

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-6>

УДК 621.924.7

**КОШЕЛЬ ОЛЕКСАНДР**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0009-0006-3788-9298>  
 e-mail: [koshel\\_aleksandr@ukr.net](mailto:koshel_aleksandr@ukr.net)

**ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0002-9183-2771>  
 e-mail: [markzalubovskiy@gmail.com](mailto:markzalubovskiy@gmail.com)

**КОШЕЛЬ СЕРГІЙ**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0001-7481-0186>  
 e-mail: [sergey\\_koshel@ukr.net](mailto:sergey_koshel@ukr.net)

**КОШЕЛЬ ГАННА**

Київська державна академія декоративно-прикладного мистецтва і дизайну ім. М. Бойчука  
<https://orcid.org/0000-0003-1862-1553>  
 e-mail: [a\\_koshel@ukr.net](mailto:a_koshel@ukr.net)

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КУТА НАХИЛУ ГЕОМЕТРИЧНОЇ  
 ОСІ РОБОЧОЇ ЄМНОСТІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ У ГАЛТУВАЛЬНІЙ МАШИНИ  
 УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ НА РЕЖИМИ РУХУ МАСИВУ ДЕТАЛЕЙ У  
 ТЕХНОЛОГІЧНІЙ ЄМНОСТІ**

*У статті наведені результати проведеного та математично обробленого експериментального дослідження взаємного впливу частот обертання двох ведучих валів та кута нахилу робочої ємності по відношенню до горизонту спеціально розробленої для обробки деталей легкої промисловості галтувальної машини на режим руху масиву деталей в робочій ємності. Представлено розроблений план експериментального дослідження впливу кута нахилу геометричної осі робочої ємності циліндричної форми галтувальної машини на режим руху масиву деталей в робочій ємності з складним просторовим рухом. Експериментально досліджено вплив кута нахилу ємності на режим руху масиву деталей в робочій ємності для різних значень кутів нахилу, отримано математичні моделі, що встановлюють взаємозв'язок між частотами обертання відносного та переносного ведучих валів машини розробленої конструкції, для яких спостерігається перехід режиму руху робочого масиву деталей в ємності від каскадного до каскадно – водоспадного, перевірена їх адекватність. Встановлено, що варіювання кута нахилу робочої ємності виміряного для вертикально верхнього положення кривошипу від меншої до більшої технологічно можливої величини призводить до необхідності зменшення величини переносної частоти та одночасного збільшення відносної частоти обертання ведучих валів галтувальної машини для забезпечення каскадно- водоспадного руху робочого масиву деталей. Для збереження незмінного режиму руху деталей у ємності при зупиненому приводному валу, що відповідає за переносний рух масиву деталей, збільшення кута нахилу ємності від меншого до більшого значення вимагає збільшення частоти обертання вала, що відповідає за відносний рух ємності. І навпаки, при зупиненому приводному валу, що відповідає за відносний рух ємності, збільшення кута нахилу вимагає зменшення частоти обертання вала, що відповідає за переносний рух робочої ємності. Отримані результати можна використовувати для визначення необхідних для обробки деталей певного асортименту частот обертання ведучих валів машини для забезпечення найкращих результатів їхньої обробки на машині розробленої конструкції.*

**Ключові слова:** механізм, галтувальна машина, просторовий рух, обробка деталей, машина для обробки, експериментальне дослідження, математична модель.

**KOSHEL OLEKSANDR, ZALYUBOVSKIY MARK, KOSHEL SERHIY**

Kyiv National University of Technology and Design

**KOSHEL HANNA**

Kyiv State Academy of Decorative and Applied Arts and Design named after Mykhailo Boichuk

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE INCLINATION ANGLE OF  
 THE GEOMETRIC AXIS OF A CYLINDRICAL WORKING CONTAINER IN  
 AN IMPROVED-DESIGN TUMBLING MACHINE ON THE MOTION REGIMES OF  
 THE WORKPIECE BULK IN THE PROCESSING CONTAINER**

*The article presents the results of an experimentally conducted and mathematically processed study of the mutual influence of the rotational frequencies of two driving shafts and the inclination angle of the working container relative to the horizontal in a tumbling machine specially designed for processing light industry components on the motion regime of the workpiece bulk within the working container. A developed experimental research plan is presented for studying the influence of the inclination angle of the geometric axis of a cylindrical working container of a tumbling machine on the motion regime of the workpiece bulk in a working container with complex spatial motion. The influence of the container inclination angle on the motion regime of the workpiece bulk in the working container was experimentally investigated for various inclination angles. Mathematical models were obtained that establish the relationship between the rotational frequencies of the relative and carrier driving shafts of the machine of the developed design, at which a transition of the motion regime of the workpiece bulk in the container from cascading to cascading–waterfall occurs; their adequacy was verified. It was established that varying the inclination angle of the working container, measured at the vertically upper position of the crank, from a smaller to a larger technologically feasible value leads to the necessity of reducing the carrier rotational frequency and simultaneously increasing the relative rotational frequency of the driving shafts of the tumbling machine in order to ensure a cascading–waterfall motion of the workpiece bulk. To maintain an unchanged motion regime of the workpieces in the container with the driving shaft responsible for the carrier motion of the workpiece bulk stopped, an increase in the inclination angle of the container from a smaller to a larger value requires an increase in the rotational frequency of the shaft responsible for the relative motion of the container. Conversely, with the driving shaft responsible for the relative motion of the container stopped, an increase in the inclination angle necessitates a decrease in the rotational frequency of the shaft*

responsible for the carrier motion of the container. The obtained results can be used to determine the rotational frequencies of the driving shafts required for processing workpieces of a specific assortment in order to achieve optimal processing results on the machine of the developed design.

