**Ковтун А.В.**

к.т.н., доцент

Купін С.П.

старший викладач

Желновач О.О.

старший викладач

**Національна академія
Національної гвардії
України****Kovtun A.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Kupin S.**

Senior Lecturer

Zhelnovach O.

Senior Lecturer

**National Academy of
National Guard of Ukraine****УДК 629.076:623.426****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-4**

ВІБРАЦІЙНЕ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВКЛАДЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті досліджено механізм вібраційного переміщення вкладених конструкцій в замкнутих об'ємах (трубах). Вкладеними називаються конструкції, одні складові елементи яких розташовані усередині інших і пов'язані між собою мінімум по двом протилежним поверхням силами сухого тертя. Такі конструкції часто зустрічаються в сучасній техніці: транспортування довгомірних вантажів, кріплення хомутами трубопроводів, гальмівні пристрої вантажопідйомних машин та інше. Розглянуто особливості руху вкладених конструкцій в замкнутих об'ємах (трубах) у випадку, коли на внутрішній елемент діє гармонійна сила, яка направлена перпендикулярно його поєздовжній осі. Проаналізовані умови початку руху внутрішнього елемента вкладеної конструкції відносно зовнішнього (труби).

На основі методу математичного моделювання запропонована система рівнянь, що описує рух внутрішнього елемента вкладеної конструкції відносно зовнішнього елемента при дії вимушених коливань. Отримана нова залежність з визначення моменту тертя між опорами внутрішнього елемента та зовнішнім циліндром при дії гармонійної зовнішньої сили.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість вібраційного переміщення внутрішнього елемента вкладеної конструкції (консольне закріплення стрижня в циліндричній основі) вздовж зовнішнього елемента вкладеної конструкції (циліндру) при прикладанні зовнішньої сили лише до внутрішнього елемента конструкції.

Крім того, експериментальні дослідження з виявлення кількісної залежності величини вібраційної сили, що виникає при русі внутрішнього елемента вкладеної конструкції відносно зовнішнього елемента (циліндру) при дії вібрації на внутрішній елемент, від величини сили сухого тертя між внутрішнім та зовнішнім елементами дозволили оцінити вплив сил тертя між елементами на величину вібраційної сили, що виникає при русі внутрішнього елемента вкладеної конструкції відносно зовнішнього.

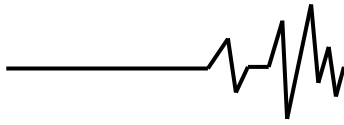
Отримані результати можуть бути використані при створенні вібраційних систем для переміщення вантажів на відстані, що перевищують можливості сучасних вібраційних систем.

Ключові слова: вібраційне переміщення, вкладені конструкції, сила сухого тертя, внутрішній елемент, циліндр.

Постановка проблеми. Одним з напрямків забезпечення воєнної безпеки України є підтримання якісного стану Збройних Сил держави, їх бойової готовності на рівні, що гарантує надійний захист інтересів України. Бойова готовність військ залежить від багатьох факторів, одним з яких є своєчасне і повне логістичне забезпечення дій формувань Збройних Сил.

Одним із завдань логістичного забезпечення є функція планування та здійснення виробництва ОВТ[1].

Сучасне виробництво базується на поточному методі з широким використанням транспортуючих ліній [2]. Поточний метод виробництва заснований на конвеєрній передачі виробів від однієї технологічної операції до іншої



(необхідні операції послідовно виконуються на конвеєрі, що рухається). Одним з можливих видів поточкових ліній є вібраційні транспортуючі машини. Перевагами транспортуючих вібраційних машин є:

- можливість повної герметизації (в трубах) транспортування отруйних вантажів, а також тих вантажів, що пилять;
- можливість виконання спільно з транспортуванням інших технологічних операцій;
- низький знос вантажо-несучого органу.

Вібраційні конвеєри є одними з засобів комплексної механізації транспортних і вантажно-розвантажувальних робіт, з суміщенням інших технологічних операцій. Робота вібраційних конвеєрів ґрунтується на відомому ефекті вібраційного переміщення. Ефект вібраційного переміщення - створення спрямованого в середньому руху виробів за рахунок не напрямлених в середньому (коливальних) впливів [3-5].

Для отримання ефекту вібраційного переміщення необхідна та чи інша асиметрія механічної системи. Виділяють наступні види асиметрії: силову, кінематичну, структурну (конструктивну), хвильову та початкову (пов'язану з початковими умовами руху). Можливо також одночасне поєднання декількох видів асиметрії [5,6].

Вібраційний конвеєр, в загальному випадку, являє собою відкритий або закритий герметичний жолоб або трубу, що підвішені на опорній конструкції. Жолобу (трубі), за допомогою збудника коливань, повідомляється зворотно-поступальний рух, в результаті якого вантаж, що знаходиться в жолобі, робить короткі переміщення з певною швидкістю. Характер переміщення вантажу залежить від режиму руху жолобу (труби), типу опорних пристроїв, внутрішніх опорів коливальної системи та зовнішніх навантажень [2].

