

МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

DOI 10.31891/2307-5732-2021-295-2-116-122

УДК 621.924.7

М.Г. ЗАЛЮБОВСЬКИЙ

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

І.В. ПАНАСЮК

Київський національний університет технологій та дизайну

**ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНОГО МОМЕНТУ ОПОРУ ВЕДУЧОГО ВАЛУ
ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ, СТВОРЕНОГО МАСОЮ
СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА У РОБОЧІЙ ЄМКОСТІ**

З поміж різних типів галтувального обладнання, яке широко використовується у різних галузях промисловості України найбільш перспективним вважаються машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. Виконані експериментальні дослідження переміщення сипкого середовища в середині робочої ємкості з прозорими стінками. Встановлені положення рухомих ланок та робочої ємкості, при яких усе сипке середовище своєю масою буде створювати найбільше значення статичного моменту опору на ведучому валу машини. Виконані аналітичні дослідження статичного моменту опору, що утворюється на ведучому валу машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості в результаті впливу сили тяжіння, яка діє на завантажене до ємкості сипке середовище, отримані відповідні математичні залежності. Отримані результати досліджень стануть у нагоді при подальшому визначенні динамічного моменту опору на ведучому валу, який буде створений в результаті переміщення рухомих ланок машини та сипкого середовища в середині ємкості. Також результати досліджень можуть бути використані відповідними машинобудівними підприємствами на стадії проектування галтувальних типів обладнання з ємкостями, що виконують складний просторовий рух.

Ключові слова: галтувальне обладнання, сипке середовище, статичний момент опору.

M.G. ZALYUBOVSKYI

Open International University of Human Development "Ukraine"

I.V. PANASYUK

Kyiv National University of Technology and Design

**DETERMINATION OF THE STATIC MOMENT OF THE RESISTANCE OF THE DRIVE SHAFT OF THE
REPLACING MACHINE, CREATED BY THE MASS OF THE BULK ENVIRONMENT IN THE WORK TANK**

Among the different types of shredding equipment, which is widely used in various industries of Ukraine, the most promising are machines with complex spatial movement of working tanks. Experimental studies of the movement of the bulk array in the middle of the working tank with transparent walls were performed. The positions of the moving links and the working capacity are set, at which the whole bulk array by its mass will create the greatest value of the static moment of resistance on the driving shaft of the machine. Analytical studies of the static moment of resistance formed on the drive shaft of the machine with complex spatial motion of the working tank as a result of the influence of gravity acting on the bulk array loaded into the tank, the corresponding mathematical dependences are obtained. The obtained research results will be useful in further determining the dynamic moment of resistance on the drive shaft, which will be created by moving the moving parts of the machine and the bulk array in the middle of the tank. Also, the results of research can be used by relevant machine-building enterprises at the stage of designing galvanizing types of equipment with tanks that perform complex spatial movement.

Key words: shredding equipment, bulk array, static moment of resistance.

Постановка задачі. Підвищення продуктивності виготовлення металевих та полімерних деталей значною мірою залежить від скорочення часу, який витрачається на реалізацію підготовчих та фінішних галтувальних технологічних операцій. На ці операції витрачається до 80% [1] технологічного часу. У легкій промисловості невеликі типові деталі та вироби (фурнітура, гудзики, застібки) [2] виготовляються механічною обробкою або литтям [3]. Ці деталі потребують проведення подальших фінішних галтувальних технологічних операцій, яка часто виконується ручним способом або засобами малої механізації. Галтувальні барабани з обертовим рухом робочої ємкості [4], а також вібраційні машини [5], які застосовуються для всіх вище згаданих операцій здебільшого мають низьку продуктивність. З поміж різних типів галтувального обладнання, яке широко використовується у різних галузях промисловості України найбільш перспективним вважаються машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей [6].

Однак, на сьогоднішній день, даний тип обладнання не має широкого використання у промисловості України. Зокрема, це пов'язано із відсутністю загальнодоступних комплексних підходів щодо дослідження його конструктивних, технологічних та енергетичних особливостей. Таким чином, проведення аналітичних та експериментальних досліджень конструктивних, технологічних та енергетичних параметрів такого обладнання є актуальною задачею для подальшого розвитку різних галузей промисловості України.

