

С. С. ГАВРИЛЕНКО

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРНОГО ВІДГУКУ БАЛКОВОЇ МОДЕЛІ СЕРЕДНЬОГО КОЛОСНИКА ГРОХОТА-ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА

У статті експериментально досліджено ударний відгук балкової моделі середнього колосника грохота-перевантажувача та встановлено вплив енергії удару, податливості опорної системи і шару піщаної присипки на параметри початкового перехідного процесу. Для фізичного моделювання використано дві масштабно узгоджені балкові моделі за схемою «колосник - дві опори». Ударне навантаження створювали вільним падінням вантажів масою 50 і 250 г з фіксованих висот. Реєстрацію сигналу виконували п'єзоелектричним акселерометром КД-35 через вимірювальний комплекс Robotron 00032 з подальшою цифровою обробкою осцилограм. Основним критерієм оцінювання прийнято розмах першого ударного імпульсу S_{p-p} , який характеризує повну зміну відносного сигналу між максимальним додатним і максимальним від'ємним піками початкової реакції та є зручним для порівняння різних режимів при однакових налаштуваннях вимірювального тракту. У результаті показано, що зі збільшенням нормованої енергії удару загалом зростає нормований розмах першого імпульсу. Для всіх розглянутих режимів пружно оперта балка має менший розмах ударного імпульсу, ніж статична, що підтверджує демпфувальний вплив податливої опорної системи. Досліди з піщаною присипкою показали, що шар 0,5 см забезпечує найбільш стабільне зниження розмаху першого імпульсу: 95,4 %, 84,3 % і 80,9 % відповідно для висот падіння 12, 24 і 50 см. Додатково встановлено, що для тоншого шару 0,25 см демпфувальна дія помітно зменшується за найбільшої енергії удару, що свідчить про залежність контактної взаємодії від товщини проміжного шару. Із точки зору новизни уточнено експериментальний підхід до оцінювання нестационарного ударного відгуку середнього колосника через критерій розмаху першого імпульсу та нормовану енергію удару; показано, що контакт-податливий шар істотно змінює не лише рівень пікової реакції, а й характер її затухання. Із точки зору практичної значимості отримані результати можуть бути використані для верифікації математичної моделі ударного навантаження, вибору параметрів пружних опор і врахування проміжного шару матеріалу в розрахунках грохотів-перевантажувачів.

Ключові слова: грохот-перевантажувач, середній колосник, ударне навантаження, балкова модель, пружні опори, піщана присипка, ударно-затухаючий процес

S. HAVRYLENKO

EXPERIMENTAL STUDY OF THE IMPACT RESPONSE OF A BEAM MODEL OF THE MIDDLE GRATE BAR OF AN OVERLOADING SCREEN

The study experimentally investigates the impact response of a beam model of the middle grate bar of an overloading screen and to determine the influence of impact energy, support compliance, and a sand interlayer on the parameters of the initial transient process. Two scale-consistent beam models based on the “grate bar – two supports” configuration were used for physical modelling. Impact loading was produced by free fall of 50 g and 250 g bodies from fixed heights. The signal was recorded using a KD-35 piezoelectric accelerometer and a Robotron 00032 measuring system, followed by digital processing of oscillograms. The peak-to-peak amplitude of the first impact pulse was adopted as the main evaluation criterion, as it characterizes the full variation of the relative signal between the maximum positive and maximum negative peaks of the initial response and is convenient for comparing different regimes under identical measurement-system settings. It is shown that the normalized range of the first pulse generally increases with the normalized impact energy. In all studied regimes, the elastically supported beam has a smaller impact-pulse range than the statically supported beam, which confirms the damping effect of the compliant support system. Tests with a sand interlayer showed that the 0.5 cm layer provides the most stable reduction in the first-pulse range: 95.4 %, 84.3 %, and 80.9 % for drop heights of 12, 24, and 50 cm, respectively. It was additionally found that for the thinner 0.25 cm layer, the damping effect decreases noticeably at the highest impact energy, indicating that the contact interaction depends on the thickness of the intermediate layer. An experimental approach to evaluating the non-stationary impact response of the middle grate bar is refined using the first-pulse peak-to-peak range and normalized impact energy; it is shown that a contact-compliant layer substantially changes not only the level of the peak response but also the character of its decay. The obtained results can be used to verify the mathematical model of impact loading, select elastic-support parameters, and account for an intermediate material layer in calculations of overloading screens.

