

Видається з 1996 року  
Засновник і видавець  
Сумський національний  
аграрний університет

Реєстраційне свідоцтво  
КВ № 23691-13531 Р від 21.11.2018 р.

*Редакційна колегія серії*

- Тарельник В.Б.**, доктор технічних наук,  
професор, редактор, Сумський  
національний аграрний університет  
(Україна)
- Соларьов О.О.**, кандидат технічних  
наук, доцент, заступник редактора,  
Сумський національний аграрний  
університет (Україна)
- Антошевський Б.**, доктор технічних  
наук, професор, Келецький технічний  
університет (Польща)
- Кундера Чеслав**, доктор технічних наук,  
професор, Келецький технічний  
університет (Польща)
- Кирик Г.В.**, доктор технічних наук,  
доцент, Сумський національний  
аграрний університет (Україна)
- Лобода В.Б.**, кандидат фізико-  
математичних наук, професор, заступник  
редактора, Сумський національний  
аграрний університет (Україна)
- Конопляченко Є.В.**, кандидат  
технічних наук, доцент, Сумський  
національний аграрний університет  
(Україна)
- Довжик М.Я.**, кандидат технічних наук,  
доцент, Сумський національний  
аграрний університет (Україна)
- Хінек Рубік**, кандидат технічних наук,  
Чеський університет наук про життя  
(Чехія)
- Девід Херак**, кандидат технічних наук,  
Чеський університет наук про життя  
(Чехія)
- Сабадаш С.М.**, кандидат технічних наук,  
доцент, Сумський національний  
аграрний університет (Україна)
- Думанчук М.Ю.**, технічний редактор,  
Сумський національний аграрний  
університет (Україна)

Міністерство освіти і науки України

# **ВІСНИК** **СУМСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО** **АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ  
Видається 4 рази на рік.

СЕРІЯ «Механізація та автоматизація виробничих процесів»

ВИПУСК 3 (41), 2020

- Некрасов С. С., Голобородько Л. В., Жигилій Д. О., Купрієнко Б. Г.**  
Оцінка ресурсу ріжучої крайки мікроінструменту з використанням  
моделювання процесу різання..... 3
- Пилипака С. Ф., Чепіжний А. В.** Аналіз існуючих способів аналітичного  
опису складного руху точки та знаходження її кінематичних характеристик ..... 8
- Василенко О. О., Семерня О. В.** Санітарно-гігієнічні умови організації праці  
на хлібопекарських підприємствах Сумської області..... 13
- Семірненко Ю. І., Семірненко С. Л.** Утилізація зношених автотракторних  
шин шляхом переробки в паливні брикети ..... 17
- Павлов О. Г.** Проблеми зносу електрода-інструмента при електроерозійній  
обробці..... 21
- Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Конопляченко Є. В.,  
Думанчук М. Ю., Рясна О. В.** Вдосконалення технології формування  
металоплакуючих мастильних покриттів на гнучких елементах пружних муфт ..... 25
- Хурсенко С. М.** Фізика в техніці: сили інерції та їх прояв..... 31
- Пилипака С. Ф., Чепіжний А. В.** Способи знаходження закону відносного  
руху частинки вздовж прямолінійної лопатки на відцентровому апараті ..... 35
- Сабадаш С. М., Казаков Д. Д., Колодненко В. М., Бало П. М.** Визначення  
дисперсного складу сушеного топінамбура ..... 40

Науковий журнал «Вісник  
Сумського національного аграрного  
університету. Серія «МЕХАНІЗАЦІЯ ТА  
АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ  
ПРОЦЕСІВ» визнано фаховим виданням  
Категорії «Б» в галузі технічних наук  
(наказ МОН України  
від 24.09.2020 р. № 1188)

Науковий журнал «Вісник Сумського  
національного аграрного університету»  
індексується в Міжнародних  
наукометричних базах Index Copernicus,  
РІНЦ

Матеріали журналу знаходяться у  
вільному доступі на сайті  
<https://snau.edu.ua>

Усі статті проходять процедуру таємного  
рецензування. До публікації в журналі не  
допускаються матеріали, якщо є  
достатньо підстав вважати, що вони є  
плагіатом.

Відповідальність за точність наведених  
даних і цитат покладається на авторів.  
Матеріали друкуються українською та  
англійською мовами.