**Keywords:** mechanism, tumbling machine, spatial motion, workpiece processing, processing machine, experimental study, mathematical model.

Стаття надійшла до редакції / Received 10.01.2026  
Прийнята до друку / Accepted 12.02.2026  
Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Кошель Олександр, Залобовський Макр, Кошель Сергій, Кошель Ганна

### Постановка задачі

Обробка деталей в робочих ємностях відноситься до, так названих, галтувальних технологічних операцій, суть яких полягає в обробці поверхонь деталей в спеціальній робочій ємності за рахунок їх взаємодії між собою, технологічним середовищем, що в сукупності з деталями, які обробляються утворює робочий масив деталей та з внутрішньою поверхнею ємності, у наслідок чого виникають оброблені поверхні деталей. Спостерігається покращення поверхонь деталей за рахунок їх шліфування та полірування, очищення від облою [1], відділення деталей, які отримано за допомогою технологічної операції лиття, від ливників [2].

Технологічне середовище, в якому виконується обробка масиву деталей необхідно обирати з урахуванням матеріалу, з якого виготовлені деталі [3]: шліфування та полірування деталей з полімерних матеріалів (розповсюджено для виготовлення деталей легкої промисловості та індустрії моди) можна виконувати з застосуванням звичайної води в якості технологічного середовища, що зовсім недоцільно робити у випадку обробки деталей, що виготовлено з металів, поверхні яких можуть бути ушкодженні взаємодією з нею.

Технологічна операція відділення деталей від ливників (наприклад, металевих деталей замка «блискавка», що широко застосовуються при виготовленні виробів легкої промисловості) виконують на галтувальному обладнанні без застосування технологічного середовища. Для відділення від ливників деталей, що вироблені з еластичних полімерів (деталі з таких матеріалів широко застосовуються для виготовлення виробів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості) виникає необхідність охолодження робочого масиву деталей у робочій ємності галтувальної машини, що успішно здійснюється за допомогою відповідного холодоагенту, таких як рідкі двоокис вуглецю або азоту [4]. Правильний підбір технологічного середовища для обробки поверхонь деталей легкої промисловості є важливим фактором швидкого та якісного виконання технологічної операції [5].

Продуктивність обробки деталей взуття та фурнітури, які вироблені з полімерних матеріалів на галтувальних машинах, в яких робоча ємність з масивом деталей виконує просторовий рух значно збільшується в порівнянні з іншими типами галтувального обладнання. Машини з просторовим складним рухом технологічної ємності також використовуються в механічній технології обробки матеріалів для виконання технологічних операцій процесу змішування сипких гранульованих речовин та матеріалів [6] в таких галузях виробництва, як хімічна, фармацевтична, харчова, будівельна та інших [7].

### Аналіз досліджень та публікацій

У праці [8] наведено аналітичні дослідження можливості застосування таких машин для виконання технологічної операції шліфування та полірування деталей, що виготовлені з полімерних матеріалів, матеріалу, який використовується для виробництва різноманітних деталей легкої промисловості таких, наприклад, як гудзики різного типорозміру. Характеристики можливих режимів руху робочого середовища в технологічній ємності машини наведені в роботі [9]. У існуючій машині типу «Turbula» з просторовим складним рухом робочої ємності, яка застосовується для обробки деталей легкої промисловості в структурі присутні два кривошипи, один з яких є ведучим та рухається зі сталюю кутовою швидкістю, а інший – ведений і його обертальний рух є нерівномірним [10]. Нерівномірний рух веденого кривошипу є причиною порушення технологічного режиму руху робочого середовища в ємності, що впливає на технологічний процес обробки деталей [11].

### Виділення невирішених частин

Розроблена машина для обробки деталей [12, 13] в своїй конструкції має два ведучі вали, а їх рівномірний обертальний рух призводить до просторового складного руху робочого масиву деталей у робочій ємності. Поява того чи іншого режимів руху робочого масиву деталей залежить від конструктивних та технологічних параметрів розробленої машини. Для реалізації необхідних режимів руху масиву деталей легкої промисловості тої чи іншої асортиментної групи та їх якісної обробки виникає необхідність в проведенні відповідних експериментальних досліджень.

### Формулювання цілі статті

Експериментально дослідити взаємний вплив частот обертання ведучих валів та кута нахилу геометричної осі робочої ємності циліндричної форми у галтувальній машині розробленої конструкції на режими руху масиву деталей у технологічній ємності.

### Виклад основного матеріалу

Відома конструкція галтувальної машини для обробки деталей легкої промисловості на основі просторового подвійного шарніру [14], в якій присутній один ведучий та ведений вали, які кінематично з'єднані за допомогою обертальних кінематичних пар з корпусом машини, а їх геометричні осі розташовані паралельно та є одночасно перпендикулярними до однієї площини. Конструктивною особливістю такої машини є те, що кінематичний ланцюг подвійного шарніру розташований по відношенню до такої площини по один бік, що призводить до певних обмежень в роботі машини для обробки деталей легкої промисловості.

Машина для обробки деталей удосконаленої конструкції на основі механізму з подвійним ступенем

рухомості [12], кінематична схема якої представлена на рис.1 містить корпус 1, в якому розміщено два приводи з електродвигунами 2 та 4, які незалежно один від іншого призводять до руху два ведучих вала 3 та 5, що встановлені, відповідно, в підшипникових опорах 6 та 7 з наперед заданими за напрямком та величиною кутовими швидкостями (частотами обертання)  $\omega_3$  ( $n_{3r}$ ) та  $\omega_5$  ( $n_{5e}$ ).