Keywords: overloading screen, middle grate bar, impact loading, beam model, elastic supports, sand interlayer, impact-decaying process

Вступ. У врівноважених колосникових грохотах-перевантажувачах середній колосник є одним із найбільш навантажених елементів системи, оскільки саме на нього значною мірою передаються короточасні ударні дії від падіння кускового матеріалу. У спрощених розрахункових схемах такий вплив зазвичай подають як імпульсний або короточасний удар, однак для перевірки адекватності таких припущень

необхідна експериментальна верифікація на фізичних моделях.

Особливо важливим є встановлення ролі податливості опорної системи та можливого впливу проміжного шару дрібної фракції, який у реальних умовах може формуватися на колосниках і змінювати параметри контактної вза-

© С. С. Гавриленко, 2026

сморді. Такий шар може не лише зменшувати пікові значення сигналу, а й змінювати форму першої ударної реакції, тривалість контакту та характер подальшого затухання.

Аналіз попередніх досліджень. Аналітичні засади дослідження динаміки врівноваженого грохота-перевантажувача з ексцентриковим приводом, включаючи побудову розрахункової схеми, математичної моделі та аналіз амплітудно-частотної характеристики, наведено в [1].

Побудова фізичних моделей динамічних систем традиційно ґрунтується на положеннях теорії подібності та аналізу розмірностей, що дозволяє узгодити масово-жорсткісні параметри моделі й натурного об'єкта [2, 3]. Сучасні дослідження в галузі вібраційних сит і грохотів здебільшого зосереджені на аналітичному або числовому аналізі напружено-деформованого стану елементів конструкції, локальній вібрації ситового полотна та моделюванні взаємодії «частинка – робочий орган» методами DEM, FEM і MBD.

Зокрема, у роботі Krot та ін. показано, що для вібраційних грохотів суттєвим чинником є стохастичні удари від падаючих кусків матеріалу, які впливають на динамічну поведінку системи та стан з'єднань [4]. Long та ін. запропонували динамічну модель для оцінювання напружень у балковій структурі лінійного грохота, підкресливши необхідність врахування динамічних навантажень при проектуванні таких елементів [5]. Zhang та ін. на основі DEM–FEM співмоделювання показали, що параметри грохочення істотно впливають на локальну вібрацію ситового полотна, а характер частинкового навантаження визначає розподіл динамічних реакцій [6]. Xu та ін. використали зв'язану DEM–FEM–MBD модель для оптимізації процесу грохочення та підтвердили, що динаміка екрануючих елементів тісно пов'язана з параметрами робочого процесу й структурними характеристиками системи [7]. Крім того, у роботі Lin та ін. показано, що зміна жорсткості пружних елементів і завантаження матеріалом можуть істотно впливати на амплітуду вібраційного грохота, а використання додаткових пружних елементів дає змогу зменшити чутливість системи до таких змін [8].

Окремий інтерес становлять дослідження контактної-податливих і гранульованих демпфувальних середовищ. У оглядовій роботі Badji та ін. зазначено, що гранульовані матеріали можуть забезпечувати суттєве додаткове розсіювання енергії удару та вібрації [9]. Avdić та ін. експериментально показали, що гранульовані демпфувальні елементи в окремих діапазонах частот мають значно вищу ефективність, ніж традиційні гумові елементи [10]. Li та ін. для систем із піщаною подушкою при ударному навантаженні відзначили, що зі збільшенням товщини піщаного шару пікові ударні зусилля зменшуються, тоді як тривалість контакту зростає [11]. Близькі за фізичною природою результати

отримано у роботі Naito та ін., де показано, що характер ударної взаємодії з гранульованою подушкою залежить від швидкості навантаження, а форма імпульсу та передана ударна сила визначаються не тільки максимальним зусиллям, але й тривалістю контакту [12].

Разом із тим для задачі середнього колосника грохота-перевантажувача бракує саме експериментальних досліджень на простих балкових аналогах, які б поєднували:

- а) перевірку спрощеної імпульсної моделі;
- б) порівняння статичної та пружно опертої балки;
- в) оцінювання впливу локального шару дрібної фракції на пікові та енергетичні характеристики відгуку.

Незважаючи на наявність розвинених числових моделей вібраційних грохотів і методів аналізу ударних навантажень, недостатньо дослідженим залишається експериментальний відгук спрощеної балкової моделі середнього колосника за різних умов опирання та за наявності контактної-податливого шару дрібної фракції.

Метою статті є експериментальне дослідження ударного відгуку балкової моделі середнього колосника грохота-перевантажувача та встановлення впливу маси ударного тіла, висоти падіння, податливості опор і шару піщаної присипки на параметри ударно-затухаючого коливального процесу та узагальнені характеристики сигналу.

