігурація $t=0$ мс

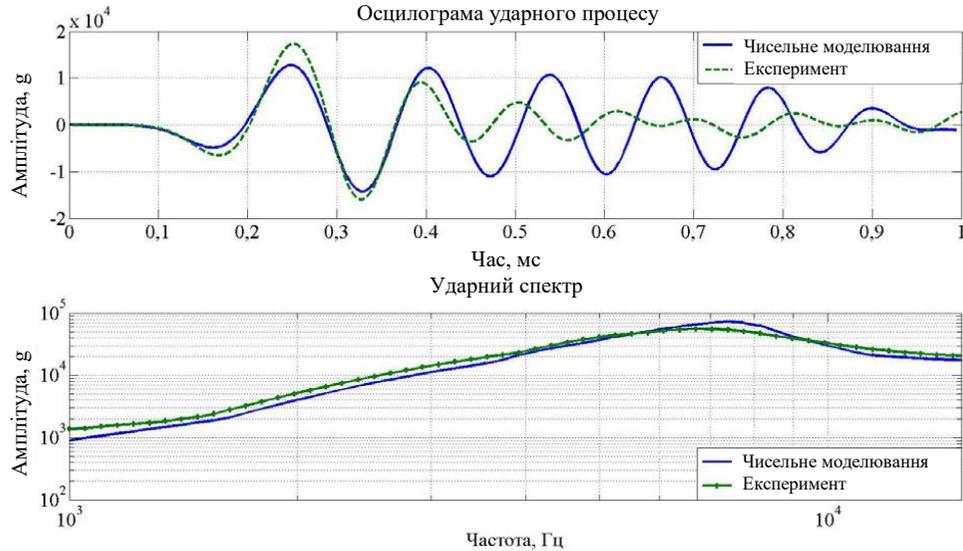


Рисунок 17 – Осцилограма процесу та ударний спектр для першого етапу розрахунку

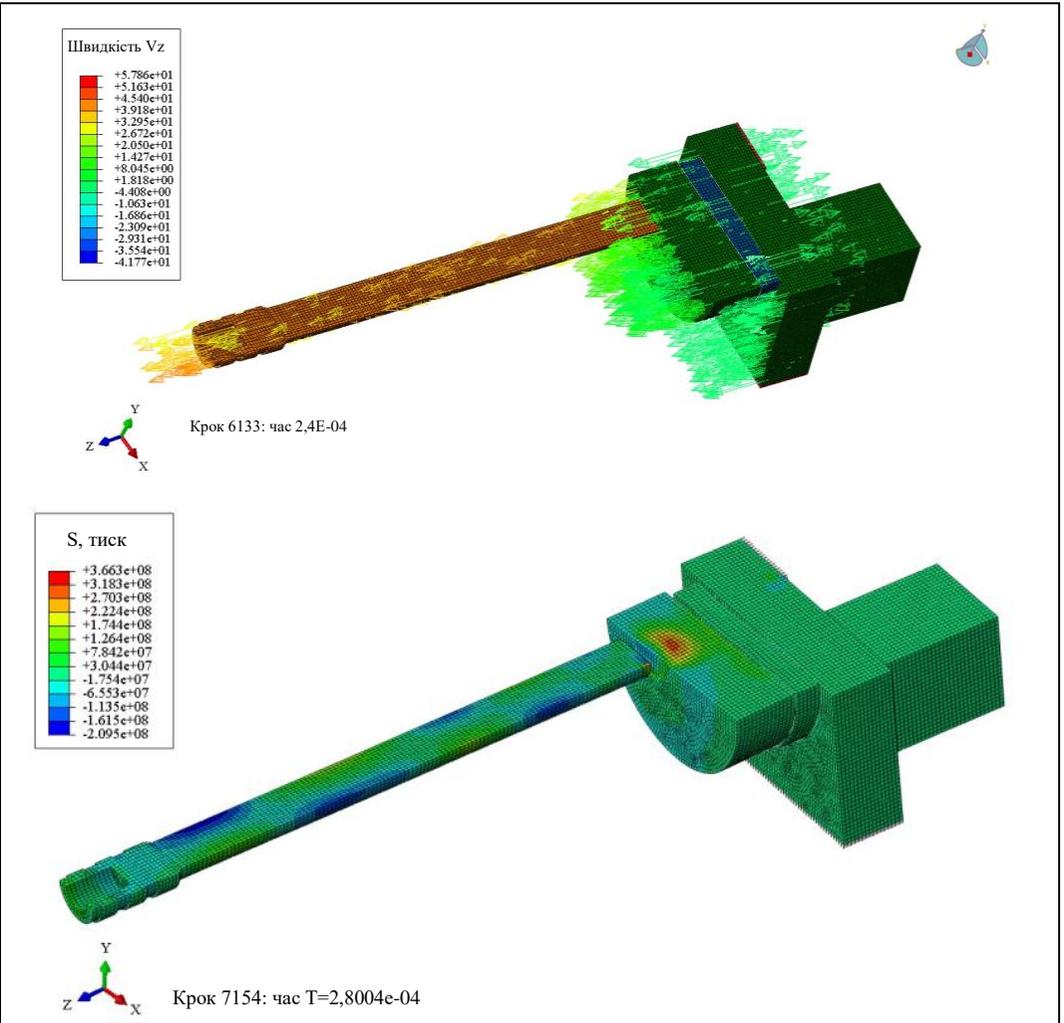


Рисунок 16 – Кінцево-елементна модель механічного ударника з фрагментом елемента, що навантажується; результати розрахунку: $t = 0,24$ мс (вгорі), $t=0,28$ мс (унизу)

