

DOI 10.31891/2307-5732-2025-347-10  
УДК 621.924.7

**ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»  
<https://orcid.org/0000-0002-9183-2771>  
e-mail: [markzalubovskiy@gmail.com](mailto:markzalubovskiy@gmail.com)

**ПАНАСЮК ІГОР**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>  
e-mail: [panasjuk1961@gmail.com](mailto:panasjuk1961@gmail.com)

**КОШЕЛЬ СЕРГІЙ**

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

**КОШЕЛЬ ОЛЕКСАНДР**

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

**РОМАНЮК ОКСАНА**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»  
ORCID ID: 0000-0001-9774-9875  
e-mail: [markzalubovskiy@gmail.com](mailto:markzalubovskiy@gmail.com)

## СИНТЕЗ СТАТИЧНО ВИЗНАЧЕНОГО ШАРНІРНОГО ПРОСТОРОВОГО МЕХАНІЗМУ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ

*Запропоновано один з можливих варіантів звільнення просторового механізму галтувальної машини для обробки деталей від пасивного зв'язку. Здійснено синтез статично визначеного просторового механізму з подвійним ступенем рухомості машини для обробки деталей (галтувальної машини), де робоча ємність виконує складне просторове переміщення. Розроблено конструкцію галтувальної машини, яка містить дві ведучі ланки – ведучий вал та кривошип. Введення додаткової рухомої ланки кривошипу у кінематичний ланцюг просторового механізму машини дозволить, при необхідності, вмикати ефект додаткового струшування робочої ємності, що ефективно впливає на збільшення інтенсивності переміщення сипкого робочого масиву. Використання даної конструкції машини забезпечує підвищення надійності в процесі її експлуатації та одночасно сприяє збільшенню продуктивності під час виконання галтувальних операцій чи змішування сипких дрібнодисперсних речовин, зменшенню енерговитрат, може впливати на розширення сфери використання такого типу обладнання. Здійснено детальний опис принцип роботи розробленої конструкції галтувальної машини. Виконано синтез спеціальної конструкції приводу, що дозволяє передавати крутний момент на ведучий вал машини, який одночасно виконує додаткове зворотно-поступальне переміщення, описано принцип його роботи. Синтезована конструкція приводу містить шарнірну складову та ланцюгову передачу з трьома зірочками, дві з яких, окрім обертального руху, додатково виконують ще й зворотно-поступальне переміщення вздовж напрямних. Під час проведення досліджень застосовувався аналітичний підхід при виконанні синтезу шарнірного статично визначеного механізму з обертальними та однією поступальною кінематичними парами та спеціальної конструкції приводу, здійснено моделювання та розробку конструкції галтувальної машини в програмному забезпеченні системи автоматизованого проектування «SolidWorks 2021».*

*Ключові слова: просторовий механізм, ступінь рухомості, кінематична пара.*

**ZALYUBOVSKIY MARK**

Open International University of Human Development "Ukraine"

**PANASYUK IGOR, KOSHEL SERHIY, KOSHEL OLEXANDR**

Kyiv National University of Technology and Design

**ROMANIUK OKSANA**

Open International University of Human Development "Ukraine"

## SYNTHESIS OF A STATIC DETERMINED HINGED SPATIAL MECHANISM OF A TUMBLING MACHINE

*One of the possible options for freeing the spatial mechanism of a tumbling machine for processing parts from passive coupling is proposed. A synthesis of a statically determined spatial mechanism with a double degree of mobility of a machine for processing parts (tumbling machine) has been carried out, where the working capacity performs a complex spatial movement. A design of a tumbling machine has been developed, which contains two driving links - a driving shaft and a crank. The introduction of an additional movable crank link into the kinematic chain of the spatial mechanism of the machine will allow, if necessary, to turn on the effect of additional shaking of the working capacity, which effectively affects the increase in the intensity of movement of the loose working mass. The use of this machine design provides increased reliability during its operation and at the same time contributes to increasing productivity during rolling operations or mixing loose fine-dispersed substances, reducing energy consumption, and may affect the expansion of the scope of use of this type of equipment. A detailed description of the principle of operation of the developed design of the rolling machine has been made. A special drive design has been synthesized, which allows transmitting torque to the drive shaft of the machine, which simultaneously performs additional reciprocating movement, and the principle of its operation is described. The synthesized drive design contains a hinged component and a chain transmission with three sprockets, two of which, in addition to rotational movement, additionally perform reciprocating movement along the guides. During the research, an analytical approach was used to synthesize a hinged statically determined mechanism with rotational and one translational kinematic pair and a special drive design, and the design of a tumbling machine was modeled and developed in the SolidWorks 2021 computer-aided design software.*