Основна частина (Результати). Матеріали та методика дослідження. Для фізичного моделювання використано дві масштабні узгоджені балкові моделі, які відтворюють схему «колосник – дві опори». Підбір параметрів моделей здійснювали за співвідношеннями масштабування маси та жорсткості:

$$\frac{m_m}{m_n} = \lambda^3, \quad \frac{c_m}{c_n} = \lambda^2.$$

де $\lambda = \frac{l_m}{l_n}$ – геометричний масштаб моделі;

m_m і m_n маса моделі та натурного середнього колосника відповідно;

c_m і c_n відповідні жорсткості опорної системи моделі та натурного об'єкта.

Інтенсивність ударної взаємодії оцінювали через енергію та швидкість перед ударом:

$$E = mgh, \quad v = \sqrt{2gh}.$$

Для порівняння режимів із різними масами та висотами падіння введено нормовану енергію удару:

$$e_i = \frac{E_i}{E_{\max}} = \frac{m_i h_i}{m_{\max} h_{\max}}.$$

За базовий режим основної серії прийнято падіння вантажу масою 250 г з висоти 50 см, для

якого $E_{\max} = 1,226$ Дж і $e_i = 1,00$. Модель 1 виконана у вигляді сталевго пустотілого профілю довжиною 364 мм із зовнішніми розмірами поперечного перерізу 20·40 мм і товщиною стінки 2 мм. Відстань між осями опор становила 295 мм, маса балки – 0,55 кг. Модель 2 виконана у вигляді сталевго пустотілого профілю довжиною 566 мм із зовнішніми розмірами 41·41 мм та товщиною стінки 2 мм; відстань між осями опор становила 450 мм, маса балки – 1,85 кг (табл. 1).

Реєстрація коливального процесу здійснювалася за допомогою п'єзоелектричного акселерометра КД-35, сигнал з якого надходив до вимірювального комплексу Robotron 00032 з подальшим цифровим записом у програмному середовищі Sound Forge (рис. 1). Датчик встановлювався на балці жорстким різьбовим кріпленням, а вісь його встановлення була розташована на відстані 125 мм від торця балки. Оцифрування сигналу виконувалося з частотою дискретизації 44,1 кГц, розрядністю 16 біт у моноканальному режимі. Під час дослідів вимірювальний тракт працював у режимі ξ_{10} тобто усі зареєстровані сигнали аналізувалися у відносних одиницях вимірювального каналу, що відповідали відсоткам від повної шкали вихідного сигналу вимірювального тракту. Такий підхід дозволив порівнювати між собою різні режими навантаження за однакових налаштувань вимірювальної системи без переходу до

абсолютних значень переміщення або прискорення. Основну увагу при подальшій обробці приділено початковій фазі ударного відгуку, оскільки саме вона найбільш повно характеризує короточасну взаємодію падаючого тіла з балковою моделлю. Для цього з кожної осцилограми визначали максимальний додатний пік, максимальний від'ємний пік, розмах першого ударного імпульсу та середньоквадратичне значення сигналу на вибраному інтервалі аналізу.

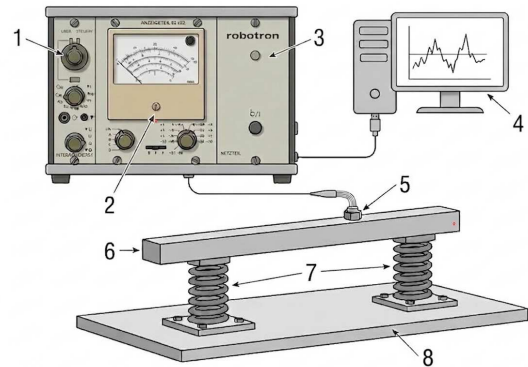


Рисунок 1 – Принципова схема експериментального стенда та вимірювального тракту:

1 – інтегруючий підсилювач 00028; 2 – блок індикації 02022; 3 – блок живлення 04003; 4 – персональний комп'ютер; 5 – акселерометр КД-35; 6 – балкова модель; 7 – пружні опори; 8 – опорна плита стенда

Таблиця 1 – Основні параметри масштабних моделей середнього колосника

Модель	Маса балки, кг	Жорсткість 1 пружини, Н/м	Кількість пружин	Еквівалентна жорсткість, Н/м	Масштаб
Модель 1	0,55	7205	2	14410	~1:12,9
Модель 2	1,85	16230	2	32460	~1:8,6

Ударне навантаження створювали шляхом вільного падіння вантажів масою 50 і 250 г з фіксованих висот. Основний кількісний аналіз для моделі 1 виконано для висот 6, 12, 24 і 50 см. Для пружно опертої балки моделі 1 при масі ударного тіла 250 г додатково проведено окрему серію дослідів за наявності шару піщаної присипки товщиною 0,25 та 0,5 см.