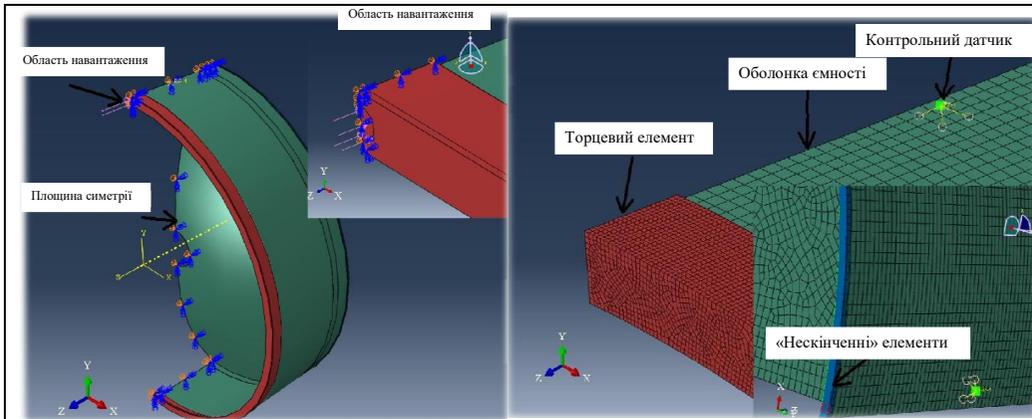
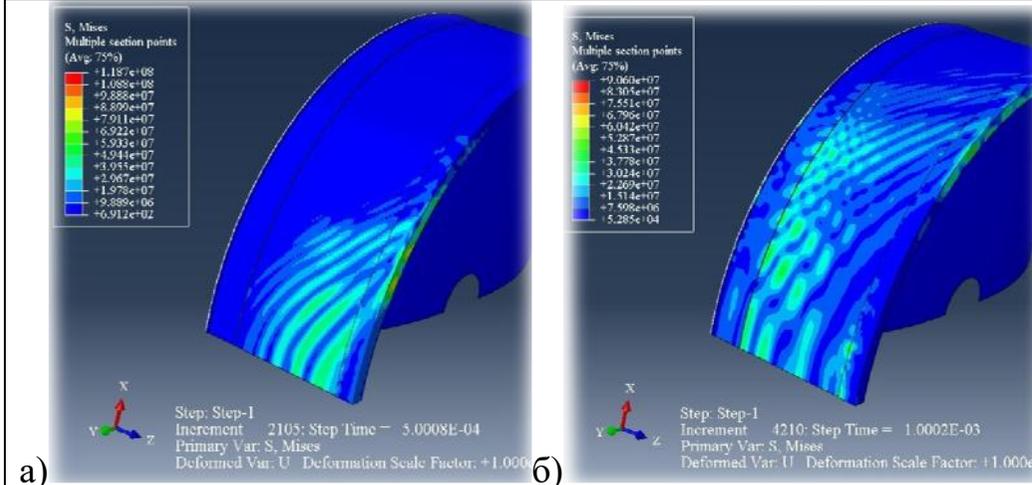