*Keywords: spatial mechanism, degree of mobility, kinematic pair.*

### Постановка задачі

Просторові механізми, ще з давніх часів, масово використовуються у технологічному обладнанні. Сьогодні їхнє застосування поширюється [1] на різні галузі промисловості: машинобудування, легка та гірнична, фармацевтична та хімічна промисловості, автомобілебудування тощо.

Паралельно з розповсюдженням сфери використання таких механізмів існує ряд труднощів [2], які пов'язані з їх експлуатацією. Зокрема, більшість просторових механізмів можуть включати кінематичні пари з кількома ступенями вільності, наприклад, сферичні або циліндричні. Процес синтезу таких просторових механізмів хоч і не викликає значних труднощів, однак породжує виникнення проблем, пов'язаних зі складністю виготовлення самих сферичних кінематичних пар, необхідністю використання дорогих антифрикційних матеріалів, підвищеним зносом рухомих вузлів та, як наслідок, коротким терміном їх експлуатації.

Інша частина просторових механізмів може бути реалізована з наявністю лише обертальних кінематичних пар, які утворені підшипниками ковзання чи кочення. Проте, як зазначено у джерелі [3], застосування в таких механізмах виключно обертальних кінематичних пар створює значні труднощі під час їх синтезу та подальшої надійної експлуатації. Такі механізми [4] відзначаються структурною складністю своєї будови.

У роботі [5] зазначається, що кінематичні ланцюги більшості просторових шарнірних механізмів, які містять обертальні кінематичні пари, мають у своїй структурі пасивні зв'язки. Відомо [2], що наявність пасивних зв'язків у кінематичних ланцюгах просторових механізмів також викликає ряд проблем.

Дослідження [2, 6] показали, що просторові механізми з пасивними зв'язками здатні функціонувати лише за умови дотримання певних геометричних співвідношень між довжинами їх ланок, які не завжди можна забезпечити. Окрім того, пасивний зв'язок у кінематичному ланцюзі механізму може спричинити технологічні труднощі, пов'язані з необхідністю розрахунку та встановлення полів допусків із високою точністю. Зазвичай, функціонування таких механізмів реалізується за рахунок зазорів у кінематичних парах. Навіть незначна деформація будь-якої рухомої ланки може викликати раптове заклинювання всього механізму.

### Аналіз досліджень та публікацій

Прикладом технологічного обладнання, в основі якого застосовується просторовий механізм з наявністю пасивного зв'язку є змішувач сипких дрібнодисперсних речовин з комерційною назвою «Turbula» [7, 8]. Цей змішувач ще з 60-х років 20-го століття серійно виробляється швейцарською фірмою «Willy A. Bachofen AG» [9] та застосовується переважно у хімічній та фармацевтичній промисловостях. Фото змішувача «Turbula» представлено на рис. 1.



Рис. 1. Фото змішувача «Turbula»

Даний змішувач, за даними, які наведені у публікаціях [10, 11] реалізує найшвидше змішування дрібнодисперсних сипких речовин, при порівнянні з аналогічними типами обладнання. Така інтенсивність здійснення процесу змішування пояснюється специфікою переміщення робочої ємності машини, що є основною ланкою просторового механізму.

Робоча ємність змішувача здійснює просторове переміщення, а також обертається навколо власної вісі. Такий складний просторовий рух робочої ємності вперше був описаний ще у 1929 році [12, 13] німецьким вченим – скульптором та математиком Паулем Шатцем та повністю відповідає переміщенню оолоїда (тривимірної криволінійної геометричної фігури) на площині.