Первинними величинами, які зчитувалися з осцилограм, були максимальне додатне значення відносного сигналу S_{\max} максимальне від'ємне значення S_{\min} , розмах першого ударного імпульсу S_{p-p} та середньоквадратичне значення сигналу S_{RMS} . Розмах першого ударного імпульсу визначали як:

$$S_{p-p} = S_{\max} - S_{\min}.$$

Оскільки мінімальний пік у більшості дослідів має від'ємне значення, цей самий розмах можна подати у вигляді:

$$S_{p-p} = S_{\max} + |S_{\min}|.$$

Величини S_{\max} , S_{\min} , S_{p-p} та S_{RMS} подаються у відсотках від повної шкали вихідного сигналу вимірювального тракту (%FS) при фіксованих налаштуваннях. Ці величини не є абсолютними переміщеннями або прискореннями, тому використовуються як відносні характеристики зареєстрованого сигналу.

Для нормування відгуку балки введено безрозмірний коефіцієнт:

$$P_{p-p,i}^* = \frac{S_{p-p,i}}{S_{p-p,ref}}.$$

У головній порівняльній серії моделі 1 без піщаної присипки прийнято $S_{p-p,ref} = 116,02$ %FS, тобто найбільше середнє значення розмаху першого ударного імпульсу в

сукупності дослідів статичної та пружно опертої балки.

Для прямого зіставлення статичної та пружно опертої балки використано коефіцієнт:

$$K_{p-p} = \frac{S_{p-p,np}}{S_{p-p,cm}}$$

Якщо $K_{p-p} > 1$, більший розмах першого ударного імпульсу має пружно оперта балка; якщо $K_{p-p} < 1$, більший розмах має статична балка.

Для оцінювання демпфувальної дії шару піщаної присипки використано відносний коефіцієнт:

$$q_{p-p} = \frac{S_{p-p,шар}}{S_{p-p,0}}$$

де $S_{p-p,0}$ – розмах першого ударного імпульсу без присипки при тій самій висоті падіння;

$S_{p-p,шар}$ – відповідне значення за наявності шару піщаної присипки.
та коефіцієнт зниження розмаху першого ударного імпульсу:

$$\eta_{p-p} = (1 - q_{p-p}) \cdot 100\%$$

де $S_{p-p,0}$ – розмах першого ударного імпульсу без присипки при тій самій висоті падіння,

$S_{p-p,sand}$ – відповідне значення за наявності шару піщаної присипки.

Результати та обговорення. Порівняння статичної та пружно опертої балки. Для статичної балки зареєстровано відносно регулярний ударно-затухаючий процес, що характеризується коротким початковим піком, наступною протилежною напівхвилею та подальшим затуханням коливань. Для пружно опертої балки перехідний процес є складнішим: податливість опор змінює не лише рівень відгуку, а й форму сигналу, що проявляється в асиметрії напівхвиль, локальному відскоку та повторному контакті в окремих реалізаціях.

Узагальнене порівняння статичної та пружно опертої балки за нормованим розмахом першого ударного імпульсу наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння статичної та пружно опертої балки моделі 1 за нормованим розмахом першого ударного імпульсу P_{p-p}^*

Маса, г	h , см	e_i	$S_{p-p,cm}$, %FS	$S_{p-p,np}$, %FS	$P_{p-p,cm}^*$	$P_{p-p,np}^*$	K_{p-p}
50	6	0,024	67,35	58,55	0,58	0,50	0,87
50	12	0,048	91,35	87,65	0,79	0,76	0,96
50	24	0,096	100,36	97,62	0,87	0,84	0,97
50	50	0,200	110,82	110,07	0,96	0,95	0,99
250	6	0,120	74,16	70,10	0,64	0,60	0,95
250	12	0,240	98,00	95,32	0,84	0,82	0,97
250	24	0,480	105,40	103,11	0,91	0,89	0,98