У разі цитування посилання на «Вісник  
Сумського національного аграрного  
університету» обов'язкове

Друкується згідно з рішенням  
вченої ради  
Сумського національного  
аграрного університету  
(Протокол № 6 від 30.11.2020 р.)

Адреса видавця та виготовлювача:  
40021, м. Суми,  
вул. Г. Кондратьєва, 160  
Телефон: (0542)70-10-42  
E-mail: [visnyk.snau@gmail.com](mailto:visnyk.snau@gmail.com)  
<https://snau.edu.ua>

Тираж 300 пр.  
Зам. №7

© Сумський національний  
аграрний університет, 2020

## ОЦІНКА РЕСУРСУ РІЗУЧОЇ КРАЙКИ МІКРОІНСТРУМЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

**Некрасов Сергій Сергійович**  
кандидат технічних наук, доцент  
Сумський державний університет  
ORCID: 0000-0001-9157-2829  
E-mail: s.nekrasov@omim.sumdu.edu.ua

**Голобородько Любов Вікторівна**  
Сумський державний університет  
ORCID: 0000-0001-8421-6041  
E-mail: l.goloborodko@omu.sumdu.edu.ua

**Жигилій Дмитро Олексійович**  
кандидат технічних наук  
Сумський державний університет  
ORCID: 0000-0002-7063-7213  
E-mail: d.zhigilyi@omim.sumdu.edu.ua

**Купрієнко Богдан Григорович**  
студент  
Сумський державний університет  
ORCID: 0000-0002-6251-2955  
E-mail: kuprienkobogdan85@gmail.com

*У роботі розглянуті особливості процесу мікрорізання і причини виходу з ладу різучої крайки мікро-інструменту в процесі різання. Для дослідження причин відмови різучої крайки мікроінструменту в роботі було запропоновано використовувати скінчено-елементне моделювання процесу мікрорізання, яке дозволяє встановити і детально досліджувати фактори, що впливають на ресурс інструменту, більш глибоко вивчити процес стружкоутворення і вплив різних чинників на вихідні показники процесу різання, які найчастіше неможливо проаналізувати використовуючи натурний експеримент. Наведено результати експериментального дослідження, які дозволили встановити інтенсивність зношування різучого інструменту в процесі різання.*

**Ключові слова:** мікрорізання; інтенсивність зношування; мікроінструмент; товщина зрізаного шару, радіус округлення різальної крайки.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.1>

### Постановка проблеми.

На теперішній час практика використання свердел для свердління отворів діаметром менше 1 мм показує, що такі свердла не забезпечують достатньої продуктивності та стійкості інструменту, більш того, немає можливості спрогнозувати поломку інструменту, при виникненні якої поламаний залишок свердла часто неможливо витягнути з оброблюваної заготовки, що призводить до повного вибракування виробу. Оскільки свердлення подібних отворів проводиться на завершальних операціях виробництва, такий факт призводить до необхідності починати процес виробництва з самого початку.

Досліджень причин поломки мікроінструментів раніше було проведено мало. Встановити причину поломки мікросверла з практичних експериментів складно, тому що складно, а часто і неможливо, спостерігати за процесом різання при малих розмірах, виникають труднощі вимірювання сил різання, температури в зоні різання, спостереження за зношенням інструменту, оскільки незначна зміна цих параметрів призводить до раптового виходу інструменту з ладу. Однак це стає можливим при використанні методів імітаційного моделювання процесу мікрорізання.

### Мета досліджень.

Тому метою роботи є дослідження причин виходу з

ладу мікроінструментів за допомогою скінчено-елементного моделювання процесу мікрорізання, а також вивчення впливу різних чинників на ресурс різальної крайки інструменту.

### Аналіз основних досліджень.

Згідно досліджень [1], при різанні початкова стадія зношування може бути з припрацюванням, без припрацювання та зі зворотним припрацюванням. Зворотне припрацювання, випадки якого відомі для деталей машин і оснащення, фізично являє собою інкубаційний період процесу зношування і виражається в його прискоренні до його переходу в лінійну (сталу) стадію. Випадки зворотного припрацювання відомі для інструменту, підданого оздоблювально-зміцнюючим операціям. Подібна закономірність спостерігається для інструменту з штучним округленням ріжучих кромок [2].