Рисунок 18 – Кінцево-елементна модель ємності



а) для $t=0,5$ мс; б) для $t=1$ мс

Рисунок 19 – Кінцево-елементна модель ємності та результати розрахунку

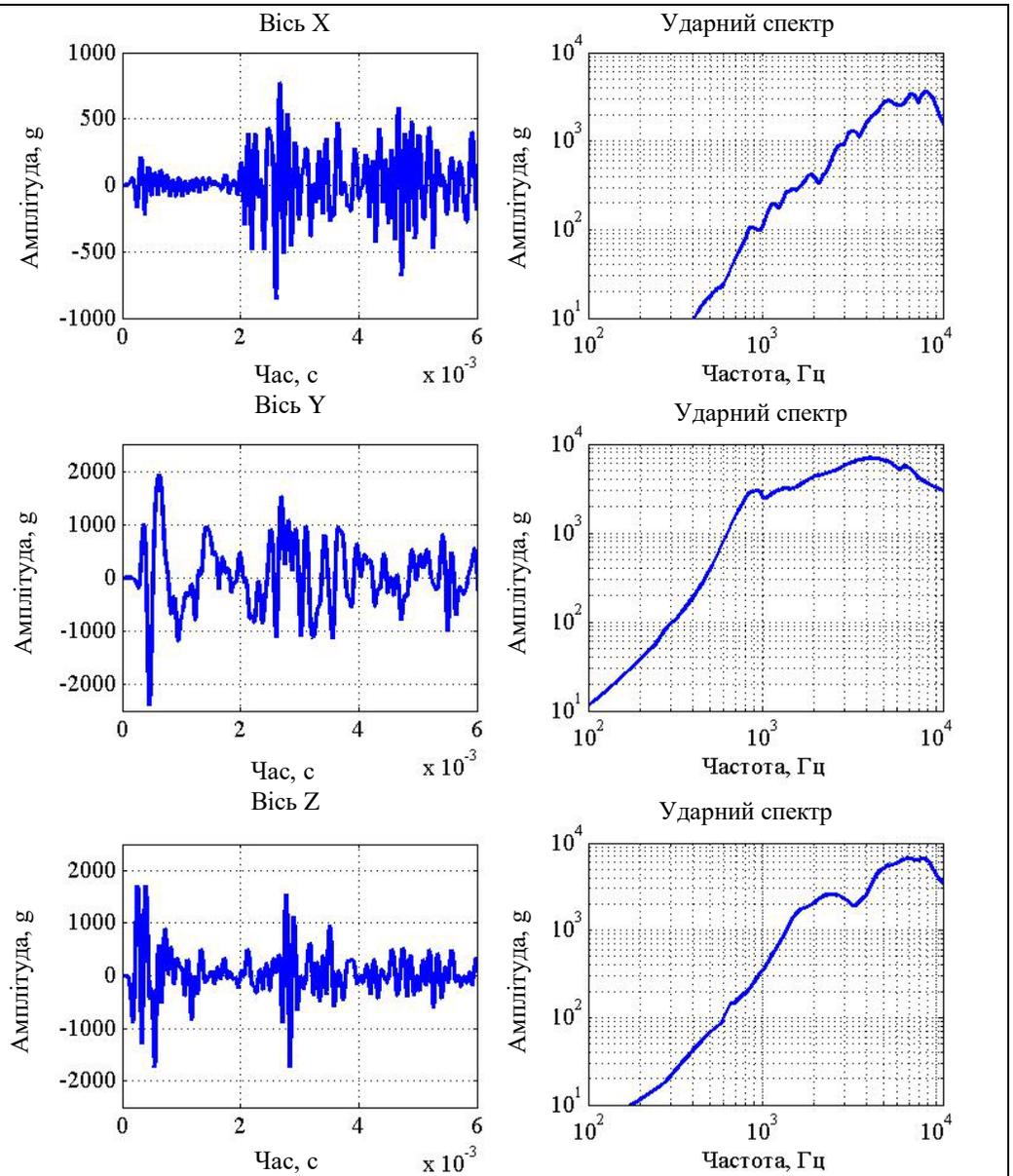


Рисунок 20 – Результати чисельного моделювання

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ СТАЦІОНАРНОГО ВІБРОУДАРНОГО СТЕНДУ

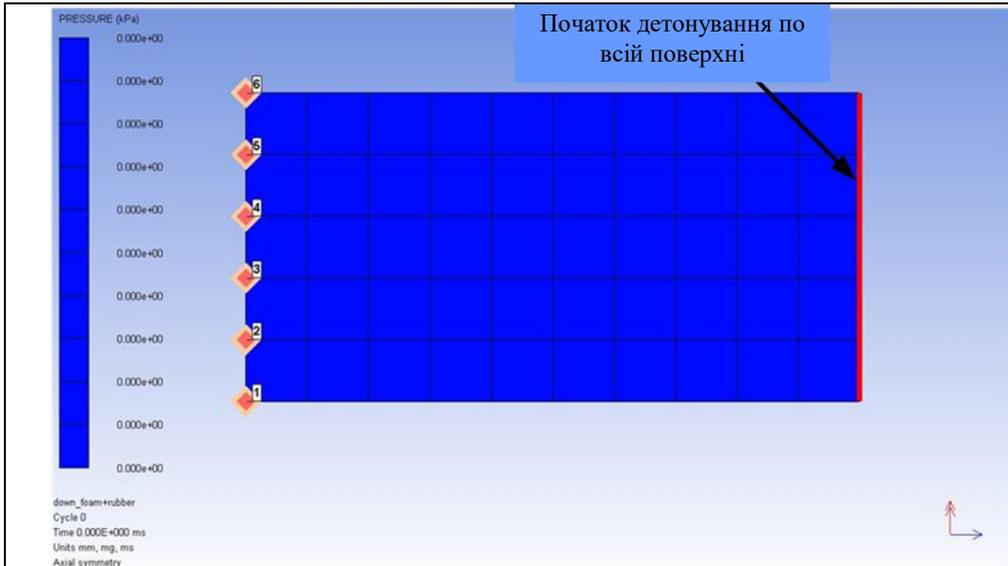


Рисунок 21 – Початковий стан для розрахунку питомого імпульсу жорстку стінку тривимірному наближенні ($t=0$).

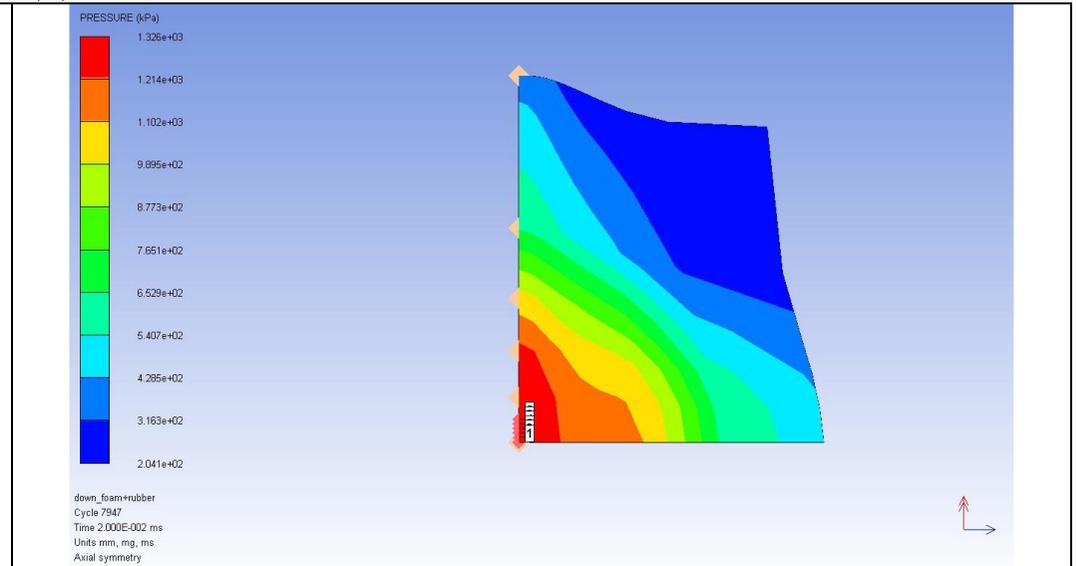


Рисунок 22 – Розрахунок питомого імпульсу на жорстку стінку у тривимірному наближенні ($t=20$ мкс)