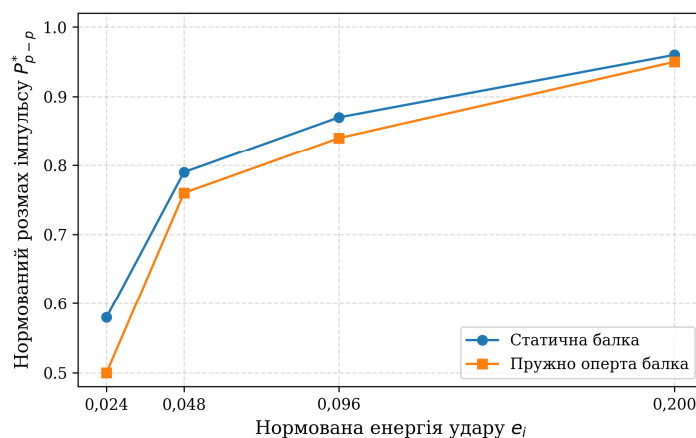


Рисунок 2 - Залежність нормованого розмаху першого ударного імпульсу від нормованої енергії удару e_i для статичної та пружно опертої балки при масі ударного тіла 50 г.

Дані табл. 2 та рис. 2, 3 свідчать, що зі збільшенням нормованої енергії удару e_i для

обох схем опирання загалом зростає нормований розмах першого ударного імпульсу P_{p-p}^* . Це підтверджує фізично очікувану залежність між інтенсивністю ударного навантаження та початковою реакцією балкової моделі. Разом із тим у всіх розглянутих режимах значення K_{p-p} є меншими за 1, що свідчить про зниження розмаху першого імпульсу при переході від статичної схеми до пружно опертої. Такий результат пояснюється тим, що частина енергії удару в пружно опертій системі витрачається не лише на локальну деформацію балки, а й на переміщення та деформування опорної системи. Тому пружне опирання змінює характер початкової ударної взаємодії та сприяє певному пом'якшенню першої

реакції балки.

Для вантажу масою 50 г значення K_{p-p} перебувають у межах 0,87-0,99. Отже, у всіх розглянутих режимах пружно оперта балка має менший нормований розмах першого ударного імпульсу порівняно зі статичною. Найбільше відносне зниження зафіксовано при висоті 6 см, де $K_{p-p} = 0,87$. Для вантажу масою 250 г значення K_{p-p} перебувають у межах 0,95-0,98. Це означає, що пружно оперта балка також має менший розмах першого ударного імпульсу, однак різниця між схемами є менш вираженою, ніж для вантажу 50 г при малій висоті падіння.

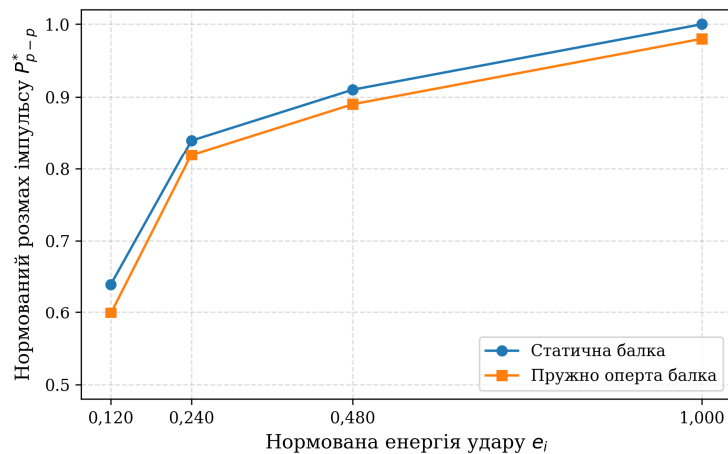


Рисунок 3 - Залежність нормованого розмаху першого ударного імпульсу P_{p-p}^* від нормованої енергії удару e_i для статичної та пружно опертої балки при масі ударного тіла 250 г.

Таким чином, перехід від окремих максимальних або мінімальних значень сигналу до повного розмаху першого імпульсу S_{p-p} дозволив представити результати експерименту у формі, яка безпосередньо характеризує початкову ударну реакцію балки та прямо пов'язана з нормованою енергією удару.

Додаткова верифікаційна серія для моделі 2.

Для другої, більш масивної моделі з жорсткішими опорами проведено додаткову перевірочну серію дослідів при масі ударного тіла 250 г. Для цієї допоміжної серії нормування виконано відносно максимального середнього значення розмаху першого імпульсу, зафіксованого саме для моделі 2: $S_{p-p,ref,2} = 110,90 \%FS$. Результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Узагальнені результати для пружно опертої балки моделі 2 при масі ударного тіла 250 г

h см	e_i	$S_{p-p} \pm s_{p-p}$, %FS	P_{p-p}^*	$S_{RMS} \pm S_R$, %FS
6	0,120	97,40±18,58	0,88	14,93±2,23
12	0,240	101,90±29,06	0,92	15,26±4,19
17	0,340	102,10±21,33	0,92	15,76±3,50
23	0,460	102,97±26,26	0,93	15,90±3,38
50	1,000	110,90±5,40	1,00	16,96±0,37

Модель 2 має допоміжний верифікаційний характер. Отримані результати підтверджують, що після удару формується затухаючий перехідний

процес, характерний для досліджуваної балкової системи. Водночас залежність нормованого розмаху імпульсу від e_i дає локальне

розсіювання, що пов'язано з особливостями контакту, точкою прикладання удару та взаємодією балки з опорною системою.