Процес вібраційного переміщення виробів складається з низки етапів, що чергуються:

- розгону;
- спільного руху виробів з жолобом (трубою);
- вільного польоту;
- гальмування.

Режими вібраційного переміщення визначають:

- амплітуда коливань;
- частота коливань;
- кут нахилу робочого органу;
- кут нахилу та форма траєкторії коливань, тощо.

У результаті виріб по робочому органу машини рухається з мікро кидками під дією спрямованих коливань (під кутом $20...35^\circ$) до осі робочого органу (труби) у заданому напрямку.

Це - прогресивний, економічно вигідний вид транспорту, який використовують для транспортування вантажів, що піддаються

передачі по трубах, у межах виробничого підприємства для продовження технологічного процесу. Для нього властиві [7]:

- проста конструкція;
- відсутність забруднення переміщуваного матеріалу сторонніми речовинами;
- відсутні втрати матеріалу;
- вантажо несучий орган практично не схильний до зношування навіть при транспортуванні абразивних матеріалів;
- можливість суміщення процесу переміщення матеріалу з технологічними операціями.

Вібраційний транспорт вже набув широкого розповсюдження на ряді виробництв. Вібраційні транспортні пристрої почали застосовувати на гірничозбагачувальних підприємствах при відділенні руди від порожньої породи, в харчовій промисловості при очищенні продовольчого і насінневого зерна і т. інш. [8-11].

Разом з тим не вичерпується потік нових ідей і пропозицій щодо розвитку вібраційних транспортних пристроїв. Наприклад, пристрій для вертикального переміщення виробу (рис.1) [12].

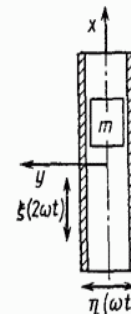
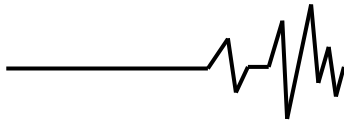


Рис. 1. Пристрій для вертикального переміщення виробу

Вібруючий орган виконаний у вигляді труби, якій надають поздовжні і поперечні коливання, причому частота поздовжніх коливань удвічі більша частоти поперечних коливань ω . При належній фазировці коливань поздовжня сила інерції, що діє на виріб в його відносному русі, спрямована вгору якраз в ті проміжки часу, коли виріб найменше притиснутий до стінок труби дією поперечної сили інерції. В проміжку часу, коли поздовжня сила інерції направлена вниз, виріб найбільш сильно притиснутий до стінок труби. В результаті виникає вібраційна сила, що забезпечує направлений рух уверх, проти дії сили тяжіння.

Однак, недоліком розглянутої конструкції є те, що вібрація прикладається до всієї труби з виробами, під кутом нахилу від 20 до 40° , а у пристрої для вертикального переміщення виробу (під кутом нахилу 90°), після виключення вібраторів, виріб (внутрішнє тіло), під дією сили ваги, падає вниз.

Теоретичний базис напрямку застосування вібрації до переміщення виробів сформувався на



стику наук: теоретичної механіки, теорії механізмів і машин, теорії коливань, теорії вібраційних процесів [4-6,12]. Значні розділи теорії вібраційних процесів відносяться до області нелінійної механіки, нелінійної теорії коливань і хвиль [12]. Увага до питань вібраційного переміщення акцентується при розгляді окремих завдань динаміки машин. Вібраційні процеси різноманітні, так само як і форми впливу на динамічний стан технічних об'єктів. Поява нових конструктивно-технічних рішень, розробка нових класів машин, до числа яких можна віднести робототехнічні пристрої різного призначення, ініціюють розширення напрямків досліджень. В цьому плані важливими є процеси контактної взаємодії твердих тіл [13]. Такі процеси досліджуються як віброударні, що знаходять вираз у розробці технічних додатків, пов'язаних з підвищенням надійності деталей, що працюють в умовах інтенсивного динамічного навантаження.