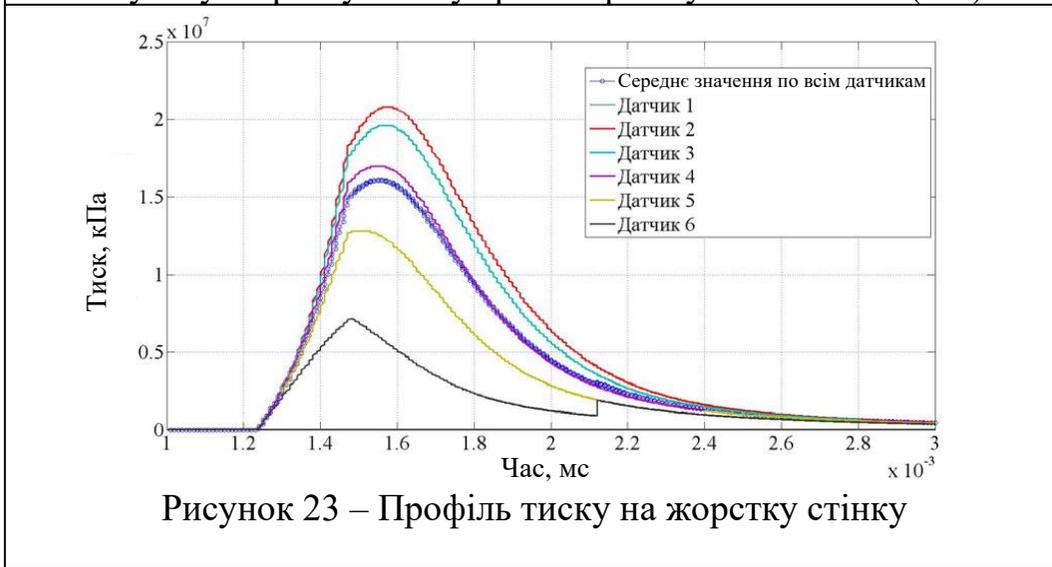


Рисунок 23 – Профіль тиску на жорстку стінку

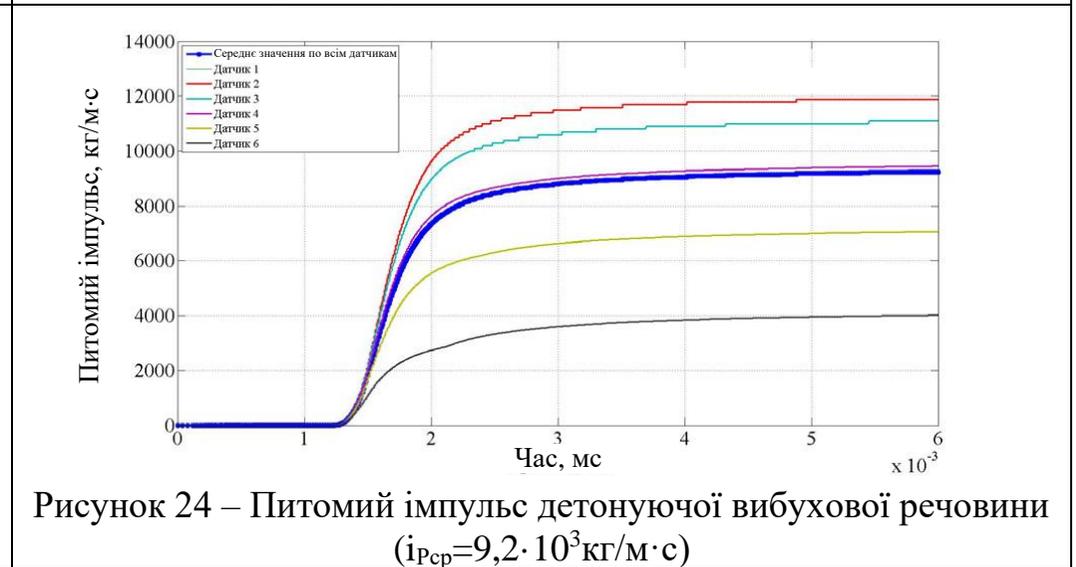


Рисунок 24 – Питомий імпульс детонуючої вибухової речовини ($i_{рсп}=9,2 \cdot 10^3$ кг/м·с)