А. С. Верещака, А. В. Дачева, А. В. Анікєєв [3] відзначають, що при обробці різанням важкооброблюваних матеріалів відбувається значний зношення інструменту в результаті взаємодії кобальтової зв'язки твердого сплаву з оброблюваним матеріалом під впливом високих температур, що розвиваються в зоні різання.

При використанні інструменту з високими швидкостями різання головним механізмом зношування є дифузне розчинення інструментального матеріалу в оброблюваному

[4], проте інші вчені відзначають, що мікросколи утворюються в результаті втомних явищ [5]. Н. В. Талантов і А. А. Ліпатов [6] встановили, що при різанні паралельно діє два механізми - адгезійний і дифузійний, а переважання того чи іншого механізму зношення залежить від марки інструментального матеріалу.

Для дослідження причин поломки мікроінструментів в роботі було запропоновано використовувати скінчено-елементне моделювання процесу мікрорізання, яке дозволяє встановити і детально досліджувати фактори, що впливають на ресурс інструменту, більш глибоко вивчити процес стружкоутворення і вплив різних чинників на вихідні показники процесу різання, які найчастіше неможливо проаналізувати використовуючи натурний експеримент.

#### Короткий опис методики моделювання

Базові моделі були взяті з робіт Криворучко Д. В. [7], в якій запропонована розроблена модель процесу різання округленим лезом з пластичного матеріалу, і Некрасова С. С. [8], яка додатково має можливість проводити моделювання процесу різання деформівним інструментом з округленим лезом і змінною товщиною зрізаного шару, яка змінюється від 0 до заданого значення. В ході вивчення розглянутих моделей стосовно процесу прямокутного вільного мікрорізання було виявлено, що існуючі моделі мають ряд недоліків при їх використанні для моделювання процесу мікрорізання: збільшення обсягу зрізаного шару в процесі різання, відсутність впливу масштабного чинника при різних співвідношеннях товщини зрізаного шару до радіусу округлення різальної крайки, що істотно впливає на прогнозування вихідних показників процесу мікрорізання. Оскільки при збільшенні обсягу зрізаного шару відбувається збільшення прогнозованих сил різання, температури, усадки стружки і таке інше, при цьому не відбувається врахування впливу масштабного чинника, про існування якого свідчать багато досліджень [9]. Тому для усунення недоліків розглянутих моделей, авторами були проведені дослідження впливу різних чинників скінчено-елементної моделі процесу мікрорізання на точність прогнозування вихідних показників процесу.

#### Основні параметри моделі

В роботі розглядалося ортогональне вільне різання в двовимірній постановці, що допустимо, оскільки при розгляді процесу свердлення в головній січній площині граничні умови будуть еквівалентні. Геометричні розміри заготовки вибиралися пропорційно товщині зрізу. Інструмент деформівний. Граничні умови були задані жорстким закріпленням основи заготовки і обмеженням переміщення інструменту вздовж напрямку осі Y.

Навантаження прикладалися до інструменту через його переміщення в напрямку, протилежному додатного напрямку осі X, зі швидкістю різання  $V=40$  м/хв, подача приймалася рівною товщині зрізу. Геометрія інструменту задавалася такими параметрами: передній кут  $\gamma=15^\circ$ , задній кут  $\alpha=10^\circ$ , величина фаски зношення  $h_z=0.1$  і радіусом округлення різальної крайки  $\rho$  від 0.0025 мм до 1 мм (рис. 1).

Модель оброблюваного матеріалу задавалася моделлю пластично-деформівного тіла, здатного до руйнування.