Крім того, перспективними є процеси оптимального управління новим класом мобільних механізмів (роботів), здатних переміщатися в середовищах, що чинять опір без спеціальних рушіїв (коліс, гусениць). Такі роботи складаються з корпусу, що взаємодіє із зовнішнім середовищем, і рухливо з'єднаних з ним вкладених виробів. Рух цих виробів відносно корпусу характеризує внутрішні ступені свободи робота. Такі вироби називаються внутрішніми. Внутрішні вироби взаємодіють з корпусом за допомогою сил, що створюються приводами. Додавання сили до внутрішнього виробу викликає силу реакції, яка діє на корпус, змінюючи його швидкість, що тягне зміну сили опору середовища руху корпусу. Таким чином, керуючи рухом внутрішніх виробів, можна керувати зовнішньою силою, що діє на корпус і, як наслідок, рухом системи, як цілого. Даний принцип руху доцільний для мобільних міні і мікророботів. Корпус цих роботів може бути зроблений герметичним і гладким, що не містить виступаючих деталей, який дозволяє використовувати їх для неруйнуючої інспекції технічних об'єктів, таких як трубопроводи. Мобільні системи, що переміщуються, які чинять опір в середовищі за рахунок руху внутрішніх виробів, привертають увагу не тільки фахівців з робототехніки, але також дослідників і інженерів в областях вібраційної і точної механіки. В багатьох випадках вібраційний вплив розглядається як фактор впливу на стан взаємодіючих сторін. У меншому ступені досліджені особливості зв'язків тертя, які характерні для технологічних процесів вібропереміщення, віброзміцнення, вібраційного транспортування, пов'язані з контактом вкладених виробів і виникаючих при цьому ефектів.

Вкладеними будемо називати конструкції, одні складові елементи яких розташовані усередині інших і пов'язані між собою мінімум по двом протилежним поверхням силами сухого тертя. Такі конструкції часто зустрічаються в сучасній техніці: транспортування довгомірних вантажів, кріплення

хомутами трубопроводів, гальмівні пристрої вантажопідіймних машин та т.інш.

Визначення властивостей вкладених конструкцій вимагає створення науково-дослідного інструменту для вивчення процесу взаємодії елементів вкладених конструкцій при динамічних навантаженнях, що є актуальною науково-прикладною задачею.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження механізму вібраційного переміщення вкладених конструкцій в замкнутах об'ємах (трубах).

Рішення задачі. Дослідження впливу вібраційного навантаження на динамічні властивості елементів вкладених конструкцій проведемо з урахуванням того факту, що вкладені конструкції відносяться до нелінійних механічних систем, в яких не лінійність обумовлена наявністю сил сухого тертя. Тому незважаючи на те, що ряд прикладних задач теорії механічних коливань, при визначенні припущеннях, може бути вирішено в лінійній постановці, для дослідження динаміки вкладених конструкцій лінійна постановка неприпустима. Основна складність рішення задач теорії коливань при наявності сил типу сухого тертя обумовлена не аналітичністю їх характеристик, диференціальні рівняння руху на окремих етапах записуються в різній аналітичній формі. Як правило, на кожному етапі рівняння достатньо легко інтегруються. Головною складністю являється пошук моментів переходу від одного етапу руху до іншого. Загальні закономірності впливу вібрації на динамічну поведінку нелінійних механічних систем повинні знайти відображення і при коливаннях вкладених конструкцій.

На рис. 2 представлена схема одно масової моделі вкладеної конструкції, розміщеної між двома шорсткими площинками: верхньою 1 і нижньою 2.

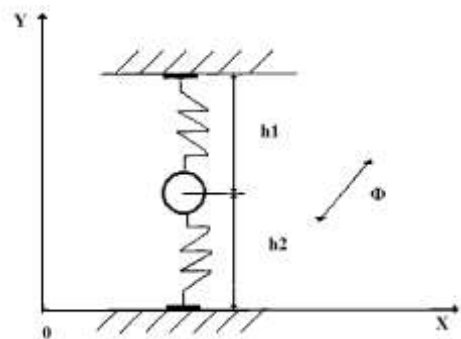
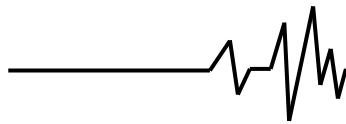


Рис. 2. Схема вібраційного переміщення одно масової моделі вкладеної конструкції

Математична модель руху маси m в проєкціях на осі координат XOY , пов'язані з вібруючими площинками, буде мати наступний вид:



$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \cdot \cos \beta + F_1 + F_2 \\ m \cdot \ddot{y} = m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \cdot \sin \beta - N_1 - m \cdot g + N_2. \end{cases}$$

$$F_1 = \begin{cases} -f_1 \cdot N_1 \text{ при } \dot{x} > 0 \\ f_1 \cdot N_1 \text{ при } \dot{x} < 0 \\ f_{10} \cdot N_1 \text{ при } \dot{x} = 0 \end{cases}$$

$$F_2 = \begin{cases} -f_1 \cdot N_2 \text{ при } \dot{x} > 0 \\ f_1 \cdot N_2 \text{ при } \dot{x} < 0 \\ f_{10} \cdot N_2 \text{ при } \dot{x} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де F_1 – сила тертя між верхньою опорою і верхньою площиною, Н;

F_2 – сила тертя між нижньою опорою і нижньою площиною, Н;

N_2 – нормальна реакція між нижньою опорою і нижньою площиною, Н;

N_1 – нормальна реакція між верхньою опорою і верхньою площиною, Н;

$\ddot{x}$ – прискорення маси m вздовж осі X , м/с²;

$\ddot{y}$ – прискорення маси m вздовж осі Y , м/с²;

h_1, h_2 – відстані від площин до маси m , м;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

$\dot{x}$ – швидкість руху маси m вздовж осі x , м/с;

ω – частота дії зовнішньої сили Φ , Гц;

A – амплітуда вимушених коливань, м;

β – кут дії зовнішньої сили Φ , град.;

t – час, с;

f_1 – ефективний коефіцієнт сухого тертя руху між опорами маси m і шорсткими площинками;

f_{10} – ефективний коефіцієнт сухого тертя покою між опорами маси m і шорсткими площинками.