Аналіз досліджень та публікацій. З точки зору дослідження енергетичних параметрів галтувальних машин відомий ряд наукових робіт. Зокрема, у роботі [7] проведені дослідження потужності, яка споживається на ведучому валу машин з обертовим рухом барабанів, в залежності від ступеня заповнення самого барабану сипким середовищем. У роботі [8] представлено методику розрахувати

потужності відцентрових машин. У статті [9] авторами виконані дослідження статичного моменту опору на ведучому валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, який створений масою рухомих ланок машини. Було визначено, що в положеннях машини, коли її робоча ємкість проектується на вертикальну площину в натуральну величину, на ведучому валу виникатимуть максимальні значення статичного моменту опору.

Виділення невирішених частин. Для можливості отримання загального універсального закону, який би описував зміну моменту опору на ведучому валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, необхідно врахувати усі статичні та динамічні сили, що діють на рухомі ланки машини, які виконують складний просторовий рух та сили, діючі на сипке середовище. У роботі [9] було досліджено лише статичну складову моменту опору ведучого валу, що створена силою тяжіння, яка діє на рухомі ланки машини. Решта робіт присвячені дослідженням енергетичних параметрів у інших типах обладнання та не можуть бути застосовані до галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей.

Формулювання цілей. Метою даної роботи є визначення статичного моменту опору на ведучому валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, який створений масою сипкого середовища, завантаженого до ємкості.

Виклад основного матеріалу. Дослідження статичного моменту опору на ведучому валу виконувалися частково із використанням експериментального стенду «базової» конструкції машини [10] зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу «Turbula» [11]. Модель «базової» конструкції машини представлена на рис. 1 (а), її кінематична схема – на рис. 2 (б), а фото експериментального стенду – на рис. 3 (в).

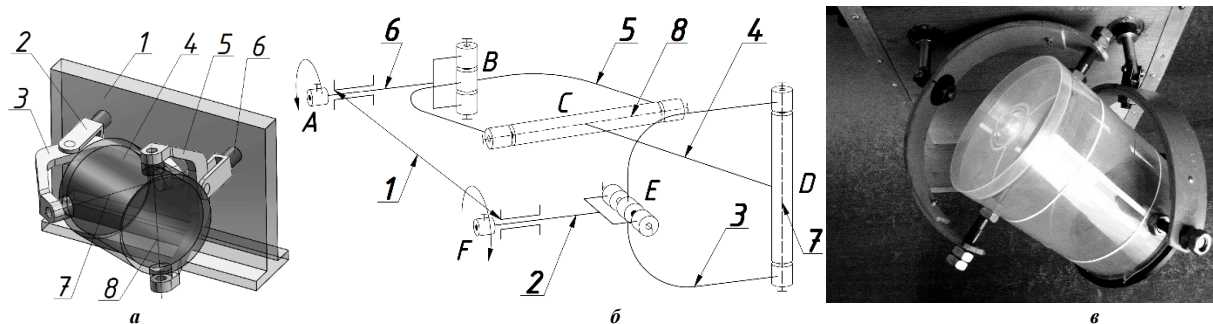


Рис. 1. «Базова» конструкція машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості: а – модель машини, б – кінематична схема, в – фото експериментального стенду

Машина складається зі станини 1, ведучого 2 та веденого 6 валів, котрі встановлені у станині 1 паралельно в одній площині та з'єднані між собою подвійним просторовим шарніром, що виконаний у вигляді ведучого шатуна 3, веденого шатуна 5 та робочої ємкості 4 (проміжного шатуна), закріпленої між ведучим та веденим шатунами на діаметрально взаємно перпендикулярних геометричних осях 7 та 8 відповідно. Рухомі ланки машини утворюють собою просторовий шестиланковий механізм [12] з обертальними кінематичними парами [13].

Одним з основних факторів, які впливають на створення моменту опору на ведучому валу, є маса завантаженого до робочої ємкості сипкого середовища. Статичний момент опору на ведучому валу машини з урахуванням маси сипкого середовища визначатимемо за принципом, аналогічним до того, що представлений у роботі [9], як суму моментів сил тяжіння створених масою сипкого середовища відносно відповідного центру рівноваги машини. Також слід зазначити, що не лише маса сипкого середовища впливатиме на значення моменту опору ведучого валу, а ще й об'єм ємкості, який заповнений ним, що проявлятиметься у відносному переміщенні сипкого середовища відносно стінок ємкості. Наприклад, при 90-100% заповненні робочої ємкості, переміщення сипкого середовища відносно її стінок буде практично відсутнім, таким чином, масу сипкого середовища можна додати до сумарної маси рухомих ланок машини. Таку загальну масу можна умовно розділити між визначеними у роботі [9] точками рівноваги.