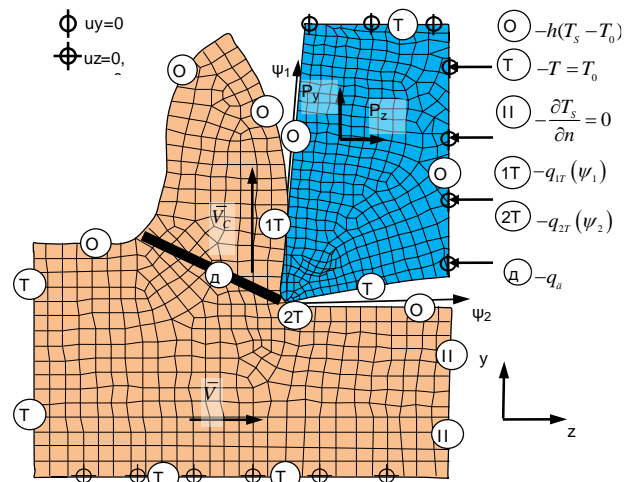


Рис. 1. Розрахункова схема та граничні умови

#### Критерій порівняння результатів моделювання з експериментом

Розроблена скінчено-елементна модель дозволила провести віртуальний експеримент відповідно до плану, наведеному в таблиці 1, метою якого було встановлення впливу співвідношення товщини зрізаного шару до радіусу округлення різальної крайки на величину еквівалентних напружень, максимальних напружень стиснення й установлення поля температур в зоні різання.

Таблиця 1 – План експерименту: Сталь 45-ВК8;  $b=1$  мм;  $V=40$  м/мин

$a/\rho$	Товщина зрізу $a$ , мм		
	0.1	0.05	0.005
0.1	1	0.5	0.005
0.2	0.5	0.25	0.0025
0.5	0.2	0.1	0.001
1	0.1	0.05	0.005

Моделювання проводилося для товщин зрізу в діапазоні від 0.005 мм до 0.1 мм при зміні радіусів округлення різальної крайки від 0.0025 мм до 1 мм. Що дозволило провести дослідження при співвідношенні товщини зрізаного шару до радіусу округлення різальної крайки в діапазоні від 0.1 до 1 (рис. 2-4).

Використовуючи скінчено-елементну модель, розроблену для моделювання процесу мікрорізання, було встановлено, що зміни досліджуваних величин мають екстремальний характер, а відповідно існує деякі рекомендовані значення співвідношення  $a/\rho$ , що дозволяють забезпечити найбільший ресурс мікроінструментів. При цьому з отриманих даних видно, що при зменшенні співвідношення  $a/\rho$  менш ніж 0.2 має місце збільшення максимальних еквівалентних напружень (рис. 2). Отже при цих значеннях інструмент матиме найменшу статичну міцність. Також при зменшенні співвідношення товщини зрізаного шару до радіусу округлення різальної крайки менше 0.2 не спостерігається утворення стружки (рис. 5), а відповідно відсутнє різання. При близьких до 0.6 значеннях спостерігається незначне зменшення еквівалентних напружень; локальний максимум відбувається при товщині зрізаного шару рівною 0.005 мм, характерному для процесу мікрорізання. При товщинах зрізу рівних 0.1 і 0.05 мм спостерігається зменшення еквівалентних напружень у всьому діапазоні досліджуваних співвідношень  $a/\rho$  (рис. 2).

Найбільша температура в зоні різання спостерігається при товщині зріз, що дорівнює 0.1 мм, і меншому за 0.2 співвідношенні  $a/\rho$ , а найменша - при товщині зрізу рівному 0.005 мм (рис. 3).