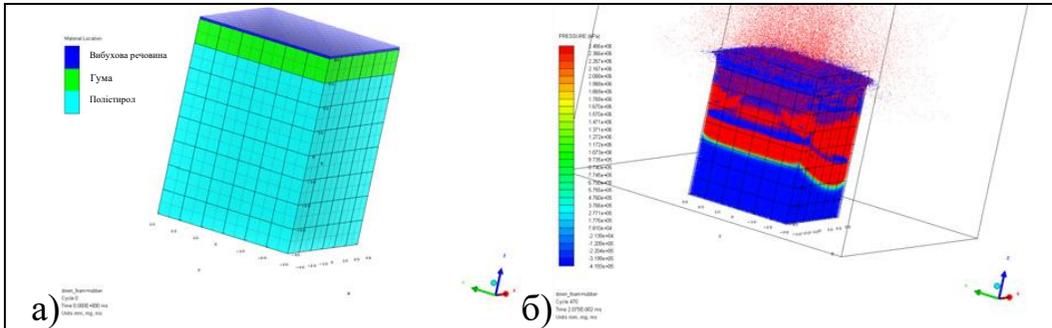


Рисунок 25 – Чисельна модель: а) $t=0$ мкс; б) $t=20,75$ мкс

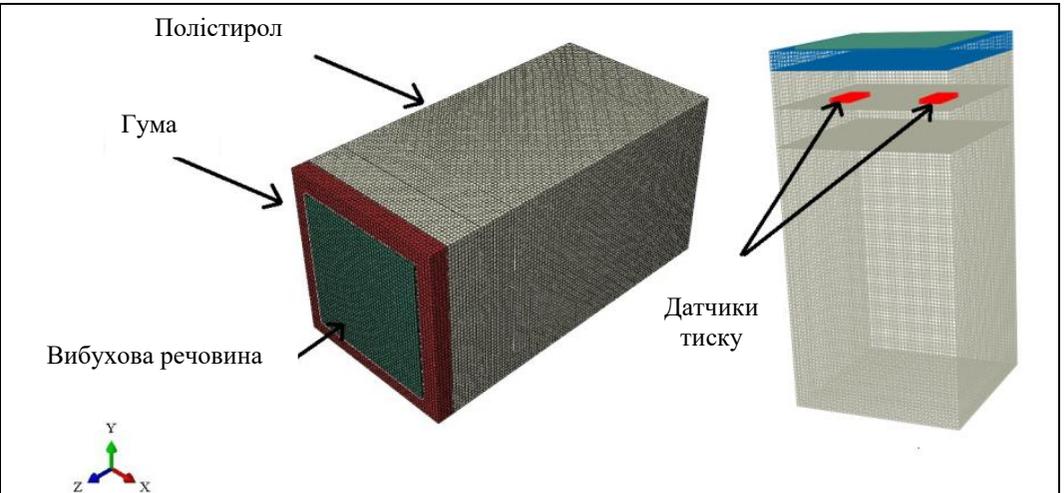


Рисунок 26 – Кінцево-елементна модель експериментального складання (сітковий метод)

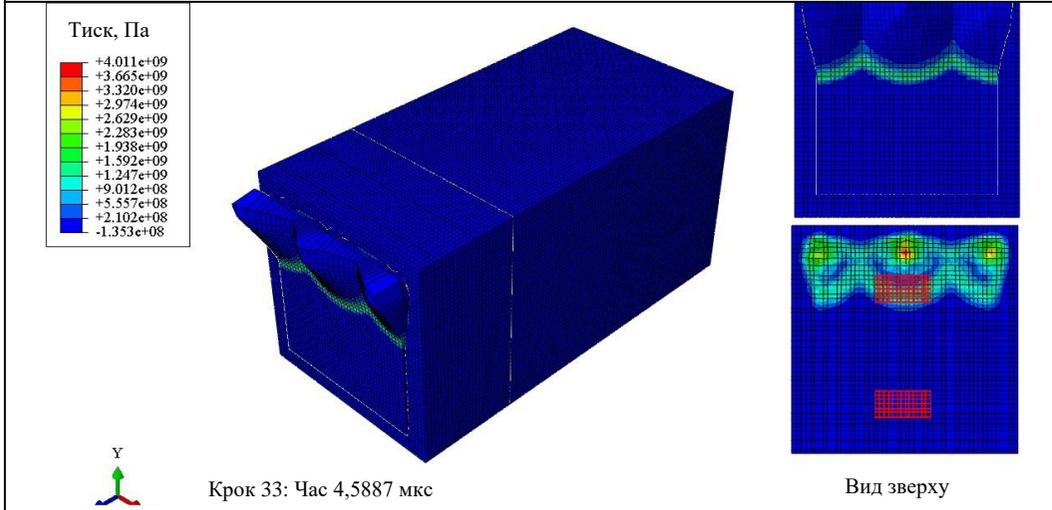


Рисунок 27 – Результати моделювання на момент часу $t=4,5$ мкс

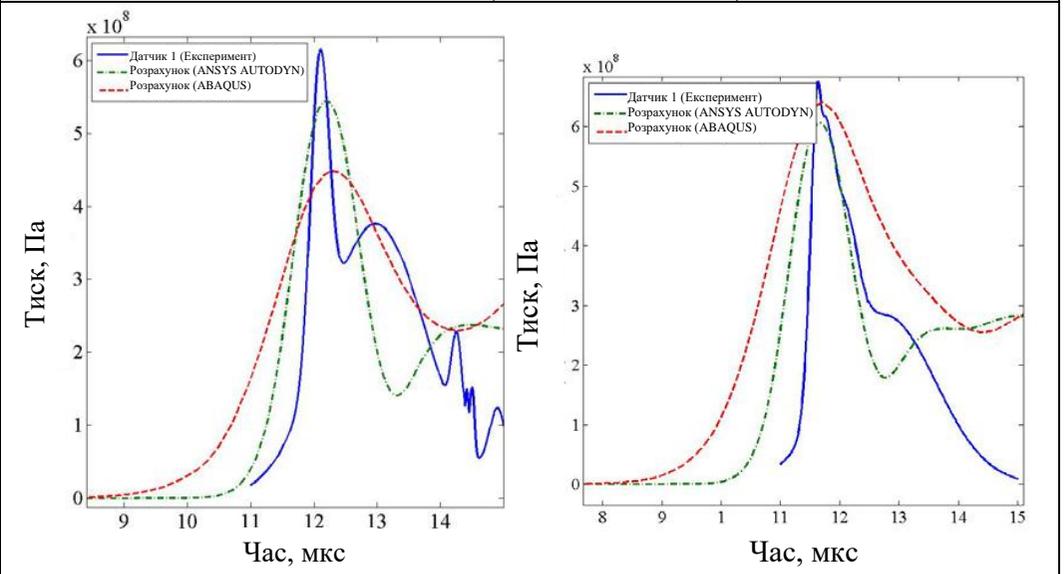


Рисунок 28 – Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВІБРОУДАРНОЇ ДІЇ НА КОНСТРУКЦІЮ