Інша ситуація виникатиме у випадку неповного заповнення робочої ємкості, коли сипке середовище здатне переміщатися на значну відстань відносно її стінок. Відомо [14–16], що раціональний рівень заповнення робочої ємкості такої машини, повинен становити приблизно 50% від загального її об'єму. Таким чином, досліджували момент опору на ведучому валу машини при 50% рівні її заповнення, визначали при яких кутах повороту ведучого валу виникатиме максимальний момент опору під впливом сили тяжіння, яка діє на сипке середовище.

Для визначення такого кута повороту робочу ємкість експериментального стенду заповнювали сипким матеріалом на 50%, надавали обертального руху ведучому валу при низькій кутовій швидкості (≈ 1 об/хв) та паралельно спостерігали за переміщенням сипкого середовища крізь прозорі стінки ємкості відносно встановлених [9] центрів рівноваги машини O' та Q' . На рис. 2 представлено положення рухомих ланок машини, а також відповідне розташування сипкого середовища відносно стінок робочої ємкості та центрів рівноваги з кроком в 30° повороту ведучого валу та для кутів повороту ведучого валу в 54° та 126° з відображенням у вертикальній площині (вид спереду).

На рис. 2 горизонтальна лінія відображає відстань між осями обертання ведучого та веденого валів O та Q відповідно. Через відповідний центр рівноваги машини O' чи Q' проведено вертикальні лінії. Маса частини сипкого середовища, яка знаходиться ліворуч від вертикальної лінії, що проходить через центр рівноваги O' або праворуч від лінії, що проходить через центр рівноваги Q' буде створювати допоміжний момент сили тяжіння, а маса частини сипкого середовища, який знаходиться праворуч від вертикальної лінії, що проходить через центр рівноваги O' або ліворуч від лінії, що проходить через центр рівноваги Q' – момент опору.

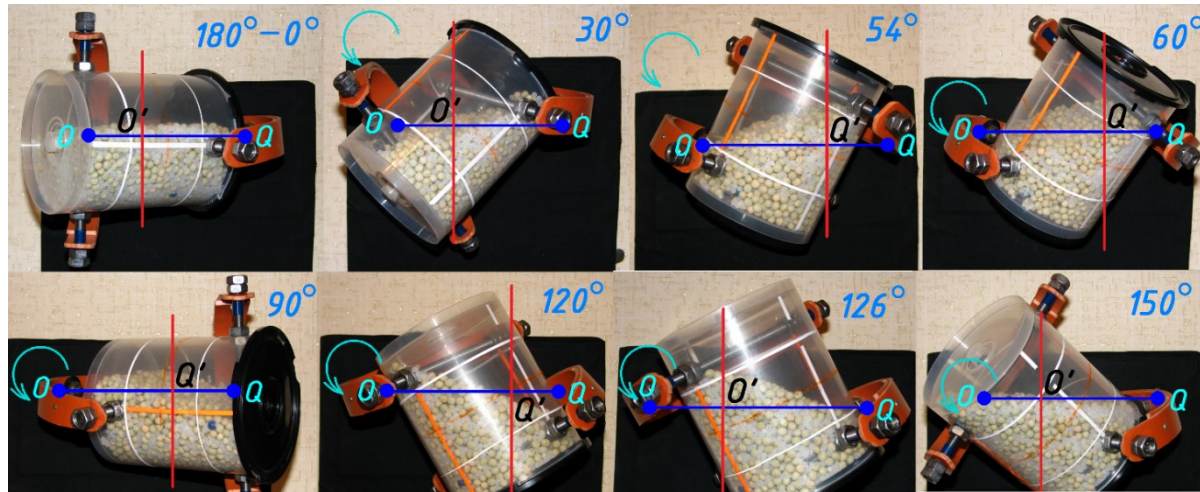


Рис. 2. Розташування сипкого середовища відносно стінок робочої ємкості та центрів рівноваги

Проаналізувавши представлені фрагменти роботи машини з точки зору утворення максимального моменту опору на ведучому валу, можна стверджувати, що такими будуть положення, котрі відповідають куту повороту ведучого валу в 54° та 126° . Саме при таких положеннях рухомих ланок машини значно більша частина сипкого середовища буде розташована в тій частині робочої ємкості, де сила тяжіння від його маси впливатиме на створення моменту опору. Крім того, такі положення ємкості, з точки зору створення максимального статичного моменту опору на ведучому валу, співпадають з положеннями, визначеними у роботі [9].