Упродовж останніх десяти років, авторами статті, дану конструкцію змішувача було також успішно реалізовано для виконання різних типів технологічних процесів, зокрема, для галтування [2, 6,

14, 15]: полірування поверхні полімерних виробів, відділення від ливників металевих формованих деталей тощо.

Також було проведено цілу низку досліджень та вдосконалень самого просторового механізму машини, під час яких було встановлено, що функціонування цього просторового механізму обумовлене його конструктивними особливостями, оскільки в його кінематичному ланцюзі наявним є пасивний зв'язок. Зокрема, він може функціонувати тільки за умови дотримання необхідних пропорцій довжин його ланок, які були визначені та описані у працях [16, 17]. Про негативний вплив пасивного зв'язку на експлуатаційні властивості механізму зазначається вище.

Як зазначено в роботах [6, 18], застосування статично визначених («раціональних») механізмів сприяє розширенню допусків на виготовлення деталей, зниженню трудомісткості та вартості їх виробництва, а також підвищенню надійності експлуатації технологічного обладнання. Водночас, згідно з [4, 5], усунення пасивного зв'язку у просторовому механізмі призводить до того, що навантаження в кінематичних парах визначатимуться лише динамічною та силовою технологічною взаємодіями. Питанням синтезу таких «раціональних» просторових механізмів присвячено багато досліджень [16], вагоме місце серед них займають роботи таких відомих науковців-механіків, як Л. Н. Решетов («Конструирование рациональных механизмов», 1972 р.) та С. Н. Кожевников («Основания структурного синтеза механизмов», 1979 р.).

Як відомо [], в основі змішувача «Turbula» лежить шестиланковий просторовий механізм з обертальними кінематичними парами. У свою чергу, авторами статті було розроблено низку механізмів без пасивних зв'язків, котрі, в подальшому, були успішно впроваджені у вітчизняне виробництво. Це стало можливим завдяки укладеним ліцензійним договорам між Київським національним університетом технологій та дизайну й ПрАТ «Molniya» (сmt. Барішівка, Київська обла), ТОВ «Polyplast» (м. Львів), ТОВ «ГК СВРОХІММАШ К.О.» (м. Фастів) і ПрАТ «Факел» (м. Фастів, Київська область). Успішна реалізація цих розробок підтверджує актуальність і перспективність такого обладнання в сучасних умовах.

#### **Виділення невіршених частин**

Не зважаючи на те, що попередньо було розроблено різноманіття конструкцій змішувачів та галтувальних машин зі статично визначеними просторовими механізмами, лишається значна кількість проблем та невіршених аспектів.

Наприклад, деякі конструкції машин (з робочими ємностями, які мають особливу форму – Патент України № та №) мають вузьке технологічне застосування та придатні лише для окремих технологічних операцій.

Конструкції машин [19], які оснащені двома робочими ємностями, які кінематично з'єднані між собою поступальною чи обертальною кінематичною парою, під час функціонування будуть реалізувати відмінну інтенсивність переміщення масиву в кожній із ємностей, що, як наслідок, буде призводити до різної швидкості здійснення технологічної операції в кожній із ємностей. Окрім того, у конструкції машини з двома ємностями, між якими встановлена обертальна кінематична пара, при експлуатації, будуть виникати значні навантаження у решти всіх інших кінематичних парах.

Також синтезовані просторові механізми машин [20 – 22] із введенням у їх кінематичний ланцюг додаткових рухомих ланок (коромисло, кривошип). За рахунок додаткової рухомої ланки, вдається досягнути додаткового ефекту струшування робочого масиву при виконанні відповідних технологічних операцій. Однак, в зазначених конструкціях машин відсутня можливість вимкнути ефект додаткового струшування робочої ємності, разом із її наповненням, що утворюється внаслідок введення у кінематичний ланцюг додаткової рухомої ланки.

#### **Формулювання цілі статті**

Таким чином, актуальним питанням є синтез нового статично визначеного шарнірного просторового механізму галтувальної машини із загальним ступенем вільності рівним двом, що, в цілому, підвищить надійність машини, дозволить, при необхідності, вмикати ефект додаткового струшування робочої ємності, цим самим, впливаючи, на підвищення продуктивності виконання відповідних технологічних операцій та можливості розширення сфери використання такого обладнання.