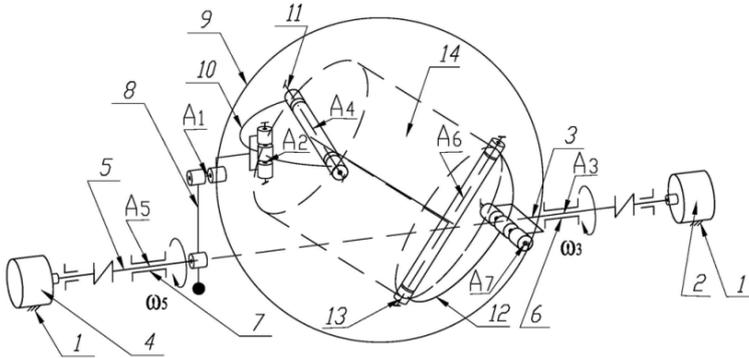


Рис. 1. Кінематична схема машини для обробки деталей легкої промисловості удосконаленої конструкції

Основою структури механізму машини є просторовий подвійний шарнір 9, до складу якого надходять дві ланки у вигляді вилок 10 та 12 та робоча ємність 14, яка за допомогою взаємно перпендикулярних осей 11 та 13 кріпиться до них. Рухомі ланки подвійного шарніру утворюють обертальні кінематичні пари  $A_2, A_4, A_6$ , а за допомогою пар п'ятого класу  $A_7$  та  $A_1$  просторовий ланцюг подвійного шарніру кінематично з'єднується з двома ведучими валами 3 та 5, які шарнірами  $A_3$  та  $A_5$  приєднані до корпусу машини.

З одного боку кінематичною парою  $A_7$  забезпечується відносний обертальний рух робочої ємності 14 від першого ведучого валу 3, а з іншого - парою  $A_1$  обумовлено її переносний обертальний рух за рахунок кривошипу 8, який жорстко з'єднаний з другим ведучим валом 5, що розташований співвісно до валу 3. Лінійні розміри кривошипу 8 призводять до розташування геометричної вісі робочої ємності 14 під певним кутом до горизонту, а зміна його положення у вертикальній площині - до складного просторового руху деталей у робочому масиві та появи відповідних режимів його руху під час виконання технологічної операції гальтування.

Отже, метою експериментального дослідження є встановлення впливу частот обертання ведучих валів та кута нахилу геометричної осі робочої ємності циліндричної форми у гальтувальній машині удосконаленої конструкції на режими руху масиву деталей у технологічній ємності.

Згідно з планом проведення експериментальних досліджень (табл. 1) реалізовано варіанти 1 – 6 для кута  $\alpha=30^\circ$  нахилу геометричної осі ємності до горизонту з метою встановити взаємозалежність між параметрами відносної  $n_{3r}$  та переносної  $n_{5e}$  частот обертання ведучих валів машини, для яких спостерігається зміна режиму руху масиву деталей.

Таблиця 1

**План експериментальних досліджень впливу відносної  $n_{3r}$  та переносної  $n_{5e}$  частот обертання ведучих валів машини в залежності від кута нахилу робочої ємності циліндричної форми на режим руху робочого масиву деталей гальтувальної машини розробленої конструкції**

Варіант	Значення факторів			Частота відносного обертання робочої ємності $n_{3r}$ , об/хв	Примітка
	Частота переносного обертання робочої ємності $n_{5e}$ , об/хв	Кут нахилу робочої ємності $\alpha$ , град	Радіус переносного руху точки робочого масиву $R(\alpha)$ , м		
1	0	30	0,245	$n_{3r}$	Дослідження зміни режиму руху робочого масиву у ємності.
2	10	30	0,245	$n_{3r}$	
3	20	30	0,245	$n_{3r}$	
4	30	30	0,245	$n_{3r}$	
5	40	30	0,245	$n_{3r}$	
6	50	30	0,245	$n_{3r}$	
7	0	40	0,293	$n_{3r}$	Дослідження зміни режиму руху робочого масиву у ємності.
8	10	40	0,293	$n_{3r}$	
9	20	40	0,293	$n_{3r}$	
10	30	40	0,293	$n_{3r}$	
11	40	40	0,293	$n_{3r}$	
12	50	40	0,293	$n_{3r}$	
13	0	50	0,334	$n_{3r}$	Дослідження зміни режиму руху робочого масиву у ємності.
14	10	50	0,334	$n_{3r}$	
15	20	50	0,334	$n_{3r}$	
16	30	50	0,334	$n_{3r}$	
17	40	50	0,334	$n_{3r}$	
18	50	50	0,334	$n_{3r}$	

Результати проведеного дослідження наведено для трьох паралельних повторень ( $n=3$ ) кожного окремого експерименту та визначене середнє значення  $\bar{y} = \bar{n}_{3r}$  представлено у табл. 2.