Вважатимемо, що в сипкому середовищі практично відсутні сили зчеплення між окремими частинками, коефіцієнт внутрішнього тертя зведений до мінімуму, частинки мають однакові гранулометричні властивості.

Якщо розглянути циліндричну ємкість, що знаходиться у вертикальному положенні та заповнена на 50%, то сипке середовище прийматиме форму, обмежену внутрішньою циліндричною поверхнею ємкості, її нижнім торцем, а також вільним граничним шаром сипкого середовища, яке у знерухоженому стані завжди буде приймати вигляд наближений до горизонтальної площини. У проекції на вертикальну площину сипке середовище утворює прямокутну площину (рис. 3 (а)). Під час подальшого переміщення ємкості при низькій кутовій швидкості ведучого валу сипке середовище, як єдине ціле, постійно змінюватиме свою стереометричну форму, однак, при будь-якому положенні ємкості його верхній граничний шар утворюватиме площину наближену до горизонтальної. Таким чином, при положенні робочої ємкості, яке відповідає куту повороту ведучого валу в 54° чи 126° , сипке середовище прийматиме форму циліндра з нахиленою верхньою основою, а при проектуванні на вертикальну площину утворюватиметься прямокутна трапеція $ABCD$ (рис. 3 (б)).

Було умовно розподілено сипке середовище на дві "частини" відносно вертикальної площини, що проходить через центр рівноваги Q' . У результаті чого значно "більша частина" сипкого середовища $Q'BCDJ$, в якій сконцентрована майже вся його маса, котра знаходиться праворуч від вертикальної площини, під дією сили тяжіння створює момент опору на ведучому валу машини. "Менша частина" сипкого середовища $AQ'J$, також викликати збільшення моменту опору за рахунок того, що безпосередньо контактує з "більшою частиною" сипкого середовища та створює на нього тиск від своєї маси. Тому для ємкості, яка завантажена на 50%, в незалежності від розподілу мас сипкого середовища між більшою та меншою "частинами", вважатимемо, що на створення максимального моменту опору на ведучому валу впливає уся маса сипкого середовища.

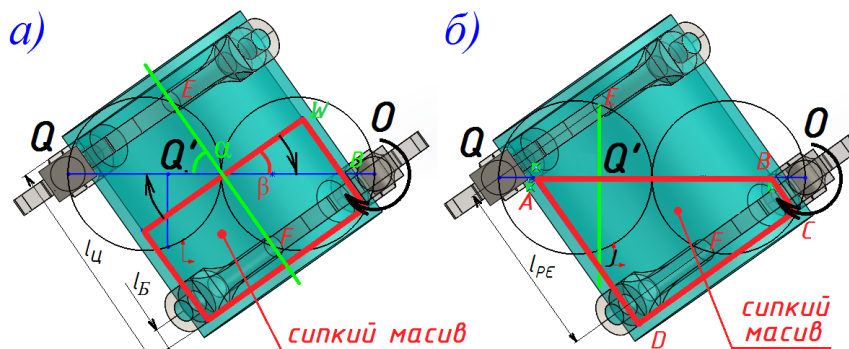


Рис. 3. Форма сипкого середовища у проекції на вертикальну площину: а – коли робоча ємкість займає вертикальне положення, б – при нахиленому положенні ємкості, що відповідає куту повороту ведучого валу в 54° чи 126°

Вираз для визначення сили тяжіння, що діє на сипке середовище, матиме вигляд:

$$\bar{G}_m = m_c \bar{g}, \quad (1)$$

де m_c – сумарна маса сипкого середовища, завантаженого до робочої ємкості, [кг].