#### **Виклад основного матеріалу**

У роботах [2, 15 – 18] проведено детальний аналіз шестиланкового просторового механізму, що лежить в основі «базової» конструкції машини типу «Turbula». Використовуючи формулу Сомова-Малишева [22], яка застосовується для визначення ступеня рухомості просторових механізмів, встановлено, що ступінь рухомості механізму рівний нулю. Це пояснюється наявністю пасивного зв'язку в кінематичному ланцюзі, що може призводити до очевидних недоліків під час експлуатації обладнання. Таким чином, машина здатна ефективно функціонувати за умови дотримання точних геометричних співвідношень між довжинами її ланок, які були попередньо визначені в дослідженнях [18 – 22]. Однак, на практиці неможливо забезпечити дотримання точних геометричних співвідношень між довжинами ланок машини, оскільки у реальних умовах ідеально точне виготовлення деталей є практично неможливим. Фактично, неточність виготовлення деталей та функціонування такого механізму забезпечується за рахунок наявності зазорів у кінематичних парах механізму.

Враховуючи вищесказане було здійснено синтез восьмиланкового статично визначеного просторового механізму.

На рис. 2 представлено кінематичну схему розробленої галтувальної машини з просторовим восьмиланковим механізмом, а на рис. 3 – модель даної машини, виконана у САПР «SolidWorks 2021».

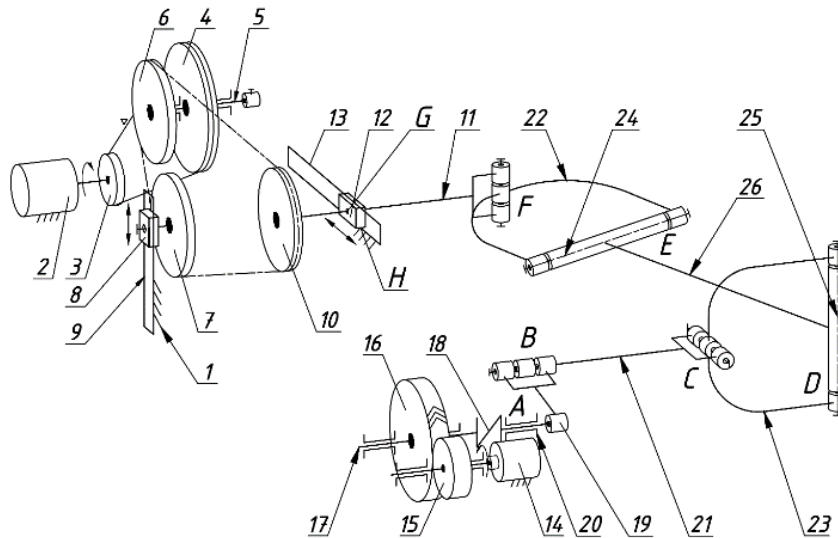


Рис. 2. Кінематична схема машини з синтезованим просторовим механізмом та приводом