Таблиця 2

**Експериментальне дослідження взаємного впливу відносної  $n_{3r}$  та переносної  $n_{5e}$  частот обертання ведучих валів машини в залежності від кута нахилу робочої ємності циліндричної форми на режим руху робочого масиву деталей ( $\alpha=30^\circ$ ;  $r=0,06$  м;  $R(\alpha)=0,245$  м)**

Параметр	$n_{5e} = 0$ , об/хв	$n_{5e} = 10$ , об/хв	$n_{5e} = 20$ , об/хв	$n_{5e} = 30$ , об/хв	$n_{5e} = 40$ , об/хв	$n_{5e} = 50$ , об/хв
Результат						
$n_{3r}$ , об/хв	128,0	119,25	104,0	84,00	63,5	35,75
$\bar{y}$	131,5	121,5	102,3	82,25	62,75	35,0
	127,5	119,25	99,7	85,75	62,75	35,75
	129,0	120,0	102,0	84,0	63,0	35,5

Обробку експериментальних даних проводимо згідно з відомою методикою [15–17]. Кількість повторень на рівні фактора, а також для всіх інших рівнів у межах реалізації плану експерименту перевіряємо за  $t$ -критерієм Стюдента. Перевірка за  $t$ -критерієм полягає в тому, щоб з'ясувати, чи є різниця між середніми значеннями результатів експерименту статистично значущою, тобто такою, що не могла виникнути випадково внаслідок розсіювання результатів спостережень. Для прикладу  $n_{5e} = 0$  (табл. 2) обчислюємо квадратичну дисперсію  $S^2$ :

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2 = \frac{(128-129)^2 + (131,5-129)^2 + (127,5-129)^2}{2} = 4,75$$

$$S = \sqrt{4,75} = 2,18$$

де  $y_i = n_{3r}$  – значення вимірюваного параметра в паралельних повтореннях;

$\bar{y}$  – середнє арифметична величина з трьох паралельних повторень.

Обчислюємо довірчий інтервал: для кількості повторень  $n=3$  та ступеня вільності для дисперсії  $(n-1)=3-1=2$  табличне значення  $t$ -критерію Стюдента (з довірчою вірогідністю 0,95) дорівнює:  $t=4,303$ , тому довірчу межу  $\delta$  для середнього значення експериментальної величини розраховуємо з рівняння:

$$\delta = t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} = 4,303 \cdot \frac{2,18}{\sqrt{3}} = 5,41$$

,тому довірчий інтервал для середнього значення параметра:

$$\bar{y} = 129,0 \pm 5,41$$

Отже, довірчий інтервал (для довірчого рівня 95%) середнього значення параметра складає від 123,59 до 134,41, тобто умова виконується для такого рівня експерименту з кількістю повторень  $n=3$ .

Згідно з результатами обробки отримуємо математична модель залежності величини частоти обертання відносного ведучого вала від величини частоти обертання переносного ведучого вала у вигляді:

$$\hat{y} = n_{3r} = -18,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_{5e}^2 - 94,27 \cdot 10^{-2} \cdot n_{5e} + 129,59, \quad (1)$$

де коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$  квадратичного рівняння знайдено за методом найменших квадратів, побудована апроксимуюча графічна залежність (рис. 2).

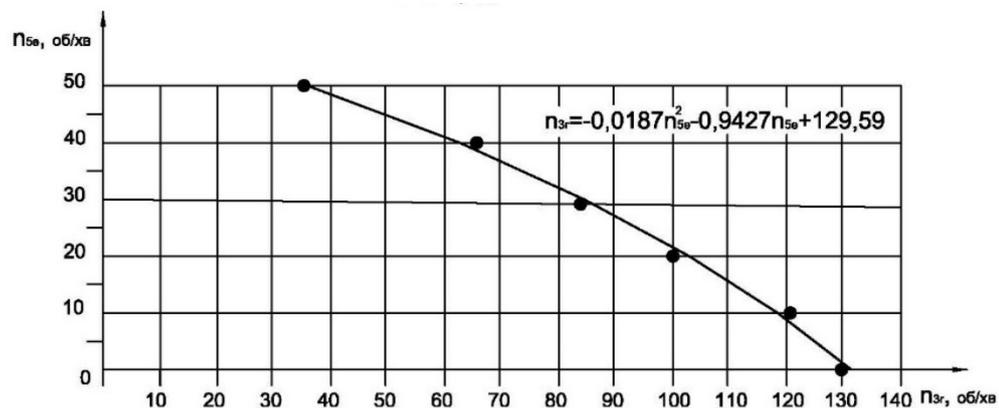


Рис. 2. Графічна залежність результату експериментального дослідження взаємного впливу відносної та переносної частот обертання ведучих валів машини на режим руху робочого масиву деталей ( $\alpha=30^\circ$ )

Перевірку адекватності отриманої математичної моделі з довірчою вірогідністю 0,95 проводимо за критерієм Фішера. Перевірка полягає в статистичному зіставленні дисперсії, що обумовлена похибкою моделі

(залишкової дисперсії  $S_{ad}^2$ ), з дисперсією відтворюваності  $S_{\{y\}}^2$  експерименту з метою встановлення та перевірки відхилення розрахункових значень від фактичних меж, які зумовлені випадковими похибками при проведенні експериментальних досліджень. Виконуємо розрахунок величини критерію Фішера та порівнюємо з його табличним значенням (для довірчої вірогідності 0,95). Перевірка виконана успішно, якщо розрахункова величина критерію Фішера є меншою за табличне.

Для прикладу розглядаємо перевірку адекватності математичної моделі для кута нахилу геометричної вісі ємності  $\alpha=30^\circ$ .

Обчислюємо дисперсію адекватності отриманої квадратичної моделі:

$$S_{ad}^2 = \frac{n}{N-p} \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y})^2 = 3 \cdot \frac{(129-129,59)^2 + (120-118,29)^2 + (102-103,26)^2 + (84-84,48)^2 + (63-61,9)^2 + (35,5-35,71)^2}{6-3} = 6,1884$$

де  $n=3$  – кількістю повторень;

$N=6$  – кількість рівнів досліджу;

$p=3$  – кількість параметрів у квадратичній залежності (коефіцієнти  $a, b, c$ );

$\bar{y}$  – середнє значення параметра  $n_{3r}$  на певному рівні дослідження;

$\hat{y}$  – розраховане значення параметра  $n_{3r}$  за математичною моделлю;

$N-p=6-3=3$  – ступінь вільності для дисперсії адекватності.