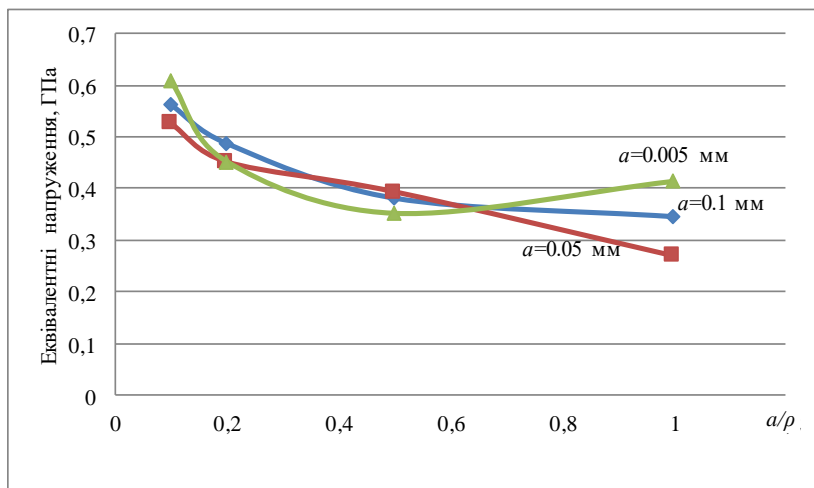


Рис. 2 – Вплив співвідношення  $a/\rho$  на величину еквівалентних напружень

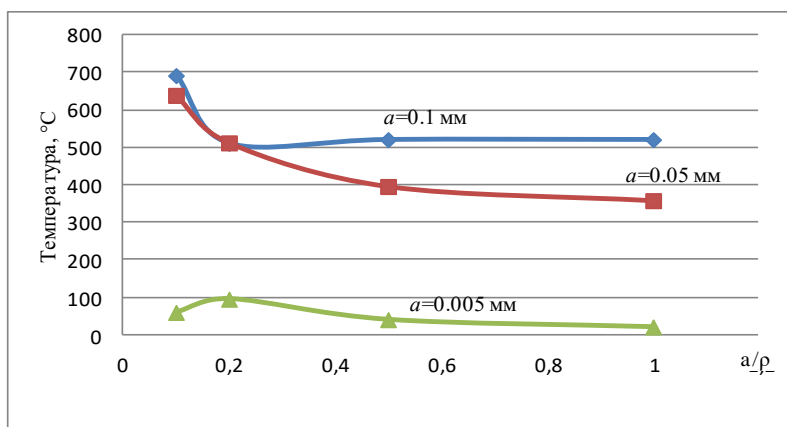


Рис. 3 – Вплив співвідношення  $a/\rho$  на максимальну температуру в зоні різання

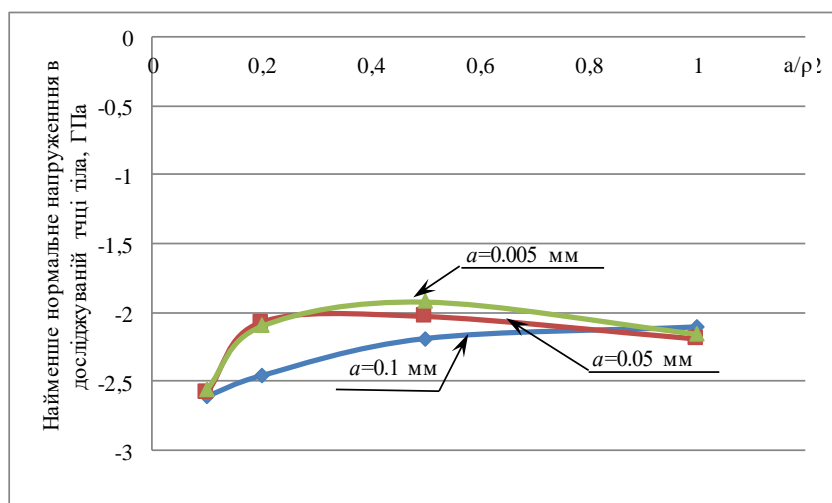


Рис. 4 – Вплив співвідношення  $a/\rho$  на величину найбільших нормальних напружень в досліджуваній точці

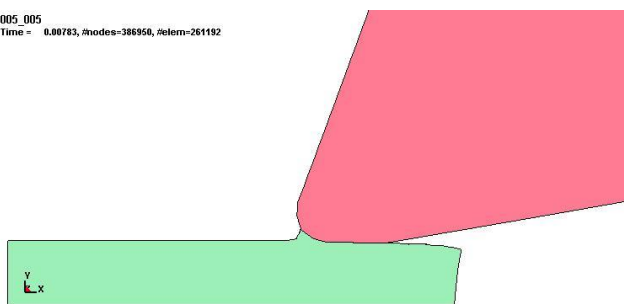


Рис. 5 – Процес різання при  $a/\rho$  менше ніж 0.2

При дослідженні впливу співвідношення  $a/\rho$  на величину найменших нормальних напружень, які в свою чергу впливають на міцність від втоми ріжучої крайки; спостерігаються екстремальні зміни величин напружень в залежності від відношення  $a/\rho$  для всіх значень досліджуваних товщин

зрізу. Найменше значення нормальних напружень при товщині зрізу 0.005 мм спостерігаються при співвідношенні  $a/\rho=0.5$ , що свідчить про наявність оптимального значення співвідношення товщини зрізу до радіусу округлення для мікрорізання. Головні напруження, в свою чергу, характеризують міцність від втоми інструментального матеріалу. При дослідженні впливу співвідношення товщини зрізаного шару до радіусу округлення різальної крайки було виявлено, що при значеннях  $a/\rho$  менших за 0.2 відбувається значне зменшення втомної міцності (рис. 4).