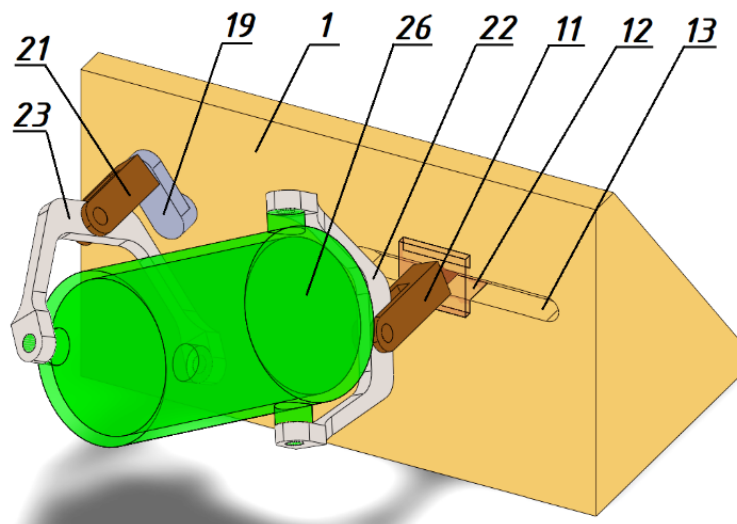


Рис. 3. Модель розробленої конструкції галтувальної машини

Просторовий механізм машини складається зі станини 1, основного та додаткового приводів, розміщених у станині 1. Основний привод, складається з електричного двигуна 2, на валу електричного двигуна 2, жорстким з'єднанням, закріплений ведучий шків 3 клинопасової передачі, веденого шківа 4, який має жорстке закріплення із валом 5 основного приводу. Ведуча зірочка 6, яка належить ланцюговій передачі, жорстко з'єднана з валом 5 приводу, а проміжна зірочка 7 – рухомо з'єднана з додатковим повзуном 8, котрий встановлений у вертикальній напрямній 9 станини 1 з можливістю здійснення зворотно-поступального переміщення вздовж неї. Ведена зірочка 10 виконана заодно з ведучим валом 11. Ведучий вал 11 встановлений рухомо у підшипнику основного повзуна 12, що встановлений у горизонтальній напрямній 13 станини 1 з можливістю здійснення зворотно-поступального переміщення вздовж неї. Додатковий привод складається з електродвигуна 14, на валу якого жорстко закріплена шестерня 15 зубчастої передачі, зубчастого колеса 16, яке жорстко закріплено на валу 17. Вал 17 додаткового приводу, за допомогою муфти 18, жорстко з'єднаний з кривошипом 19, що встановлений у підшипниковій опорі 20. Ведений вал 21 має рухоме з'єднання з кривошипом 19. Ведучий вал 11 та ведений вал 21 шарнірно поєднані подвійним карданним шарніром. Подвійний карданний шарнір складається з двох вилок: ведучої 22 та веденої 23, а також діаметрально взаємо перпендикулярних осей 24 і 25. У свою чергу, робоча ємність 26 закріплена між осями 24 та 25.

Далі, скориставшись формулою Сомова – Малишева, було встановлено, що ступінь рухомості  $W$  такого механізму буде дорівнювати два:

$$W = 6n - \sum_{s=1}^{s=5} (6 - s)P_s = 2,$$

де  $n=7$  – кількість ланок просторового шарнірного механізму, які є рухомими (ведучий вал 11, ведений вал 21, ведуча вилка 22, ведена вилка 23, робоча ємність 26, кривошип 19, основний повзун 12),  $P_s$  – кількість рухомих кінематичних пар  $s$  – класу (7 обертальних кінематичних пар 5-го класу:  $G, F, E, D, C, B, A$  та 1 поступальна кінематична пара 6-го класу:  $H$ ).

У просторовому механізмі, де ступінь рухомості рівний двом, потрібно використовувати дві ведучі ланки (ведучий вал 11 та кривошип 19). Таким чином, реалізується можливість вмикання ефекту додаткового струшування робочої ємності, цим самим, впливати на підвищення продуктивності виконання відповідних технологічних операцій та можливості розширення сфери використання такого обладнання.

У той само час, функціонування механізму можливе і з однією ведучою ланкою – ведучим валом 11. У такому випадку ефекту додаткового струшування робочої ємності буде відсутнім і режим обробки деталей буде більш «делікатним».

Просторовий механізм працює таким чином: після увімкнення основного приводу, розташованого у станині 1, обертальний рух від електродвигуна 2, через клинопасову передачу, передається до ведучої зірочки 6. Ланцюгова передача передає обертання від ведучої зірочки 6 передається до проміжної зірочки 7 та веденої зірочки 10. Окрім обертання, проміжна зірочка 7, разом із додатковим повзуном 8, здійснює зворотно-поступальний рух відносно напрямної 9, яка має вертикальне розташування. Обертання веденої зірочки 10 разом із веденим валом 11, який кінематично з'єднаний із повзуном 12 також доповнюється зворотно-поступальним переміщенням відносно напрямної 13, яка має горизонтальне розташування. Повзун 12, разом із ведучим валом 11 та веденою зірочкою 10, за один їх оберт, здійснює чотири зворотно-поступальні переміщення відносно напрямної 13, яка має горизонтальне розташування. Обертання ведучого валу 11 перетворюється у просторовий рух ведучої вилки 22, яка через вісь 24 передає рух до робочої ємності 26, яка також просторово переміщається та додатково обертається навколо власної поздовжньої осі. Просторовий рух робочої ємності 26, через вісь 25 передається на ведену вилку 23, від веденої вилки 23, на ведений вал 21, що рухомо встановлений у кривошипі 19, який закріплений у підшипниковій опорі 20 станини 1.