Обчислюємо дисперсію відтворення (середня квадратична помилка):

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \bar{y})^2 = \frac{(128-129)^2 + (131,5-129)^2 + (127,5-129)^2 + (119,25-120)^2 + (121,5-120)^2 + (119,25-120)^2 + (104-102)^2 + (102,3-102)^2 + (99,7-102)^2 + (84-84)^2 + (82,25-84)^2 + (85,75-84)^2 + (63,5-63)^2 + (62,75-63)^2 + (62,75-63)^2 + (35,75-35,5)^2 + (35-35,5)^2 + (35,75-35,5)^2}{6 \cdot (3-1)} = 2,4275,$$

де  $y_{i,j}$  – результат  $j$ -го досліджу на  $i$ -му рівні фактору;

$N=6$  – кількість рівнів досліджу;

$N \cdot (n-1) = 6 \cdot (3-1) = 12$  – ступінь вільності для дисперсії відтворення.

Розраховуємо значення критерію Фішера  $F_{розр} = 6,1884/2,4275 = 2,55$

Обираємо табличне значення критерію Фішера для довірчої вірогідності 0,95% –  $F_{табл} = 3,49$ .

Порівнюємо розраховану та табличну величини критерію Фішера та робимо висновок про перевірку адекватності. Розрахована величина критерію Фішера менша за табличну ( $F_{розр} = 2,55 < F_{табл} = 3,49$ ), тому робимо висновок – математична модель є адекватною по відношенню до результатів, що отримано експериментально з 95% вірогідністю.

Згідно з планом проведення експериментальних досліджень (табл. 1) реалізовано варіанти 7 – 12 та 13 – 18 для кутів  $\alpha=40^\circ$  та  $\alpha=50^\circ$  нахилу геометричної вісі ємності з метою встановлення взаємозалежностей між параметрами відносної  $n_{3r}$  та переносної  $n_{5e}$  частот обертання ведучих валів машини, для яких спостерігається зміна режиму руху масиву деталей.

Результати проведених досліджень наведено для трьох паралельних повторень кожного окремого експерименту, для яких визначено середнє значення  $\bar{y} = \bar{n}_{3r}$  (табл. 3, табл. 4).

Таблиця 3

**Експериментальне дослідження взаємного впливу відносної  $n_{3r}$  та переносної  $n_{5e}$  частот обертання ведучих валів машини в залежності від кута нахилу робочої ємності циліндричної форми на режим руху робочого масиву деталей ( $\alpha=40^\circ$ ;  $r=0,06$  м;  $R_{(a)}=0,293$  м)**

Параметр \ Результат	$n_{5e} = 0,$ об/хв	$n_{5e} = 10,$ об/хв	$n_{5e} = 20,$ об/хв	$n_{5e} = 30,$ об/хв	$n_{5e} = 40,$ об/хв	$n_{5e} = 50,$ об/хв
$n_{3r},$ об/хв	139,75 135,75 135,5	128,25 125,75 125,5	105,00 108,50 104,50	84,75 84,0 84,75	58,5 58,0 57,5	23,0 23,25 22,75
$\bar{y}$	137,0	126,5	106,0	84,5	58,0	23,0

Таблиця 4

**Експериментальне дослідження взаємного впливу відносної  $n_{3r}$  та переносної  $n_{5e}$  частот обертання ведучих валів машини в залежності від кута нахилу робочої ємності циліндричної форми на режим руху робочого масиву деталей ( $\alpha=50^\circ$ ;  $r=0,06$  м;  $R(\alpha)=0,334$  м)**

Параметр \ Результат	$n_{5e} = 0$ , об/хв	$n_{5e} = 10$ , об/хв	$n_{5e} = 20$ , об/хв	$n_{5e} = 30$ , об/хв	$n_{5e} = 40$ , об/хв	$n_{5e} = 50$ , об/хв
$n_{3r}$ , об/хв	149,0	138,0	110,5	86,0	52,75	9,25
$\bar{y}$	148,0	134,5	114,5	85,5	52,5	9,5
	153,0	137,0	111,0	86,5	52,25	9,75
	150,0	136,5	112,0	86,0	52,5	9,5

За результатами обробки експерименту (метод найменших квадратів) були отримані математичні моделі залежностей величини частоти обертання відносного вала від величини частоти обертання переносного вала для кутів нахилу геометричної вісі ємності, відповідно,  $\alpha=40^\circ$  та  $\alpha=50^\circ$ :

$$\hat{y} = n_{3r} = -26,2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{5e}^2 - 96,91 \cdot 10^{-2} \cdot n_{5e} + 137,38, \text{ та} \quad (2)$$

$$\hat{y} = n_{3r} = -32,8 \cdot 10^{-3} \cdot n_{5e}^2 - 116,3 \cdot 10^{-2} \cdot n_{5e} + 150,2. \quad (3)$$

Виконано побудови апроксимуючих графічних залежностей для кутів нахилу ємності  $\alpha=40^\circ$  та  $\alpha=50^\circ$ , відповідно, на рисунках 3 та 4.