Для визначення статичного моменту опору необхідно також враховувати параметр l_B (рис. 3 (а)), який може мати відмінне значення при різних геометричних параметрах робочих ємкостей. Вираз, що характеризує відношення довжини l_B до міжосьової відстані робочої ємкості l_{PC} буде мати вигляд:

$$z = \frac{l_B}{l_{PC}}. \quad (2)$$

Варто зазначити, що співвідношення геометричних параметрів z , яке характерне для 3D моделі робочої ємкості, що досліджується становитиме $z \approx 0,13$. Таке значення z обумовлено конструктивними особливостями машини. Для того, щоб визначити точку прикладання вектора сили тяжіння до "більшої частини" сипкого середовища, необхідно встановити положення її центру мас. Знайдемо його за допомогою САПР SolidWorks, при цьому вважали, що сипке середовище, яке утворило форму циліндру з нахилоною верхньою основою, є суцільним твердим тілом з однаковою густиною по всьому об'єму. Таким чином, у SolidWorks було змодельоване сипке середовище у вигляді єдиного суцільного твердого тіла відповідної маси та розділено його об'єм на відповідні умовні дві "частини".

Для побудови твердого тіла в SolidWorks задавалися його наступними геометричними параметрами: діаметр внутрішнього торця ємкості, а також довжини l_{BC} та l_{AD} , які можна визначити з наступних виразів:

$$l_{BC} = 0,5l_{IC} - l_{WB}. \quad (3)$$

$$l_{AD} = 0,5l_{IC} + l_{WB}, \quad (4)$$

де l_{IC} – довжина внутрішньої стінки робочої ємкості; l_{WB} – відстань між верхнім шаром сипкого середовища, коли ємкість розташована вертикально та верхнім шаром сипкого середовища, утвореного положенням робочої ємкості, яка нахилена під відповідним кутом. У свою чергу, l_{WB} можна визначити так:

$$l_{WB} = r \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

де r – радіус внутрішнього торця робочої ємкості; Кут β визначається як:

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 55^\circ = 35^\circ, \quad (6)$$

де α – кут нахилу осі робочої ємкості до горизонтальної площини. При такому положенні робочої ємкості кут α має найбільше своє значення $\alpha \approx 55^\circ$ та буде однаковим для будь-якого типорозміру машини, для якого виконуються умови, які попередньо були отримані у роботах [1, 17]. Далі підставимо значення β у вираз (5):

$$l_{WB} = r \cdot \operatorname{tg} 35^\circ. \quad (7)$$

Запишемо вирази (3) та (4) з урахуванням (7):

$$l_{BC} = 0,5l_{IC} - r \cdot \operatorname{tg} 35^\circ. \quad (8)$$

$$l_{AD} = 0,5l_{IC} + r \cdot \operatorname{tg} 35^\circ. \quad (9)$$

Таким чином, за попередньо встановленими геометричними параметрами, за допомогою САПР SolidWorks, було виконано 3D моделювання сипкого середовища з подальшим визначенням місця розташування центру мас ЦМ його більшої частини. Місце розташування центру мас ЦМ сипкого середовища на вертикальній проекції машини представлено на рис. 4.

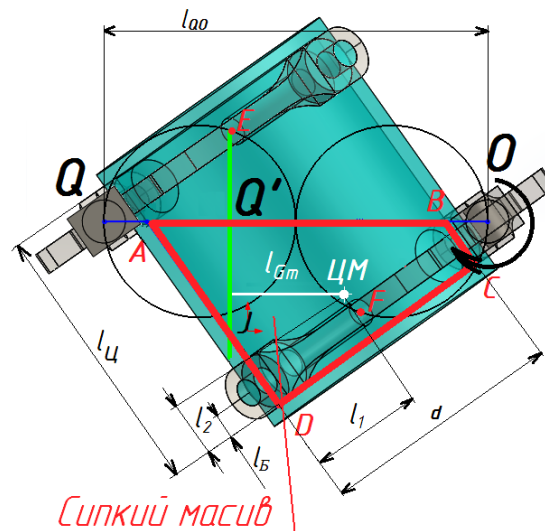


Рис. 4. Схема для визначення місця розташування центру мас сипкого середовища

Для робочої ємкості з відповідними геометричними параметрами, що представлена на рис. 4 координати l_1 та l_2 , а також плече сили тяжіння l_{Gm} можна визначити як:

$$l_1 = 0,47d. \quad (10)$$

$$l_2 = 0,23l_{\text{ц}}. \quad (11)$$

$$l_{Gm} = 0,26l_{QO} = \sigma_{50\%}l_{QO}. \quad (12)$$

Коефіцієнт пропорційності лінійних розмірів $l_{Gm}/l_{QO}=0,26$ позначали як $\sigma_{50\%}$, він відповідав робочій ємкості зі співвідношенням геометричних параметрів $z \approx 0,13$ у випадку її 50% заповнення. У випадку коли значення z буде відмінним від 0,13, коефіцієнт $\sigma_{50\%}$ слід визначати наступним чином:

$$\sigma_{50\%} = \frac{0,26z}{0,13} = 2z. \quad (13)$$

Запишемо вираз (12) з урахуванням рівняння (13):

$$l_{Gm} = 2zl_{QO}. \quad (14)$$

Крім того, на основі проведеного 3D моделювання в SolidWorks моделей сипкого середовища, було встановлено, що місце розташування його центру мас, при варіюванні значень відношення діаметру робочої ємкості до її довжини в діапазоні $d/l_{\text{ц}} = [0,5 - 0,9]$, не буде зміщатися в радіальному напрямі робочої ємкості та зазнаватиме незначного зміщення в осьовому напрямі ємкості, яким можна знехтувати. Величина зміщення центру мас ЦМ в осьовому напрямі робочої ємкості, що відповідає діапазону $d/l_{\text{ц}} = [0,5 - 0,9]$ становитиме $e \approx 0,055l_{\text{ц}}$. А отже, зміну довжини плеча сили тяжіння можна не приймати до уваги при варіюванні значень відношення діаметру робочої ємкості до її довжини у встановленому діапазоні.

Запишемо вираз для визначення максимального моменту опору, створеного силою тяжіння, що діє на сипке середовище відносно центру рівноваги машини при відповідному положенні робочої ємкості (для кутів повороту ведучого валу в 54° та 126°):

$$M_{\text{опГм}} = G_m l_{Gm}. \quad (15)$$

Підставимо у рівняння (15) значення виразів (1) та (14):

$$M_{\text{опГм}} = 2zm_c g l_{QO}. \quad (16)$$

Таким чином, отримали вираз (16), застосування якого дає можливість розрахувати максимальне значення статичного моменту опору на ведучому валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу «Turbula», який утворюється масою сипкого середовища, завантаженого до робочої ємкості, при заповненні її на 50% від загального об'єму.

Висновки

1. Виконані дослідження статичного моменту опору на ведучому валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, який створений силою тяжіння, що діє на сипке середовище, завантажено до робочої ємкості.

2. Експериментально встановлено положення рухомих ланок машини, що відповідає виникненню максимального статичного моменту опору на ведучому валу.

3. На основі аналітичних досліджень отримані математичні залежності, що дають можливість розрахувати максимальне значення статичного моменту опору на ведучому валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу «Turbula», який утворюється масою сипкого середовища, завантаженого до робочої ємкості, при заповненні її на 50% від загального об'єму.

Література

1. Залюбовський М.Г. Машины зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей : монографія / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев. – К. : Університет «Україна», 2018. – 228 с.
2. 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. – Хмельниц., 2007. – 255 с.
3. Копин В.А. Обработка изделий из пластмасс / Копин В.А., Макаров В.Л., Ростовцев А.М. – М. : Химия, 1988. – 176 с.
4. Першин, В.Ф. Машины барабанного типа: основы теории, расчета и конструирования / В.Ф. Першин. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1990. – 168 с.
5. Шумакова Т.А. Инструмент для виброабразивной обработки деталей : монографія / Т.А. Шумакова, В.И. Шаповалов, Ю.И. Гутько ; Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. – Луганск : Ноулідж, 2011. – 59 с.
6. Панасюк І.В. Визначення закону зміни кутової швидкості ведучого валу машини для обробки деталей зі складним рухом робочої ємкості / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – № 5. – С. 40–46.
7. Модестов В.Б. Определение мощности смесителя, необходимой при смешивании сыпучих материалов / В.Б. Модестов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2003. – № 3. – С. 7–8.
8. Модестов В.Б. Смесители сыпучих и пастообразных материалов : монографія / В. Б. Модестов ; МОНМС України, Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля, Технол. ин-т. – Луганск, 2011. – 353 с.
9. Залюбовський М.Г. Дослідження статичного моменту опору ведучого валу галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості / М.Г. Залюбовський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – № 1 (293). – С. 86–92.
10. Панасюк І.В. Визначення деяких конструктивних параметрів змішувачів з тривимірним обертанням барабану / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2013. – № 5. – С. 76–81.
11. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. 2021. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (access date: 05.03.2021).
12. Zalyubovskii M. G. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, issue 1, April 2020, 54–64.
13. Zaliubovskyi M. G. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism / M.G. Zaliubovskyi, I. V. Panasiuk, Yu. I. Smirnov, V. V. Malyshev // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, – 2020. – 178, issue 4, 69–75.
14. Marigo M. 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 / Marigo M., Cairns D. L., Davies M., Cook M., Ingram A., Stitt E. H. // CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences – 2010. – No. 3 (Vol. 59), 217–238.
15. Коротич В.И. Анализ движения сыпучего материала во вращающемся цилиндрическом барабане / В.И. Коротич // Горный журн., 1964. – № 12. – С. 134–141.
16. Zalyubovskyi M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskyi M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klapstov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. – 2019. – Vol. 2 (132). – P. 24–32.
17. Panasyuk I. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process / I. Panasyuk, M. Zalyubovskiy // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 260–264.