У свою чергу, при увімкненні додаткового приводу, обертання електричного двигуна 14, за допомогою зубчастої передачі, сформованою шестернею 15 та зубчастим колесом 16, вал 17 та муфту 18 передається на кривошип 19, що встановлений у підшипниковій опорі 20 станини 1. Таке обертання кривошипу 19 буде викликати додаткову складову руху веденого валу 21, а саме – вертикальне обертання навколо осі кривошипу 19. Таким чином, один бік робочої ємності 26, який з'єднаний з веденою вилкою 23 машини, отримує додаткову складову просторового переміщення, виникає ефект додаткового струшування робочої ємності 26.

При виконанні відповідної галтувальної технологічної операції, залежно від затребуваних технологічних умов, додатковий привод може бути, як увімкненим, так і вимкненим. При цьому, напрям та значення кутової швидкості обертання валу 17 додаткового приводу може відрізнитися від напряму та значення кутової швидкості обертання валу 11 основного приводу.

У зв'язку з тим, що один бік робочої ємності 26, що рухомо з'єднаний з веденою вилкою 23, отримуватиме додаткову складову просторового переміщення, з'являється можливість регулювати інтенсивність, характер та режим руху сипкого гранульованого масиву між протилежними сторонами робочої ємності 26, а також надавати додаткового ефекту струшування вмісту робочої ємності 26. Це, своєю чергою, дозволяє вирівняти інтенсивність переміщення сипкого масиву, при переміщенні в зустрічних напрямках робочої ємності 26 між її торцями, забезпечуючи раціональні умови для реалізації галтувальних операцій з високою продуктивністю. Далі, в наступній частині представлено аналітичне дослідження синтезованого восьмиланкового механізму з розрахунком конструктивних та геометричних властивостей машини.

### Висновки

1. Синтезовано раціональний статично визначений просторовий восьмиланковий механізм із ступенем вільності рівним двом, що дозволило розробити конструкцію машини для обробки деталей (галтувальну машину) з двома ведучими ланками, у котрій робоча ємність здійснює складне просторове переміщення. Сфера використання конструкції машини, яка була розроблена – обробка металевих та полімерних деталей абразивом у вигляді вільних гранул, а також змішування фракцій сипких дрібнодисперсних речовин. Використання розробленої конструкції галтувальної машини дозволить значно підвищити надійність та довговічність її експлуатації створить необхідні умови для збільшення продуктивності технологічних операцій та можливості розширення сфери використання такого обладнання.

2. Для розробленої конструкції галтувальної машини також виконано синтез спеціальної конструкції приводу, що дозволяє передавати крутний момент на ведучий вал, який одночасно виконує зворотно-поступальне переміщення.