Для отриманих математичних моделей за результатами проведених експериментальних досліджень обчислюємо дисперсію адекватності та дисперсію відтворення:

$$\text{для кута } \alpha=40^\circ - S_{a\hat{y}}^2=6,4291, S_{\{y\}}^2=2,2083;$$

$$\text{для кута } \alpha=50^\circ - S_{a\hat{y}}^2=6,8531, S_{\{y\}}^2=2,5625.$$

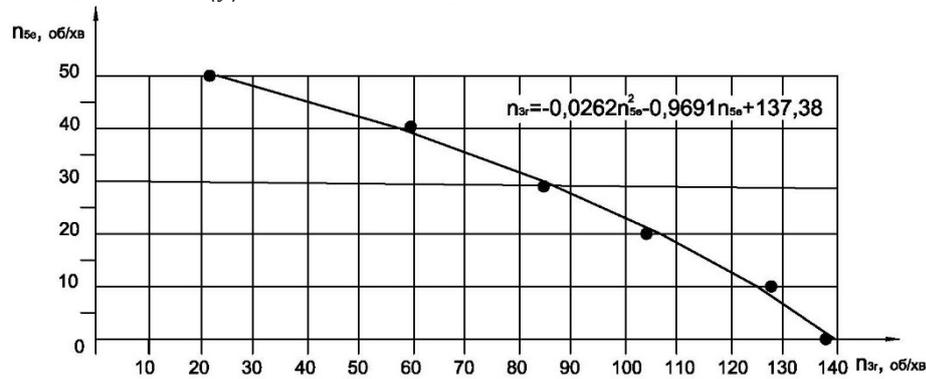


Рис. 3. Графічна залежність результату експериментального дослідження взаємного впливу відносної та переносної частот обертання ведучих валів машини на режим руху робочого масиву деталей ( $\alpha=40^\circ$ )

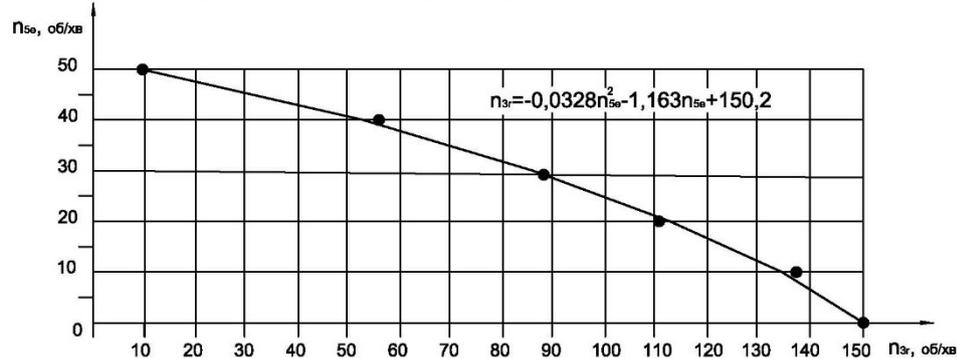


Рис. 4. Графічна залежність результату експериментального дослідження взаємного впливу відносної та переносної частот обертання ведучих валів машини на режим руху робочого масиву деталей ( $\alpha=50^\circ$ )

Визначаємо розрахункове значення критерію Фішера:

$$\text{для кута } \alpha=40^\circ - F_{\text{розр}} = \frac{S_{a\hat{y}}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{6,4291}{2,2083} = 2,91;$$

$$\text{для кута } \alpha=50^\circ - F_{\text{розр}} = \frac{S_{a\hat{y}}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{6,8531}{2,5625} = 2,67.$$

Обираємо табличне значення критерію Фішера для довірчої вірогідності 0,95 (ступінь вільності для дисперсії адекватності (більшої за величиною дисперсії) – 3, ступінь вільності для дисперсії відтворення (меншої за величиною дисперсії) – 12 для обох серій дослідження з кутами  $\alpha=40^\circ$  та  $\alpha=50^\circ$ ). Табличне значення критерію Фішера для серій досліджень з кутами  $\alpha=40^\circ$  та  $\alpha=50^\circ$  дорівнює –  $F_{\text{табл}}=3,49$ .

Порівнюємо розраховані та табличні величин критерію Фішера. Розраховані параметри критерію Фішера менші за табличні: для  $\alpha=40^\circ - F_{\text{розрах}}=2,91 < F_{\text{табл}}=3,49$ ; для  $\alpha=50^\circ - F_{\text{розрах}}=2,67 < F_{\text{табл}}=3,49$ . Математичні моделі (2) та (3) є адекватними до результатів експерименту з 95% вірогідністю.

З аналізу графічних залежностей результатів експериментальних досліджень (рис. 2 – 4) взаємного впливу відносної та переносної частот обертання ведучих валів машини для обробки деталей від кута нахилу геометричної осі робочої ємності на режим руху робочого масиву деталей зазначаємо, що варіювання кута нахилу ємності від  $\alpha=30^\circ$  до  $\alpha=50^\circ$  впливає на зміну взаємозалежності між параметрами відносної  $n_{3r}$  та переносної  $n_{5e}$  частот обертання ведучих валів машини, при яких спостерігається зміна режиму руху масиву деталей з каскадного до каскадного – водоспадного (змішаного). Збільшення кута нахилу ємності від  $\alpha=30^\circ$  до  $\alpha=50^\circ$  призводить до необхідності зменшення величини переносної  $n_{5e}$  частоти та одночасного збільшення відносної  $n_{3r}$  частоти обертання ведучих валів.