Записана система рівнянь є нелінійною системою звичайних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами, яка допускає числове інтегрування. Аналіз системи дозволяє описати процес, що відбувається. Розглянемо дію сил, починаючи з моменту $t = 0$, коли сила інерції дорівнює нулю, а потім починає зростати по абсолютній величині, будучи направлена вперед (в напрямку осі X) вгору (діє сила Φ). На протязі першої половини періоду, поки $0 < t < \pi/\omega$, горизонтальна складова сили інерції направлена вздовж осі X , прагне зрушити масу m вправо. Цьому сприяє вертикальна складова сили інерції, яка віднімаючись із ваги, зменшує нормальну реакцію N_2 на величину $m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \beta$ і, тим самим, зменшує модуль сили тертя F_2 . При цьому, на ту ж величину зростає сила тертя F_1 . Нормальні реакції в цьому випадку визначаються за допомогою виразу:

$$\begin{aligned} N_2 &= k \cdot (\Delta y_2 - y) + m \cdot g - m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \cdot \sin \beta; \\ N_1 &= k \cdot (\Delta y_1 - y) + m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \cdot \sin \beta; \end{aligned} \quad (2)$$

де $\Delta y_1, \Delta y_2$ – величина попереднього підтискання верхнього і нижнього пружних елементів моделі, м;

k – жорсткість пружних елементів моделі, Н/м.

В результаті цього горизонтальна складова сили інерції

$m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos \beta$ на плечі h_1

створить момент, який направлений проти часової стрілки. Сила тертя F_2 на плечі $(h_1 + h_2)$ створить момент, який перешкоджає повороту внутрішнього елемента конструкції. При виконанні умови

$F_2 \cdot (h_1 + h_2) = h_1 \cdot m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos \beta$, пройде зміщення нижньої (2) опори в позитивному напрямку осі X .

На протязі другої половини періоду, коли $\pi/\omega < t < 2\pi/\omega$, сила інерції направлена в зворотній бік і її горизонтальна складова намагається зрушити масу m вліво. При цьому вертикальна складова сили інерції зменшує нормальну реакцію N_1 та збільшує нормальну реакцію N_2 . Сила тертя F_1 зменшується, сила тертя F_2 збільшується. Горизонтальна складова сили інерції на плечі h_2 створює момент, який направлений за часовою стрілкою. Сила тертя F_1 на плечі $(h_1 + h_2)$ створює момент, який здійснює спротив повороту внутрішнього елемента конструкції. При виконанні умови $F_1 \cdot (h_1 + h_2) = h_2 \cdot m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos \beta$, пройде зміщення верхньої (1) опори в негативному напрямку осі X .

В результаті направлене в середньому переміщення внутрішнього елемента вкладеної конструкції у вигляді маси m на пружних опорах відносно шорстких площин не відбудеться. Таким чином, на відміну від класичної задачі руху тіла по вибруючій шорсткій площині, необхідною і достатньою умовою вібро переміщення якої є наявність сили тертя між точкою і площиною, яка підкоряється закону Кулона, і не симетрії збудження (відмінність кута вібрації від $\pi/2$ і від 0), ці умови не призводять до вібраційного переміщення елементарної вкладеної конструкції (маси, пов'язаної пружними опорами з двома шорсткими паралельними площинками). Для здійснення процесу вібраційного переміщення елементів вкладених конструкцій відносно один одного обов'язковою умовою є наявність конструктивної асиметрії моделі.

Розглянемо процес вібраційного переміщення вкладеної конструкції, схема якої наведена на рис.3.