## Література

1. Залюбовський, М. Г., & Малишев, В. В. (2020). *Машини та обладнання підприємств: навч. посібник*. Київ: Університет «Україна».
2. Залюбовський, М. Г., & Панасюк, І. В. (2022). *Основи проектування машин зі складним рухом робочих ємкостей для фінішної обробки дрібних деталей: монографія*. Київ: КНУТД.
3. Мудров, А. Г., & Марданов, Р. Ш. (2015). Обзор исследований пространственных механизмов с вращательными шарнирами. *Теория механизмов и машин*, 13(2), 62–70.
4. Antonyuk, E. Y., Sakharnov, V. A., & Koval', N. I. (2010). Dynamic system of an engine with spatially rocking links: A mathematical model. *International Applied Mechanics*, 46(9), 1039–1049.
5. Antonyuk, E. Y., & Zabuga, A. T. (2016). Motion of an articulated vehicle with two-dimensional sections subject to lateral obstacles. *International Applied Mechanics*, 52(4), 404–412.
6. Залюбовський, М. Г., Панасюк, І. В., & Малишев, В. В. (2018). *Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей: монографія*. Київ: Університет «Україна».
7. Marigo, M., Davies, M., Leadbeater, T., Cairns, D. L., Ingram, A., & Stitt, E. H. (2013). Application of positron emission particle tracking (PEPT) to validate a discrete element method (DEM) model of granular flow and mixing in the Turbula mixer. *International Journal of Pharmaceutics*, 446(1–2), 46–58.
8. Mayer-Laigle, C., Gatumel, C., & Berthiaux, H. (2015). Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, 95, 248–261.
9. Willy A. Bachofen (WAB). (2025). *Mixing technology: Products*. Willy A. Bachofen AG. Retrieved from <https://www.wab-group.com/en/mixing-technology/products/>
10. Marigo, M., Cairns, D. L., Davies, M., Cook, M., Ingram, A., & Stitt, E. H. (2010). Developing mechanistic understanding of granular behaviour in complex moving geometry using the discrete element method. Part A: Measurement and reconstruction of TurbulaMixer motion using positron emission particle tracking. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 59(3), 217–238.
11. Marigo, M., Cairns, D. L., Davies, M., Ingram, A., & Stitt, E. H. (2011). Developing mechanistic understanding of granular behaviour in complex moving geometry using the discrete element method. Part B: Investigation of flow and mixing in the Turbula mixer. *Powder Technology*, 212, 17–24.
12. Bhoite, K., Kakandikar, G. M., & Nandedkar, V. M. (2015). Schatz mechanism with 3D-motion mixer: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2, 1700–1706.
13. Schatz, P. (2016). *Technik und Verwandlung: Der Weg zu einer menschen- und naturgemäßen Technik*. Verlag am Goetheanum.
14. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V., Koshel', S. O., & Koshel', G. V. (2022). Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container. *International Applied Mechanics*, 58(4), 472–480.
15. Залюбовський, М. Г., Панасюк, І. В., & Малишев, В. В. (2020). Перспективні технології обробки деталей та змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 1: способи технологічних операцій). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2(31(70)), 29–35.
16. Zalyubovskii, M. G., & Panasyuk, I. V. (2020). On the study of the basic design parameters of a seven-link spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*, 56(1), 54–64.
17. Zaliubovskyi, M. G., Panasiuk, I. V., Smirnov, Yu. I., & Malyshev, V. V. (2020). Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 178(4), 69–75.
18. Zalyubovskyi, M. G., Panasyuk, I. V., Koshel', S. O., & Lychov, D. O. (2022). Design parameters of the four-link hinged mechanism of barreling machine drive. *International Applied Mechanics*, 58(6), 725–731.
19. Zalyubovskii, M. G., & Panasyuk, I. V. (2020). Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels. *International Applied Mechanics*, 56(6), 762–772.
20. Zalyubovskyi, M. G., Panasyuk, I. V., Koshel', S. O., & Koshel', G. V. (2021). Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. *International Applied Mechanics*, 57(4), 466–476.
21. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V., Koshel', S. O., & Koshel', G. V. (2022). Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container. *International Applied Mechanics*, 58(4), 472–480.
22. Zalyubovskii, M., Panasyuk, I., Koshel, S., Koshel, O., & Akimova, L. (2024). Synthesis and research of the spatial eight-link mechanism of the barreling machine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 42–49.

## References

1. Zaliubovskyi, M. H., & Malyshev, V. V. (2020). *Mashyny ta obladnannya pidpriemstv: navch. posibnyk*. Kyiv: Universytet «Ukraina».