Вплив шару піщаної присипки. Окрему увагу приділено дослідженню впливу піщаної присипки як проміжного контактної-податливого середовища. Такий шар якісно моделює утворення на колосниках локальної підсипки дрібної фракції

матеріалу, яка може формуватися внаслідок руйнування та розсіювання шматка при ударі. Для оцінювання цього ефекту проведено окрему серію дослідів для пружно опертої балки моделі 1 при масі ударного тіла 250 г. Порівнювались режими без присипки та за наявності шару піщаної присипки товщиною 0,25 і 0,5 см (табл. 4).

Таблиця 4 – Узагальнені результати для пружно опертої балки моделі 1 при наявності шару піщаної присипки за критерієм S_{p-p} вантаж 250 г

Товщина шару, см	h см	e_i	$S_{p-p} \pm s_{p-p}$, FS	q_{p-p}	η_{p-p} , %
без присипки	12	0,24	95,32±8,79	1,00	0,0
без присипки	24	0,48	103,11±7,81	1,00	0,0
без присипки	50	1,00	113,12±5,54	1,00	0,0
0,25	12	0,24	16,06±4,59	0,17	83,1
0,25	24	0,48	20,83±6,54	0,20	79,8
0,25	50	1,00	78,94±25,77	0,70	30,2
0,5	12	0,24	4,36±2,40	0,05	95,4
0,5	24	0,48	16,22±6,78	0,16	84,3
0,5	50	1,00	21,64±8,97	0,19	80,9

Аналіз табл. 4 показує, що наявність шару піщаної присипки істотно впливає на розмах першого ударного імпульсу. При товщині шару 0,25 см коефіцієнт зниження η_{p-p} становить 83,1 % при $e_i = 0,24$, 79,8 % при $e_i = 0,48$ і 30,2 % при $e_i = 1,00$. Отже, для малих і середніх енергій удару шар 0,25 см забезпечує виражене зниження імпульсного відгуку, однак при найбільшому навантаженні його демпфувальна дія зменшується.

Більш стабільний демпфувальний ефект отримано для шару піщаної присипки товщиною 0,5 см. Для цього шару коефіцієнт η_{p-p} становить 95,4 % при $e_i = 0,24$, 84,3 % при $e_i = 0,48$ і 80,9 % при $e_i = 1,00$. Це свідчить про те, що збільшення товщини контактної-податливого шару підвищує здатність системи знижувати інтенсивність першого ударного імпульсу (рис. 4).

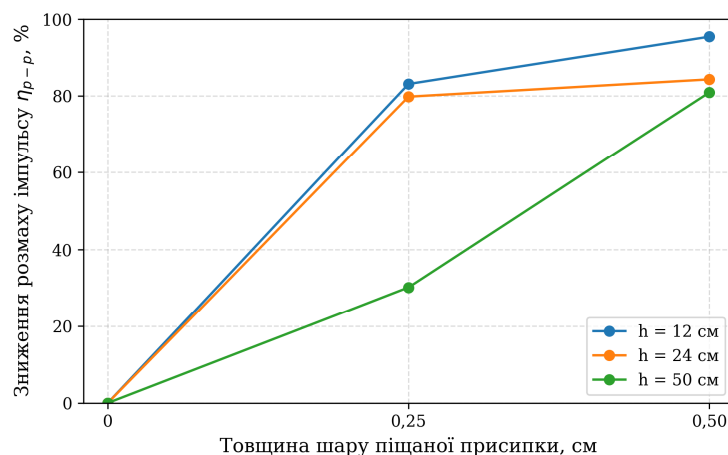


Рисунок 4 – Вплив товщини шару піщаної присипки на коефіцієнт зниження розмаху першого ударного імпульсу η_{p-p} .

Окремо слід зазначити, що для шару 0,25 см при висоті падіння 50 см спостерігається значне

стандартне відхилення $s_{p-p} = 25,77$ %FS. Це пояснюється нерівномірністю контактної

взаємодії вантажу з шаром сипкого матеріалу: окремі удари можуть відбуватися через більш ущільнену або більш розпушену ділянку шару, що спричиняє помітний розкид значень S_{p-p} (рис. 5).