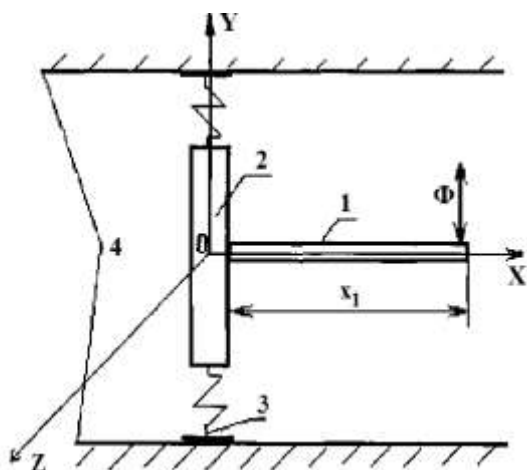
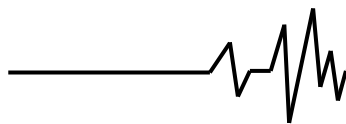


Рис. 3. Схема вкленої конструкції консольного типу

На рис. 3 представлена вклена конструкція, яка складається з консольного стрижня 1 з закріпленням у основі 2 кінцем. Основа балки 2 за допомогою опор 3 пов'язана силою сухого тертя з двома паралельними шорсткими площинками. Пов'яжемо основу стрижня з системою координат XOY. Нехай на стрижень діє гармонічна сила Φ , яка направлена перпендикулярно стрижню, прикладена на відстані X_1 від основи. Розглянемо першу половину періоду, коли сила Φ направлена в сторону негативних значень осі Y (вниз). В цьому випадку стрижень починає рух в цьому ж напрямку. Так як стрижень рухається вниз, сила тертя між нижньою опорою і нижньою плоскістю F_1 збільшиться, а між верхньою опорою і верхньою плоскістю F_2 зменшиться. Сила Φ на плечі X_1 приведе до появи пари сил тертя F_1 і F_2 . При цьому сила F_2 направлена в бік негативних значень осі X (вліво), а сила F_1 - в бік позитивних значень осі X (вправо). Так як $|F_2| < |F_1|$, то результуюча цих сил буде направлена в бік позитивних значень осі X і не рівна 0. Результуюча сил тертя на плечі r (відстань від основи балки 2 (точка O) до опор 3) приведе до появи моменту відносно осі, яка проходить через нижню опору, що приведе до мікроповороту основи стрижня в площині XOY відносно осі, яка проходить через нижню опору. При зміні напрямку сили Φ (друга половина періоду) зміняться напрямки і величини сил тертя F_1 і F_2 . Сила F_1 буде направлена в бік негативних значень осі X, а сила F_2 - в бік позитивних значень осі X. Так як стрижень рухається вгору, то $|F_2| > |F_1|$. І в цьому випадку результуюча сил тертя направлена в бік позитивних значень осі X. Результуюча сил тертя на плечі r приведе до мікроповороту основи стрижня відносно осі, яка проходить через верхню опору. Отже, при будь-якому напрямку дії сили Φ вздовж осі Y, результуюча сил тертя буде направлена в один

бік. Дія цієї сили на плечі r призводить до процесу вібраційного переміщення основи стрижня вздовж паралельних площинок [18].

Основні результати дослідження. На основі розглянутого процесу вібраційного переміщення елементів вкленої конструкції пропонується наступна математична модель руху внутрішнього елемента вкленої конструкції відносно зовнішнього елемента (у вигляді двох паралельних шорстких площинок) при дії вимушених коливань. На стрижень діє гармонічна сила Φ , яка направлена перпендикулярно повздовжній осі стрижню (рис.3).

Рівняння руху внутрішнього елемента вкленої конструкції відносно зовнішнього запишемо у вигляді:

$$m_1 \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_f + M_\varphi, \quad (3)$$

$$\Delta x = 2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \varphi(t), \quad (4)$$

$$x_{i+1} = x_0 + \Delta x_i, \quad (5)$$

де m_1 - масовий момент інерції основи, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

M_φ - момент, який створюється силою Φ на плечі X_1 , відносно осі Y, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

φ - кут повороту основи, у площині XOY, рад ;

M_f - момент сил тертя, $\text{н} \cdot \text{м}$;

Δx_i - зміна переміщення основи вздовж осі X, м ;

$d = 2 \cdot r$ - відстань між зовнішніми площинками, м .

При коливаннях стрижня діє умова:

$$\frac{d\varphi}{dt} \neq 0,$$

тому:

$$M_f = M_f \operatorname{sgn} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (6)$$

Рівняння (3) приймає вид:

$$m_1 \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -M_f \operatorname{sgn} \frac{d\varphi}{dt} + M_\varphi. \quad (7)$$

При вібрації конструкції

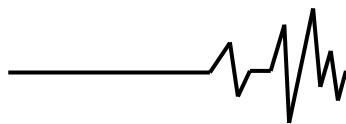
$$M_f = f \cdot d \cdot \left[2 - \frac{A \cdot \omega^2}{|(p^2 - \omega^2) \cdot \Delta y|} \right] \cdot k \cdot \Delta y, \quad (8)$$

де f - ефективний коефіцієнт сухого тертя між опорами та шорсткими площинками;

p - частота власних коливань консольного стрижня, Гц ;

Δy - попереднє піджаття пружних елементів опор, м .

$$M_\varphi = \Phi \cdot X_1. \quad (9)$$



Якщо $M_\phi < M_{f0}$, то $x = 0$, переміщення основи стрижня вздовж паралельних площинок відсутнє.