2. Zaliubovskiy, M. H., & Panasiuk, I. V. (2022). *Osnovy proektuvannya mashyn zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia finishnoi obrobky drobnykh detalei: monohrafiia*. Kyiv: KNUTD.
3. Mudrov, A. H., & Mardanov, R. Sh. (2015). *Obzor yssledovaniy prostranstvennykh mekhanizmov s vrashchatelnymy sharnyramy*. *Teoriya mekhanizmov y mashyn*, 13(2), 62–70.
4. Antonyuk, E. Y., Sakharov, V. A., & Koval', N. I. (2010). Dynamic system of an engine with spatially rocking links: A mathematical model. *International Applied Mechanics*, 46(9), 1039–1049.
5. Antonyuk, E. Y., & Zabuga, A. T. (2016). Motion of an articulated vehicle with two-dimensional sections subject to lateral obstacles. *International Applied Mechanics*, 52(4), 404–412.
6. Zaliubovskiy, M. H., Panasiuk, I. V., & Malyshev, V. V. (2018). *Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei: monohrafiia*. Kyiv: Universytet «Ukraina».
7. Marigo, M., Davies, M., Leadbeater, T., Cairns, D. L., Ingram, A., & Stitt, E. H. (2013). Application of positron emission particle tracking (PEPT) to validate a discrete element method (DEM) model of granular flow and mixing in the Turbula mixer. *International Journal of Pharmaceutics*, 446(1–2), 46–58.
8. Mayer-Laigle, C., Gatamel, C., & Berthiaux, H. (2015). Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, 95, 248–261.
9. Willy A. Bachofen (WAB). (2025). *Mixing technology: Products*. Willy A. Bachofen AG. Retrieved from <https://www.wab-group.com/en/mixing-technology/products/>
10. Marigo, M., Cairns, D. L., Davies, M., Cook, M., Ingram, A., & Stitt, E. H. (2010). Developing mechanistic understanding of granular behaviour in complex moving geometry using the discrete element method. Part A: Measurement and reconstruction of TurbulaMixer motion using positron emission particle tracking. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 59(3), 217–238.
11. Marigo, M., Cairns, D. L., Davies, M., Ingram, A., & Stitt, E. H. (2011). Developing mechanistic understanding of granular behaviour in complex moving geometry using the discrete element method. Part B: Investigation of flow and mixing in the Turbula mixer. *Powder Technology*, 212, 17–24.
12. Bhoite, K., Kakandikar, G. M., & Nandedkar, V. M. (2015). Schatz mechanism with 3D-motion mixer: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2, 1700–1706.
13. Schatz, P. (2016). *Technik und Verwandlung: Der Weg zu einer menschen- und naturgemäßen Technik*. Verlag am Goetheanum.
14. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V., Koshel', S. O., & Koshel', G. V. (2022). Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container. *International Applied Mechanics*, 58(4), 472–480.
15. Zaliubovskiy, M. H., Panasiuk, I. V., & Malyshev, V. V. (2020). Perspektivni tekhnolohii obrobky detalei ta zmishuvannya sypkykh rehovyn u rukhomykh robochykh yemkostiakh (chastyna 1: sposoby tekhnolohichnykh operatsii). *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, 2(31(70)), 29–35.
16. Zalyubovskii, M. G., & Panasyuk, I. V. (2020). On the study of the basic design parameters of a seven-link spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*, 56(1), 54–64.
17. Zaliubovskiy, M. G., Panasiuk, I. V., Smirnov, Yu. I., & Malyshev, V. V. (2020). Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 178(4), 69–75.
18. Zalyubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Koshel', S. O., & Lychov, D. O. (2022). Design parameters of the four-link hinged mechanism of barreling machine drive. *International Applied Mechanics*, 58(6), 725–731.
19. Zalyubovskii, M. G., & Panasyuk, I. V. (2020). Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels. *International Applied Mechanics*, 56(6), 762–772.
20. Zalyubovskiy, M. G., Panasyuk, I. V., Koshel', S. O., & Koshel', G. V. (2021). Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. *International Applied Mechanics*, 57(4), 466–476.
21. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V., Koshel', S. O., & Koshel', G. V. (2022). Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container. *International Applied Mechanics*, 58(4), 472–480.
22. Zalyubovskii, M., Panasyuk, I., Koshel', S., Koshel', O., & Akimova, L. (2024). Synthesis and research of the spatial eight-link mechanism of the barreling machine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 42–49.