Накладене порівняння осцилограм якісно показує зменшення пікових відхилень, пом'якшення початкової фази контакту та зміну

тривалості затухання за наявності проміжного шару сипкого матеріалу. Водночас коефіцієнт η_{p-p} не повністю описує зміну форми самого перехідного процесу, тому кількісний аналіз доцільно доповнювати візуальним зіставленням характерних реалізацій сигналу.

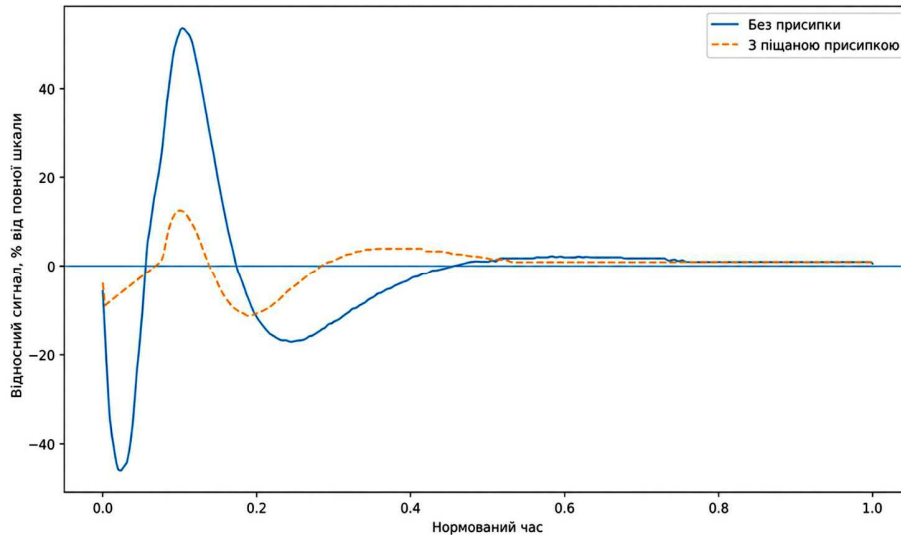


Рисунок 5 – Накладене порівняння осцилограм без присипки та за наявності піщаної присипки

Зіставлення результатів із теоретичною моделлю. Побудована в попередніх дослідженнях математична модель описує середній колосник як елемент зосередженої маси на лінійно-пружних опорах, для якого ударне навантаження в першому наближенні розглядається як короткочасний імпульсний вплив. Експериментальні серії підтвердили, що після удару балкова модель формує ударно-затухаючий перехідний процес, тобто саме ту загальну структуру руху, яку передбачає розрахункова схема.

Використання нормованої енергії удару e_i показало, що зі збільшенням інтенсивності ударного навантаження загалом зростає нормований розмах першого ударного імпульсу P_{p-p}^* . Водночас ця залежність не є строго лінійною, що пояснюється локальними особливостями контакту, розсіюванням точки удару, частковим відскоком та взаємодією балки з опорною системою.

Порівняльний аналіз статичної та пружно опертої балки за критерієм K_{p-p} показав, що податливість опор істотно впливає на розмах першого ударного імпульсу та форму перехідного процесу. Досліди з піщаною присипкою показали, що контакт-податливий шар може істотно змінювати початковий ударний відгук системи. Це вказує на доцільність подальшого уточнення математичної моделі з урахуванням контактної податливості проміжного шару матеріалу.

Висновки.

1. Розроблено та реалізовано

експериментальний стенд для фізичного моделювання нестационарного ударного режиму роботи середнього колосника грохота-перевантажувача на двох масштабно узгоджених балкових моделях.

2. Для аналізу початкового ударного відгуку як основний критерій прийнято розмах першого ударного імпульсу S_{p-p} , який визначається як різниця між максимальним додатним і максимальним від'ємним піками осцилограм. На відміну від окремих значень S_{\max} або S_{\min} , цей показник враховує повну зміну сигналу в початковій фазі ударної взаємодії.

3. Для усунення неоднозначності, пов'язаної з вимірюванням сигналу у відсотках шкали вимірювального тракту, введено нормовану енергію удару e_i та безрозмірні коефіцієнти відгуку P_{p-p}^* , K_{p-p} , q_{p-p} і η_{p-p} .

4. Встановлено, що ударний відгук балкових моделей має виражений нестационарний ударно-затухаючий характер, який змінюється залежно від нормованої енергії удару, маси вантажу та схеми опирання балки.