Якщо ж $M_\phi > M_{f0}$, то проходить процес вібраційного переміщення внутрішнього елемента вкладеної конструкції відносно зовнішнього.

Експериментальні дослідження, проведені на експериментальній установці, наведений на рис.4, підтвердили можливість вібраційного переміщення внутрішнього елемента вкладеної конструкції (консольне закріплення стрижня в циліндричній основі) вздовж зовнішнього елемента вкладеної конструкції (циліндру) при прикладанні зовнішньої сили лише до внутрішнього елемента вкладеної конструкції.

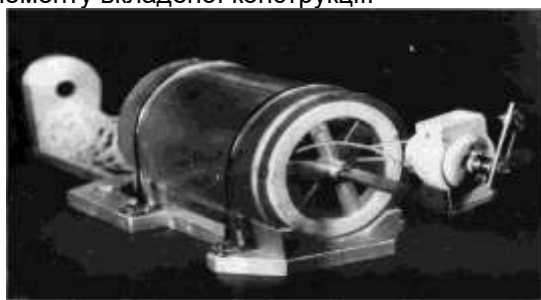


Рис. 4. Загальний вигляд експериментальної моделі вкладеної конструкції

Для виявлення кількісної залежності величини вібраційної сили, що виникає при русі внутрішнього елемента вкладеної конструкції відносно зовнішнього елемента (циліндру) при дії вібрації на внутрішній елемент, від величини сили сухого тертя між внутрішнім та зовнішнім елементами, були проведені експериментальні

дослідження, що дозволили оцінити вплив сил тертя між елементами на величину вібраційної сили.

При проведенні дослідження та обробки результатів використовувався метод активного планування експериментів [14]. Реалізація методу активного планування експериментів складається із наступних основних етапів:

- вибір факторів і рівнів їх варіювання;
- кодування факторів;
- складання план-матриці експериментів;
- реалізація плану експерименту;
- перевірка однорідності дисперсій паралельних дослідів та їх відтворюваності;
- розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії, їх похибок і значимості;
- перевірка адекватності математичної моделі.

Експериментальні дослідження проводились на експериментальній установці, в якій консольний стрижень був закріплений у основі за допомогою трьох кілець, пов'язаних силою сухого тертя з внутрішньою поверхнею циліндра. В якості факторів, що впливають на величину вібраційної сили, були обрані величини сил тертя між кільцями та циліндром (величини сил тертя між кільцями та циліндром приймалися на рівні «-1» 20 Н, на рівні «+1» 40 Н. Величина вібраційної сили, що виникала між основою стрижня та внутрішньою поверхнею циліндра при дії вібрації, вимірювалась за допомогою динамометра.

За результатами експериментів було отримано рівняння регресії, що дозволяє оцінити величину вібраційної сили W . Рівняння регресії має вигляд:

$$W = 0,9 + 0,2\tilde{x}_1 + 0,3\tilde{x}_2 + 0,2\tilde{x}_3 + 0,14\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + 0,08\tilde{x}_1\tilde{x}_3 + 0,1\tilde{x}_2\tilde{x}_3 + 0,15\tilde{x}_1\tilde{x}_2\tilde{x}_3,$$

де $\tilde{x}_1\tilde{x}_2\tilde{x}_3$ — кодовані значення сили тертя в 1-й, 2-й, 3-й опорах.

Експериментальні дослідження дозволили з'ясувати, що величина вібраційної сили, під дією якої здійснюється рух внутрішнього елемента вкладеної конструкції відносно циліндру складає порядку 10 % від величини сили сухого тертя між опорами внутрішнього елемента вкладеної конструкції та циліндром при відсутності коливань конструкції.

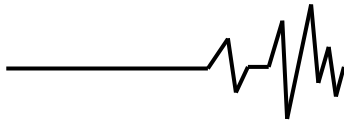
Крім того, експериментальні дослідження виявили можливість здійснення вібраційного переміщення внутрішнього елемента вкладеної конструкції (консольно закріпленого стрижня в циліндричній основі) вздовж зовнішнього елемента вкладеної конструкції (циліндру) при вертикальному розміщенні експериментальної установки, але при зупинці дії зовнішньої

вібраційної сили, внутрішній елемент вкладеної конструкції, завдячуючи дії сили тертя покою, зупиняється в тому місці відносно циліндра, в якому припинилась дія зовнішньої вібраційної сили (основа зі стрижнем не падає донизу труби).