References

1. Zaliubovskyi M.H. Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei : monohrafiia / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev. – K. : Universytet «Ukraina», 2018. – 228 s.
2. Burmistenkov O.P. Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vztutievii ta shkirhalantereynii promyslovosti : monohrafiia / O.P. Burmistenkov, B.M. Zlotenko, V.P. Konoval, I.V. Panasiuk, M.Ie. Skyba, O.M. Syniuk. – Khmelnyts., 2007. – 255 s.
3. Kopin V.A. Obrabotka izdeliy iz plastmass / Kopin V.A., Makarov V.L., Rostovtsev A.M. – M. : Himiya, 1988. – 176 s.
4. Pershin, V.F. Mashyny barabannogo tipa: osnovyi teorii, rascheta i konstruirovaniya / V.F. Pershin. – Voronej : Izd-vo VGU, 1990. – 168 s.
5. SHumakova T.A. Instrument dlya vibroabrazivnoy obrabotki detaley : monografiya / T.A. SHumakova, V.I. SHapovalov, YU.I. Gutko ; Vostochnoukr. nats. un-t im. V. Dallya. – Lugansk : Noulidj, 2011. – 59 s.
6. Panasiuk I.V. Vyznachennia zakonu zminy kutovoi shvydkosti veduchoho valu mashyny dlia obrobky detalei zi skladnym rukhom robochoi yemkosti / I.V. Panasiuk, M.H. Zaliubovskyi // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2015. – № 5. – S. 40–46.
7. Modestov V.B. Opredelenie moshchnosti smesitelya, neobkhdimoy pri smeshivanii sypuchikh materialov / V.B. Modestov // Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2003. – № 3. – S. 7–8.

8. Modestov V.B. Smesiteli sypuchikh i pastoobraznykh materialov : monografiya / V. B. Modestov ; MONMS Ukrainy, Vostochnoukr. nac. un-t im. V. Dala, Tekhnol. in-t. – Lugansk, 2011. – 353 c.
9. Zaliubovskiy M.H. Doslidzhennia statychnoho momentu oporu veduchoho valu haltuvalnoi mashyny zi skladnym prostorovym rukhom robochoi yemkosti / M.H. Zaliubovskiy // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2021. – № 1 (293). – S. 86–92.
10. Panasiuk I.V. Vyznachennia deiakyykh konstruktyvnykh parametriv zmishuvachiv z tryvymirnym obertanniam barabanu / I.V. Panasiuk, M.H. Zaliubovskiy // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2013. – № 5. – S. 76–81.
11. Willy A. Bachofen (WAB): sait Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. 2021. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (access date: 05.03.2021).
12. Zalyubovskii M. G. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, issue 1, April 2020, 54–64.
13. Zaliubovskiy M. G. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism / M.G. Zaliubovskiy, I. V. Panasiuk, Yu. I. Smirnov, V. V. Malyshev // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, – 2020. – 178, issue 4, 69–75.
14. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of Turbulent Motion using Positron Emission Particle Tracking / Marigo M., Cairns D. L., Davies M., Cook M., Ingram A., Stitt E. H. // CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences – 2010. – No. 3 (Vol. 59), 217–238.
15. Korotich V.I. Analiz dvizheniya sypuchego materiala vo vrashchayushchetsya cilindricheskom barabane / V.I. Korotich // Gornyj zhurn., 1964. – № 12. – S. 134–141.
16. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. – 2019. – Vol. 2 (132). – P. 24–32.
17. Panasyuk I. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process / I. Panasyuk, M. Zalyubovskiy // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 260–264.

Надійшла/Paper received : 25.04.2021 р. Надрукована/Printed : 02.06.2021 р.