5. Порівняльний аналіз за коефіцієнтом K_{p-p} показав, що для всіх досліджених режимів $K_{p-p} < 1$, тобто пружно оперта балка має менший розмах першого ударного імпульсу порівняно зі статичною. Найбільше зниження зафіксовано для вантажу 50 г при висоті 6 см, де $K_{p-p} = 0,87$.

6. Досліди з піщаною присипкою показали, що шари 0,25 і 0,5 см зменшують розмах першого

ударного імпульсу S_{p-p} та пом'якшують початкову фазу контакту. Найбільш стабільний ефект отримано для шару 0,5 см, для якого коефіцієнт зниження η_{p-p} становить 95,4 % при $e_i = 0,24, 84,3$ % при $e_i = 0,48$ і 80,9 % при $e_i = 1,00$.

7. Отримані результати підтверджують коректність спрощеної математичної моделі на якісному рівні, оскільки експериментально відтворено ударно-затухаючий характер перехідного процесу та загальну залежність розмаху імпульсу від енергії удару. Разом з тим експеримент окреслює режими, для яких у подальшому доцільно враховувати складнішу контактну взаємодію, часткову пружність удару, повторний контакт і наявність проміжного шару матеріалу.

Список літератури/ References (transliterated)

1. Franchuk, V. P., Antsiferov, O. V., & Havrylenko, S. S. (2025). Dynamics of a balanced screen-loader with an eccentric drive. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 80, 177–189. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.177>
2. Casaburo, A., Petrone, G., Franco, F., & De Rosa, S. (2019). A review of similitude methods for structural engineering. *Applied Mechanics Reviews*, 71(3), 030802. <https://doi.org/10.1115/1.4043787>
3. Mazzariol, L. M., & Alves, M. (2019). Similarity laws of structures under impact load: Geometric and material distortion. *International Journal of Mechanical Sciences*, 157–158, 633–647. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.011>
4. Krot, P., Shiri, H., Dąbek, P., & Zimroz, R. (2023). Diagnostics of bolted joints in vibrating screens based on a multi-body dynamical model. *Materials*, 16(17), 5794. <https://doi.org/10.3390/ma16175794>
5. Long, H., Huang, C.-Z., & Li, D.-C. (2024). Dynamic analysis of beam structure of linear vibrating screen. *AIP Advances*, 14(1), 015101. <https://doi.org/10.1063/5.0182353>
6. Zhang, H., Zheng, X., & Jing, W. (2024). Numerical investigation on dynamic response of the screen mesh in vibrating screening through DEM-FEM co-simulation. *Particuology*, 87, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.08.013>
7. Xu, N., Wang, X., Lin, D., & Zuo, W. (2024). Numerical simulation and optimization of screening process for vibrating flip-flow screen based on discrete element method–finite element method–multi-body dynamics coupling method. *Minerals*, 14(3), 278. <https://doi.org/10.3390/min14030278>
8. Lin, D., Wang, X., Xu, N., Zuo, W., & Liang, Z. (2024). A Method for Stabilizing the Vibration Amplitude of a Flip-Flow Vibrating Screen Using Piecewise Linear Springs. *Minerals*, 14(4), 406. <https://doi.org/10.3390/min14040406>
9. Badri, Y., Dodd, G., Cater, J., Hall, A., Schmid, G., Emms, G., & Calius, E. (2024). Review of granular material damping and sound absorption for possible application in the sound insulation of lightweight floors. *Journal of Building Engineering*, 97, 110881. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110881>
10. Avdić, S., Nagode, M., Klemenc, J., & Oman, S. (2024). Experimental evaluation of a granular damping element. *Polymers*, 16(10), 1440. <https://doi.org/10.3390/polym16101440>
11. Li, R. W., Meng, S. B., Chen, Y., Wu, H., & Zhou, Y. D. (2025). Influence of sand cushion on rockfall-impact resistance of RC sheds. *Engineering Structures*, 331, 119992. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119992>
12. Naito, N., Maeda, K., Konno, H., Ushiwatari, Y., Suzuki, K., & Kawase, R. (2023). Loading rate dependence of granular cushion under rockfall impact and proposal of an analytical model for impact force estimation. *Acta Geotechnica*, 18, 1463–1477. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01641-2>

Надійшла (received) 27.04.2026

Стаття прийнята до друку 20.05.2026

Опублікована 29.05.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Гавриленко Станіслав Сергійович / Havrylenko Stanislav – аспірант кафедри інжинірингу та дизайну в машинобудуванні Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна; тел.: 0951282800; e-mail: Havrylenko.St.S@nmu.one