Для забезпечення незмінного режиму руху деталей в ємності, при зупиненому ведучому валу, що відповідає за переносний рух ( $n_{5e}=0$ , об/хв) робочого масиву, зміна кута нахилу ємності від  $\alpha=30^\circ$  до  $\alpha=50^\circ$  призводить до необхідності збільшення на 16 % частоти обертання валу, що відповідає за відносний рух ємності, а при зупиненому ведучому валу, що відповідає за відносний рух ємності ( $n_{3r}=0$ , об/хв) – до необхідності зменшення на 14 % частоти обертання валу, що відповідає за переносний рух ємності, по відношенню до відповідного параметра для кута нахилу ємності  $\alpha=30^\circ$  градусів. Така взаємозалежність між частотами обертання ведучих валів машини, дозволяє в широких межах підбирати та змінювати кут нахилу ємності так, щоб впливати на інтенсивність руху робочого масиву деталей з метою отримання необхідних умов обробки деталей легкої промисловості для різних асортиментних груп.

#### Висновки

Експериментально досліджено взаємний вплив частот обертання ведучих валів та кута нахилу геометричної осі робочої ємності циліндричної форми у галтувальній машині удосконаленої конструкції на режими руху масиву деталей у технологічній ємності.

Встановлено, що варіювання кута нахилу робочої ємності виміряному для вертикально верхнього положення кривошипу від меншої до більшої технологічно можливої величини призводить до необхідності зменшення величини переносної частоти та одночасного збільшення відносної частоти обертання ведучих валів галтувальної машини для забезпечення каскадно- водоспадного руху робочого масиву деталей. Для збереження незмінного режиму руху деталей у ємності при зупиненому приводному валу, що відповідає за переносний рух масиву деталей, збільшення кута нахилу ємності від меншого до більшого значення вимагає збільшення частоти обертання вала, що відповідає за відносний рух ємності. І навпаки, при зупиненому приводному валу, що відповідає за відносний рух ємності, збільшення кута нахилу вимагає зменшення частоти обертання вала, що відповідає за переносний рух робочої ємності. Отримані результати можна використовувати для визначення необхідних для обробки деталей певного асортименту частот обертання ведучих валів машини для забезпечення найкращих результатів їхньої обробки на машині розробленої конструкції.

#### Література

1. Яковенко І.Е. Технологічні основи машинобудування: навчальний посібник / І. Е. Яковенко, О. А. Пермяков, А.В. Фесенко – Харків: НТУ «ХП», 2022. – 421с.
2. Залюбовський М. Г. Машини та обладнання підприємств: навч. посібник / М. Г. Залюбовський, В. В. Малишев. – К.: Університет «Україна», 2020. – 120 с.
3. Панасюк І. В. Наукові основи проектування технологічних процесів обробки деталей взуття та фурнітури з пластмас і металів: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.19.06 / Панасюк Ігор Васильович; Київський національний ун-т технологій та дизайну. – К., 2004. – 36 с.
4. [Бурмістенков О. П.](#) Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія / О. П. Бурмістенков, Б. М. Злотенко, В. П. Коновал, І. В. Панасюк, М. Є. Скиба, О. М. Синюк. – Хмельницьк., 2007. – 255 с.
5. Панасюк І. В. Особливості оздоблювально-зачищувальної обробки деталей легкої промисловості технологічним середовищем / І. В. Панасюк, О.П. Бурмістенков, М. Г. Залюбовський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – 2013. – №3. – С. 190-194.
6. Розробка автоматизованого відцентрового змішувача безперервної дії з додатковою зоною змішування для сипких матеріалів легкої промисловості. Автор. дис. на здобуття вченого ступеня к-та техн. наук: 05.05.10 – машини легкої промисловості Стаценко В.В. / Київський національний університет технологій та дизайну. – К., 2007. – 21 с.
7. Jadhav P.S. A study on mixing of composite solids in the three dimensional turbula mixer / P.S. Jadhav, B.R. Jadhav // International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 2013, Vol. 2, Issue 3, P. 138-141.
8. Zalyubovskiy M.G. Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container / M.G. Zalyubovskiy, I.V. Panasyuk, Y.I. Smirnov, O.O. Kuznetsova, V.V. Malyshev // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019, Vol. 3 (134). – P. 9 – 17.

9. Сокур М.І. Модель руху матеріалу в проточній частині барабанного млина / М.І. Сокур, В.С. Білецький, Д.П. Божик, І.М. Сокур // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. збірник – 2017. – Вип. 66 (107). – С. 28-35.
10. Залюбовський М.Г. Основи проектування машин зі складним рухом робочих ємкостей для фінішної обробки дрібних деталей: монографія / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк – Київ: КНУТД, 2022. – 352 с.
11. Zalyubovskii M. G. Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container / M.G. Zalyubovskii, I.V. Panasyuk, S.O. Koshel', G.V. Koshel' // International Applied Mechanics, 58, No. 4, July 2022, 472 – 480.
12. Пат, №155458 Україна, МПК (2024.01): B01F 31/00, B24B 31/00 2024 р.) Машина для обробки деталей / Кошель С.О., Кошель Г.В., Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Кошель О.С., заявник та патентовласник Вищий навчальний заклад «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» – u202304573; заяв. 27.09.2023, опуб. 28.02.2024, Бюл. № 9/2024.
13. Пат, №160455 Україна, МПК (2025.01): B01F 31/00, B24B 21/00 2025 р.) Машина для обробки деталей / Кошель С.О., Кошель О.С., Панасюк І.В., Залюбовський М.Г., Кошель Г.В., заявник та патентовласник Вищий навчальний заклад «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» – u202500085; заяв. 07.01.2025, опуб. 10.09.2025, Бюл. № 37/2025.
14. Пат, №109083 Україна, МПК B01F 11/00, B24B 31/00. Машина для обробки деталей / М.Г.Залюбовський, І.В.Панасюк, заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – № u201601467; заявл. 18.02.2016, опублік. 10.08.2016, Бюл. № 15.
15. Григор'єв Ю. В. Основи статистичної обробки результатів експериментів з використанням Excel та R: навч. посіб. / Ю. В. Григор'єв, Д. О. Ісаєв. – К.: КНЕУ, 2020. – 176 с.
16. Левенець І. Б. Математична обробка експериментальних даних у середовищі MATLAB: навч. посіб. / І. Б. Левенець. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2017. – 133 с.
17. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments / D. C. Montgomery. – 9th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2017. – 752 p.