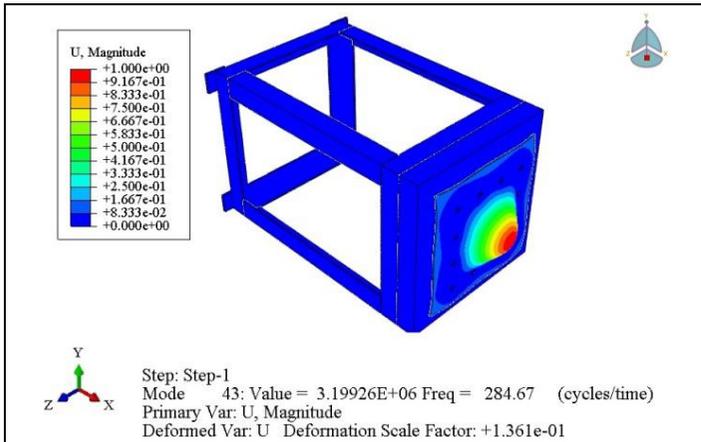


Рисунок 29 – Перший тон коливань верхньої плити $f=284,7$ Гц

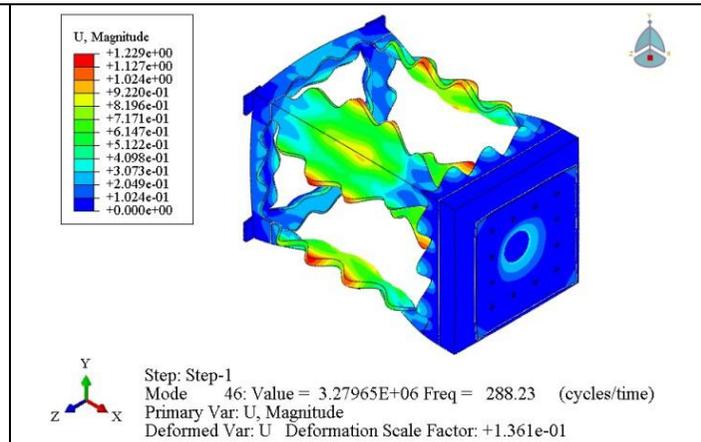


Рисунок 30 – Перший тон коливань каркасу, $f=288,2$ Гц

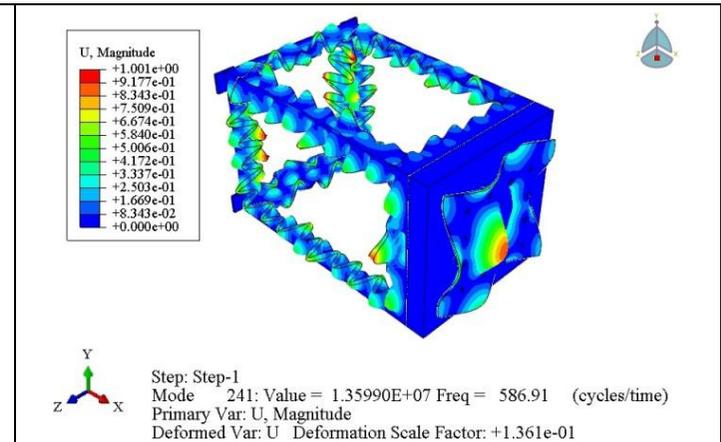


Рисунок 31 – Другий тон коливань верхньої плити $f=586,9$ Гц