Висновки. Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити наступні висновки:

1) при дії вимушених коливань на вкладені конструкції з конструктивною асиметрією внутрішнього елемента вкладеної конструкції можливе виникнення ефекту вібраційного переміщення внутрішнього елемента вкладеної конструкції відносно зовнішнього елемента;

2) можливе здійснення вібраційного переміщення внутрішнього елемента вкладеної конструкції (консольно закріпленого стрижня в циліндричній основі) вздовж зовнішнього елемента вкладеної конструкції (циліндру) при куті між повздовжньою віссю внутрішнього елемента та



напрямок дії зовнішньої вібраційної сили, який дорівнює 90° ;

3) можлива зупинка внутрішнього елемента вкладеної конструкції, при відсутності дії зовнішньої вібраційної сили, в тому місці зовнішнього циліндра, в якому припинилась дія зовнішньої вібраційної сили.

Подальші дослідження пов'язані з розробкою технології вібраційного переміщення вантажів на значні відстані на основі розглянутого ефекту вібраційного переміщення вкладених конструкцій.

Список використаних джерел

1. Гринів Н. Т., Равліковська А.А. Перебудова логістики в умовах воєнного стану в Україні. *Академічні візії*. 2022. №13. С. 1–19.
2. Омелянов О. М., Замрій М. А. Напрямки підвищення ефективності роботи вібраційних технологічних машин. *Вібрації в техніці та технологіях* № 4 (99). 2020. С.49-58.
3. Потураєв В. Н., Франчук В. П., Надутий В. П. Вібраційна техніка і технології в енергоємних виробництвах. Д: НГА України. 2002. 190 с.
4. Чубик Р. В. Керовані вібраційні технологічні машини. Монографія. Вінниця: ВНАУ. 2011. 355 с.
5. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: НУ "Львівська політехніка". 2004. 248 с.
6. Басараб В.А. Полічастотний режим коливань електромагнітної ударно-вібраційної системи. *Прикладна механіка* 2021. №5. С. 129 - 139.
7. Коруняк П. С., Керницький І. С., Ніщенко І. І. Автоматизоване вібраційне маніпулювання виробами та віброманіпулятори / за ред. В. В. Снітинського. Львів: Сполом, 2021. 256 с.
8. Омелянов О. М. Аналіз приводних механізмів сепаратора комбікормів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2(85). С. 121-128.
9. Корендій В. М., Гаврильченко О. В., Шенбор В. С. Вібраційні транспортно-маніпулюючі конвеєри для пакувального обладнання. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2018. Вип. 891. С. 35–41.
10. Паламарчук І.П., Застосування вібротехнологій у процесах зберігання сільськогосподарської продукції/ І.П. Паламарчук, С.В. Кюрчев, В.О. Верхоланцева // Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції (17-18 травня 2018р.,м.Умань). Імпортозамінні технології вирощування, зберігання і переробки продукції садівництва та рослинництва.-с.113-115.
11. Баженов В.А., Погорелова О.С., Постнікова Т.Г. Порівняння динамічної поведінки віброударної системи в залежності від характеру

контакту між її елементами. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2014. № 92 с. 83 – 91.

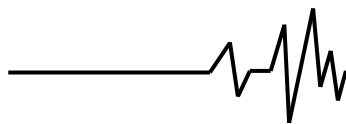
12. Vibration in technology: a reference. In 6 t. / Ed. Advice: V.N. Chelomei (previous), [Vibrations in Engineering: A Handbook] Mechanical Engineering, 1981. - Т. 4. Vibration processes and machines, 509 p.

13. Заика П. М. Визначення законів руху робочих органів просторових вібраційних машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2002. № 4 (25). С.17–25.

14. Ковтун А. В., Греков В. П., Прокопов В. О. Динаміка складних механічних систем зі зв'язками сухого тертя. *МО України*, 1996. - 115 с.

References

1. Hryniv N. T., Ravlikovska A. A. Restructuring logistics under martial law in Ukraine. *Academic Visions*. 2022. No. 13. P. 1–19.
2. Omelyanov O. M., Zamriy M. A. Directions for increasing the efficiency of vibration technological machines. *Vibrations in Engineering and Technologies* No. 4 (99). 2020. P.49-58.
3. Poturaev V. N., Franchuk V. P., Naduty V. P. Vibration equipment and technologies in energy-intensive industries. D: National Academy of Sciences of Ukraine. 2002. 190 p.
4. Chubyk R. V. Controlled vibration technological machines. Monograph. Vinnytsia: VNAU. 2011. 355 p.
5. Povidaylo V.O. Vibrational processes and equipment. Lviv: National University "Lviv Polytechnic". 2004. 248 p.
6. Basarab V.A. Multi-frequency oscillation mode of an electromagnetic shock-vibration system. *Applied Mechanics* 2021. No. 5. P. 129 - 139.
7. Korunyak P. S., Kernyskyi I. S., Nishchenko I. I. Automated vibration manipulation of products and vibration manipulators / edited by V. V. Snitynskyi. Lviv: Spolom, 2021. 256 p.
8. Omelyanov O. M. Analysis of the drive mechanisms of the compound feed separator. *Vibrations in Engineering and Technologies*. 2017. No. 2(85). P. 121-128.
9. Korendii V. M., Gavrilenko O. V., Shenbor V. S. Vibrating transport and handling conveyors for packaging equipment. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument making*. 2018. Issue 891. Pp. 35–41.
10. Palamarchuk I.P., Application of vibration technologies in the processes of storage of agricultural products / I.P. Palamarchuk, S.V. Kyurchev, V.O. Verkholtantseva // Materials of the IV International Scientific and Practical Conference (May 17-18, 2018, Uman). Import-substituting technologies for growing, storing and processing horticultural and crop products. - p.113-115.