#### References

1. Yakovenko I.E. Tekhnolohichni osnovy mashynobuduvannia: navchalnyi posibnyk / I. E. Yakovenko, O. A. Permiakov, A.V. Fesenko – Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. – 421s.
2. Zaliubovskiy M. H. Mashyny ta obladnannia pidpriemstv: navch. posibnyk / M. H. Zaliubovskiy, V. V. Malyshev. – K.: Universytet «Ukraina», 2020. – 120 s.
3. Panasiuk I. V. Naukovi osnovy proektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv obrobky detalei vztuttia ta furnitury z plastmas i metaliv: avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk: 05.19.06 / Panasiuk Ihor Vasylovych; Kyivskiy natsionalnyi un-t tekhnolohii ta dyzainu. – K., 2004. – 36 s.
4. Burmistenkov O. P. Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vztuttivii ta shkirhalantereinii promyslovosti: monohrafiia / O. P. Burmistenkov, B. M. Zlotenko, V. P. Konoval, I. V. Panasiuk, M. Ye. Skyba, O. M. Syniuk. – Khmelnytsk., 2007. – 255 c.
5. Panasiuk I. V. Osoblyvosti ozdoblivalno-zachyshchuvanoi obrobky detalei lehkoii promyslovosti tekhnolohichnym seredovyschem / I. V. Panasiuk, O.P. Burmistenkov, M. H. Zaliubovskiy // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – 2013. – №3. – S. 190-194.
6. Rozrobka avtomatyzovanoho vidtsentrovoho zmishuvacha bezperervnoi dii z dodatkovoiu zonoiu zmishuvannia dlia sypkykh materialiv lehkoii promyslovosti. Avtor. dys. na zdobuttia vchenoho stupenia k-ta tekhn. nauk: 05.05.10 – mashyny lehkoii promyslovosti Statsenko V.V. / Kyivskiy natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu. – K., 2007. – 21 s.
7. Jadhav P.S. A study on mixing of composite solids in the three dimensional turbula mixer / P.S. Jadhav, B.R. Jadhav // International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 2013, Vol. 2, Issue 3, P. 138-141.
8. Zalyubovskiy M.G. Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container / M.G. Zalyubovskiy, I.V. Panasyuk, Y.I. Smirnov, O.O. Kuznetsova, V.V. Malyshev // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019, Vol. 3 (134). – P. 9 – 17.
9. Sokur M.I. Model rukhu materialu v protochnii chastyni barabannoho mlyna / M.I. Sokur, V.S. Biletskyi, D.P. Bozhyk, I.M. Sokur // Zbahachennia korysnykh kopalyn: Naук.-tekhn. zbirnyk – 2017. – Vyp. 66 (107). – S. 28-35.
10. Zaliubovskiy M.H. Osnovy proiektuvannia mashyn zi skladnym rukhom robochykh yemkosteii dlia finishnoi obrobky dribnykh detalei: monohrafiia / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk – Kyiv: KNUTD, 2022. – 352 s.
11. Zalyubovskii M. G. Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container / M.G. Zalyubovskii, I.V. Panasyuk, S.O. Koshel', G.V. Koshel' // International Applied Mechanics, 58, No. 4, July 2022, 472 – 480.
12. Пат, №155458 Україна, МПК (2024.01): V01F 31/00, V24V 31/00 2024 r.) Mashyna dlia obrobky detalei / Koshel S.O., Koshel H.V., Zaliubovskiy M.H., Panasiuk I.V., Koshel O.S., zaiavnyk ta patentovlasnyk Vyshchyi navchalnyi zaklad «Vidkrytyi mizhnarodnyi universytet rozvytku liudyny «Ukraina» – u202304573; zaiav. 27.09.2023, opub. 28.02.2024, Biul. № 9/2024.
13. Пат, №160455 Україна, МПК (2025.01): V01F 31/00, V24V 21/00 2025 r.) Mashyna dlia obrobky detalei / Koshel S.O., Koshel O.S., Panasiuk I.V., Zaliubovskiy M.H., Koshel H.V., zaiavnyk ta patentovlasnyk Vyshchyi navchalnyi zaklad «Vidkrytyi mizhnarodnyi universytet rozvytku liudyny «Ukraina» – u202500085; zaiav. 07.01.2025, opub. 10.09.2025, Biul. № 37/2025.
14. Пат, №109083 Україна, МПК B01F 11/00, V24V 31/00. Mashyna dlia obrobky detalei / M.H.Zaliubovskiy, I.V.Panasiuk, zaiavnyk ta patentovlasnyk Kyivskiy natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu – № u201601467; zaiavl. 18.02.2016, opublik. 10.08.2016, Biul. № 15.
15. Hryhoriev Yu. V. Osnovy statystychnoi obrobky rezul'tativ eksperymentiv z vykorystanniam Excel ta R: navch. posib. / Yu. V. Hryhoriev, D. O. Isaiev. – K.: KNEU, 2020. – 176 c.
16. Levenets I. B. Matematychna obrobka eksperymentalnykh danykh u seredovyschii MATLAB: navch. posib. / I. B. Levenets. – Lviv: Vydavnytstvo LNU, 2017. – 133 c.
17. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments / D. C. Montgomery. – 9th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2017. – 752 p.