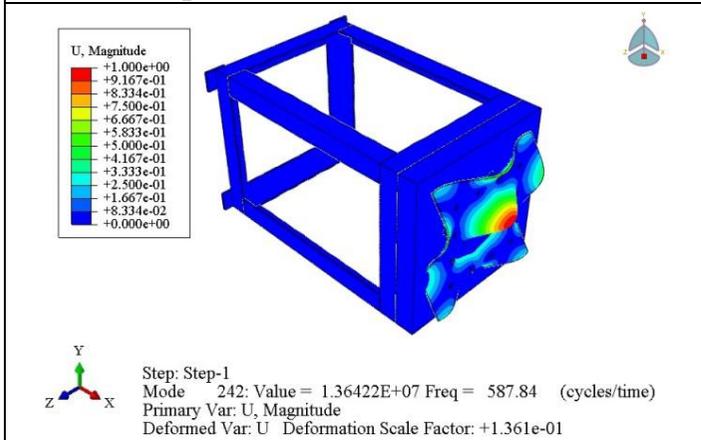


Рисунок 32 – Другий тон коливань верхньої плити $f=587,8$ Гц

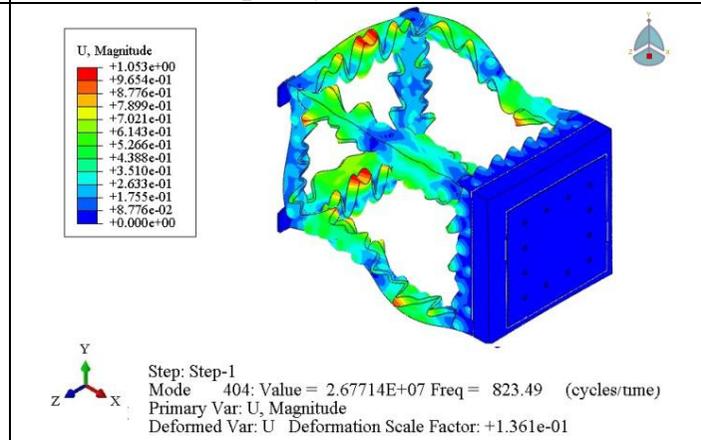


Рисунок 33 – Другий тон коливань каркасу, $f=823,5$ Гц

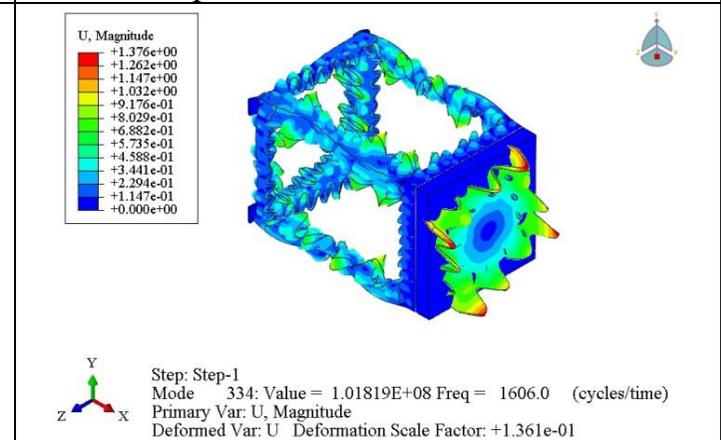
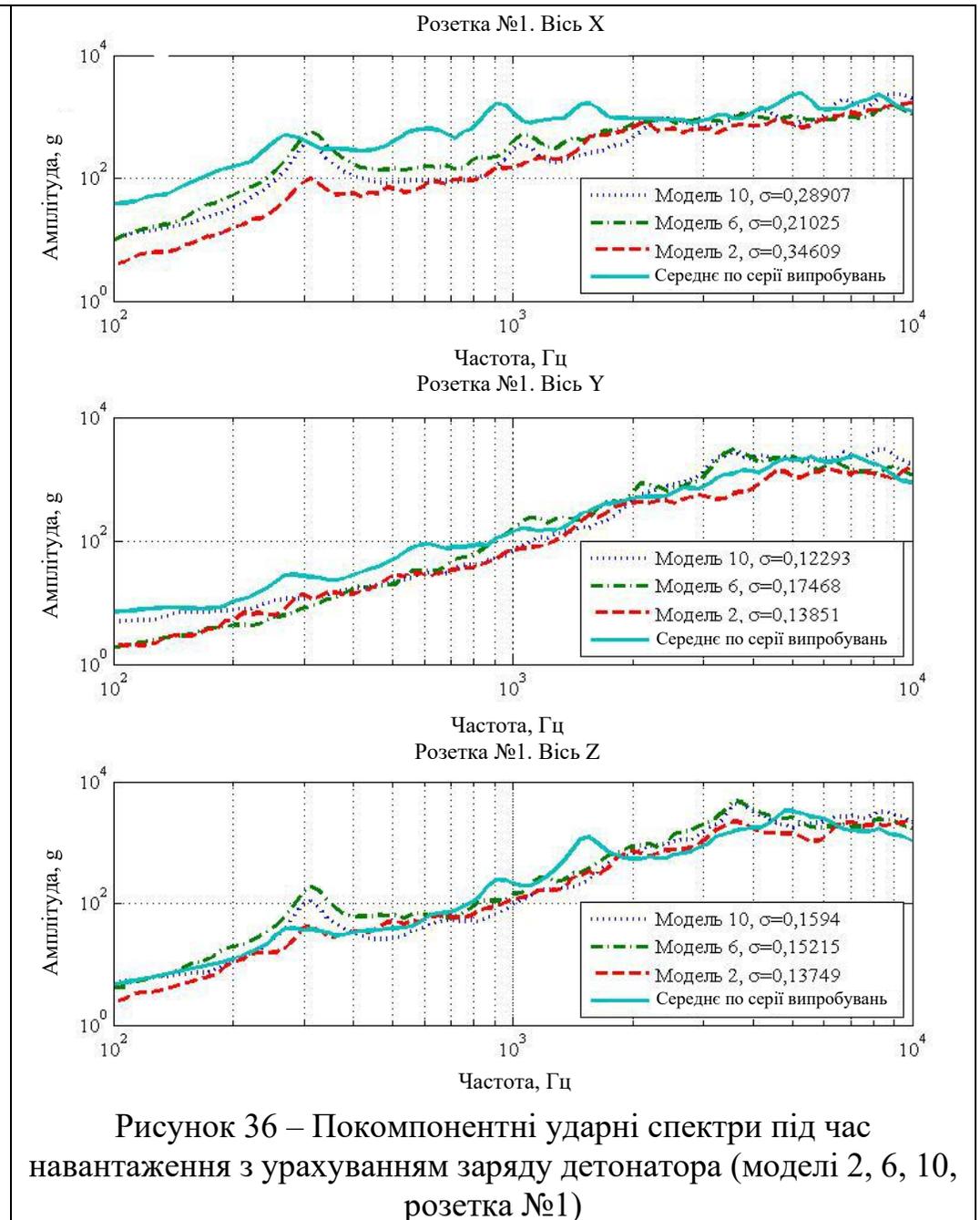
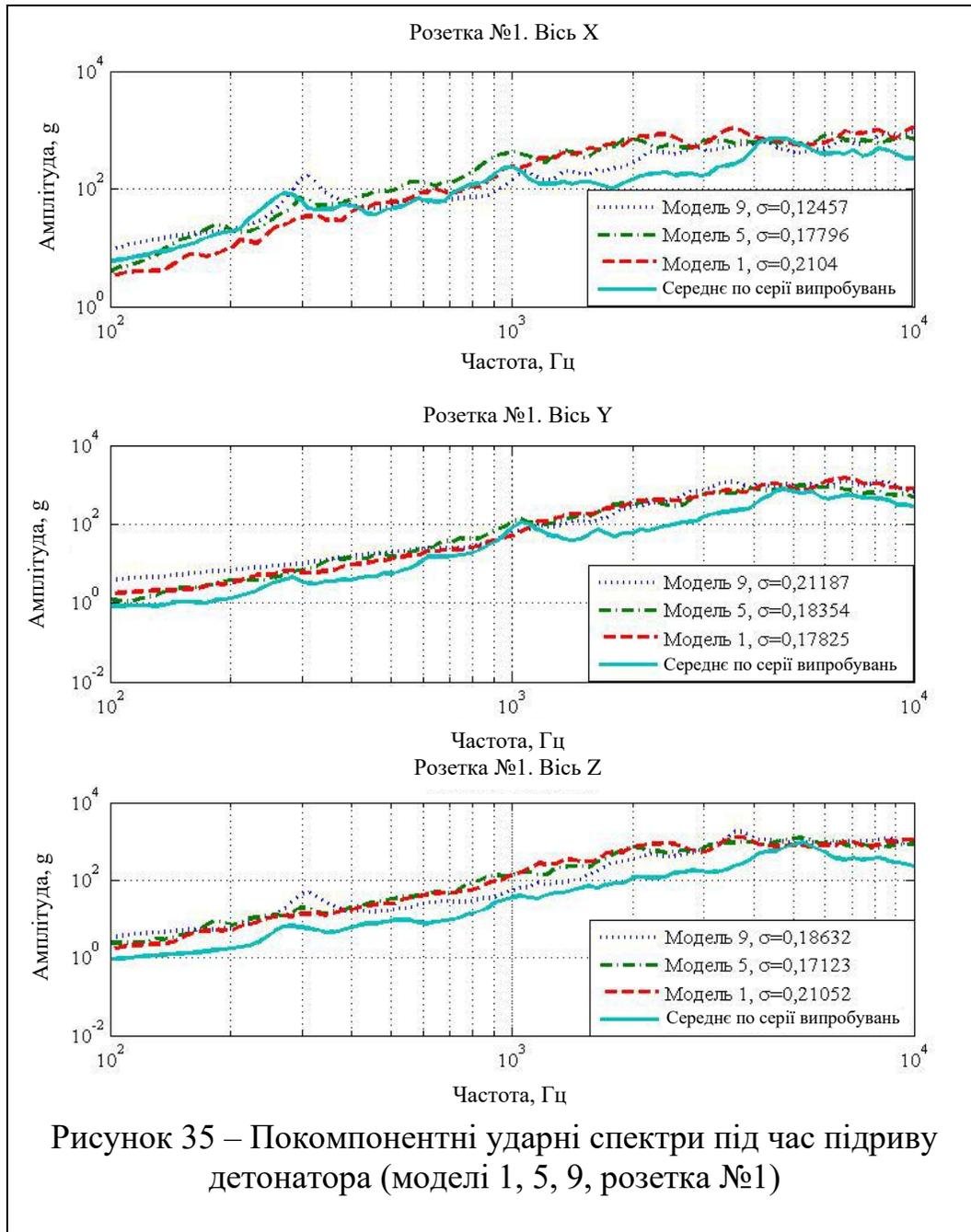