11. Bazhenov V.A., Pogorelova O.S., Postnnikova T.G. Comparison of the dynamic behavior of a vibration-shock system depending on the nature of the contact between its elements. Resistance of materials and theory of structures. 2014. No. 92, pp. 83 – 91.

12. Vibration in technology: a reference. In 6 t. / Ed. Advice: V.N. Chelomei (previous), [Vibrations in Engineering: A Handbook] Mechanical Engineering, 1981. - T. 4. Vibration processes and machines, 509 p.

13. Zaika P. M. Determination of the laws of motion of the working bodies of spatial vibration machines. Selections in engineering and technology. 2002. No. 4 (25). P.17–25.

14. Kovtun A. V., Grekov V. P., Prokopov V. O. Dynamics of complex mechanical systems with dry friction links. Ministry of Defense of Ukraine, 1996. - 115 p.

VIBRATIONAL DISPLACEMENT OF NESTED STRUCTURES

The article investigates the mechanism of vibration movement of nested structures in closed volumes (pipes). Nested structures are structures whose constituent elements are located inside each other and are connected to each other by at least two opposite surfaces by dry friction forces. Such structures are often found in modern technology: transportation of long loads, fastening of pipelines with clamps, braking devices of lifting machines, etc. The peculiarities of the movement of nested structures in closed volumes (pipes) are considered in the case when a harmonic force acts on the internal element, which is directed perpendicular to its longitudinal axis. The conditions for the beginning of the movement of

the internal element of the nested structure relative to the external (pipe) element are analyzed.

Based on the method of mathematical modeling, a system of equations is proposed that describes the motion of the internal element of a nested structure relative to the external element under the action of forced vibrations. A new dependence is obtained for determining the friction moment between the supports of the internal element and the external cylinder under the action of a harmonic external force.

The conducted experimental studies confirmed the possibility of vibrational movement of the internal element of the nested structure (cantilevered fixation of the rod in a cylindrical base) along the external element of the nested structure (cylinder) when applying an external force only to the internal element of the structure.

In addition, experimental studies to identify the quantitative dependence of the magnitude of the vibration force that occurs when the internal element of the nested structure moves relative to the external element (cylinder) when vibration acts on the internal element, on the magnitude of the dry friction force between the internal and external elements allowed us to assess the influence of friction forces between elements by the magnitude of the vibration force that occurs when the internal element of the nested structure moves relative to the external one.

The results obtained can be used in the creation of vibration systems for moving loads over distances that exceed the capabilities of modern vibration systems.

Keywords: vibration displacement, nested structures, dry friction force, internal element, cylinder.

Відомості про авторів

Ковтун Анатолій Васильович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Управління логістикою» Національної академії Національної гвардії України (майдан Захисників України, 3 м. Харків, 61001, Україна; e-mail: kav-60@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8427-1005>. Моб. +38(097) 708-04-41.

Купін Сергій Павлович старший викладач кафедри «Тактики» Національної академії Національної гвардії України (пл. Захисників України, 3 м. Харків, 61001, Україна; e-mail: ekotonkupon@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-0807-1503>. Моб. +38(098) 798 34 78.

Желновач Олександр Олександрович, старший викладач кафедри «Управління логістикою» Національної академії Національної гвардії України (пл. Захисників України, 3 м. Харків, 61001, Україна; e-mail: zelnovach.aleksandr@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5430-6502>. Моб. +38(098) 354 74 12.

Kovtun Anatoly Vasilyevich Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Logistics Management National Academy of National Guard of Ukraine (Defenders of Ukraine Square, 3, Kharkiv, 61001, Ukraine) e-mail: kav-60@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8427-1005>. Моб. +38(097) 708-04-41.

Kupin Serhiy Pavlovych, senior lecturer of the Department of Tactics National Academy of National Guard of Ukraine (Defenders of Ukraine Square, 3, Kharkiv, 61001, Ukraine) e-mail: ekotonkupon@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-0807-1503>. Моб. +38(098) 798 34 78.

Zhelnovach Oleksandr Oleksandrovich, senior lecturer of the Department Logistics Management National Academy of National Guard of Ukraine (Defenders of Ukraine Square, 3, Kharkiv, 61001, Ukraine) e-mail: zelnovach.aleksandr@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5430-6502>. Моб. +38(098) 354 74 12.