Рисунок 34 – Третій тон коливань каркасу, $f=1606,0$ Гц



ВИСНОВКИ

1. Для визначення навантажень, що реалізуються в локальних пристроях навантаження та металевих установок вибухового типу, запропонований спосіб визначення невідомих констант, що входять до рівняння стану горіння пороху, за відомими значеннями енергетичних, фізичних та геометричних величин заряду, що дозволило розробити методику чисельного розрахунку.

2. Запропонований спосіб використаний для визначення необхідних констант у рівняннях стану пороху, що використовуються в пороховій балістичній установці та у пристроях локального навантаження індустриальними патронами. Проведено валідацію чисельної методики визначення динамічних навантажень, створюваних продуктами горіння порохів, на основі експериментів на пороховій балістичній установці. Експериментально підтверджено обґрунтованість застосування методики для прогнозування випробувальних режимів, що реалізуються пристроєм локального навантаження.

3. Розроблено методику чисельного моделювання віброударних процесів у типових конструктивних елементах, при імітації спрацьовування пірозасобів за допомогою пристрою локального навантаження вибухового типу. Методика дозволяє моделювати складові конструкції, що включають тонкостінні оболонки та конструктивні елементи, які при розрахунку короточасних процесів деформації в близькій зоні від джерела навантаження повинні розглядатися як тривимірні.

4. Проведено валідацію розробленої чисельної методики на основі експериментів з ударного навантаження типової конструкції тонкостінного корпусу із сполучним шпангоутом з використанням пристрою ударного навантаження. Експериментально обґрунтовано можливість застосування розробленої методики чисельного моделювання для розрахунку віброударного навантаження виробів на локальні віброударні навантаження від спрацьовування пірозасобів та прогнозування напружено-деформованого стану конструкцій під час експериментів з метою скорочення обсягу випробувань.

5. Для визначення навантажень, що реалізуються в стаціонарних віброударних стендах вибухового типу, розроблено методику чисельного моделювання режимів роботи джерел навантаження – імпульсних пристроїв основі вибухової речовини та демпфуючих елементів.

6. Проведено верифікацію методики чисельного моделювання роботи імпульсних пристроїв та розрахунку параметрів навантаження, що повідомляється імпульсним пристроєм пружної плити стенду, на основі відомих аналітичних рішень в одновимірному наближенні. Валідацію методики виконано з використанням проведених експериментів з визначення швидкості фронту та тиску в ударної хвилі, що проходить з демпфуючого пакету імпульсного пристрою до пружної плити стенду. Відповідність експериментальних та чисельних результатів підтверджує обґрунтованість запропонованої методики та можливість використання її визначення параметрів навантаження, створюваної вибуховим джерелом енергії віброударного стенду.

7. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на середній рівень комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 2 роки. Загальні витрати складають 1578276,43 грн. Прибуток за три роки складає 6852921,49 грн.

ДОДАТОК В

ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ НА ПЛАГІАТ

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТІВ ПРИ ЛОКАЛЬНИХ УДАРНИХ
ВПЛИВАХ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Моделювання віброударного навантаження конструкцій

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра галузевого машинобудування, ФМТ, гр. 1ГМ-24м
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,18 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

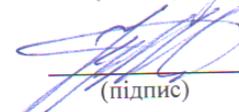
Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

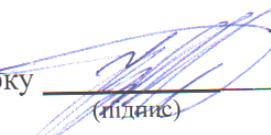
У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

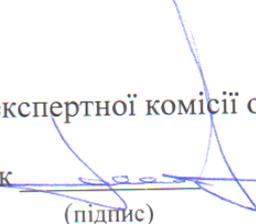
Експертна комісія:

Поліщук Л.К., зав. кафедри ГМ  (підпис)
(прізвище, ініціали, посада)

Шенфельд В.Й., доцент кафедри ГМ  (підпис)
(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку  (підпис) Шенфельд В.Й.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник  (підпис) Сивак Р.І. професор каф. ГМ
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач Stashkevich (підпис) Благодір П.С.
(прізвище, ініціали)