Розроблена модель дозволила встановити інтенсивність зношування ріжучого інструменту в процесі різання (рис. 6) за розрахунковими значеннями температури (рис. 3) і властивостями оброблюваного та інструментального матеріалів.

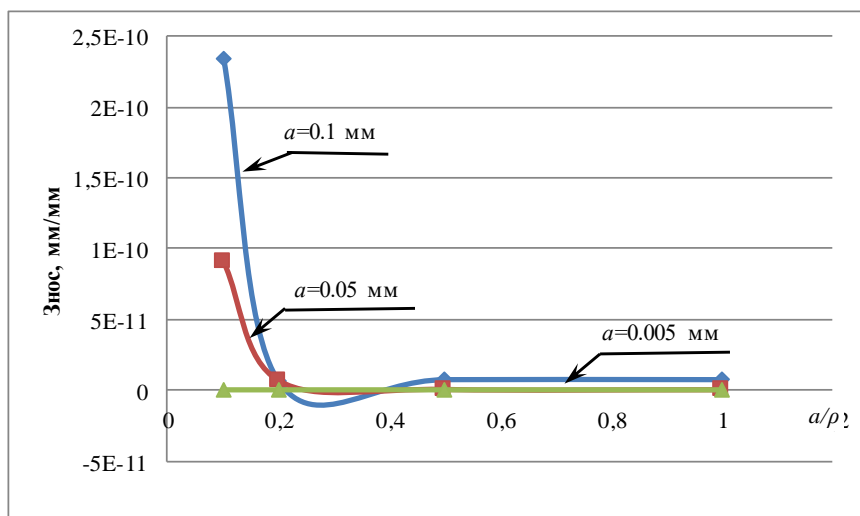


Рис. 6. Вплив співвідношення  $a/\rho$  на інтенсивність зношування

Згідно досліджень Макарова, температура різання і матеріал заготовки впливають на інтенсивність зношення через зміну величини міцності адгезійних зв'язків при зрізі. Інтенсивність зношення оцінювалася залежностями, які представлені в роботах А. Д. Макарова і С. С. Некрасова [8] на основі розрахованих в модельних експериментах контактних температур:

$$J_h = 155^{-50} \cdot \tau_a^3 \cdot \theta^{12}, \quad (1)$$

де  $J_h$  - інтенсивність зношення, мкм/мм,  $\tau_a$  - міцність адгезійних зв'язків при зрізі, обумовлена молекулярною взаємодією в зонах фактичного контакту, для пари сталь 45-ВК8  $\tau_a=5$  МПа [11];  $\theta$  - температура різання, °С.

### Висновки.

Розроблена модель процесу різання округленим лезом пластичного матеріалу дозволила встановити інтенсивність зношування ріжучого леза мікроінструментів в залежності від співвідношення  $a/\rho$  за рахунок прогнозування контактної температури в зоні різання і використання відомої аналітичної залежності для розрахунку інтенсивності зношування ріжучого інструменту при різанні. Отримані результати показують, що при зменшенні співвідношення  $a/\rho$  відбувається більш інтенсивний зношення внаслідок несприятливих умов стружкоутворення, що добре узгоджується з відомими експериментальними даними.

### Список літератури:

1. Пинахин А. М. Кинетика изнашивания твердосплавного режущего инструмента/ А. М. Пинахин, А. С. Иванова и др./ Серия "Естественнаучная"//Сборник научных трудов. -Haifa: Сев-КавГТУ, 2004. -№ 1.
2. Singh G. R. Modeling and optimization of tool wear in MQL-assisted milling of Inconel 718 superalloy using evolutionary techniques //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Т. 97. – №. 1-4. – С. 481-494.
3. Верещака А. С. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава//Известия Московского государственного технического университета "МАМИ"/А. С. Верещака, А. В. Дачева, А. И. Анискин // М.: МГТУ "МАМИ", 2010. -№ 1. -С. 99- 106.
4. Okokpujie I. P. Experimental and mathematical modeling for prediction of tool wear on the machining of aluminium 6061 alloy by high speed steel tools //Open Engineering. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 461-469.

5. Wang P., Gao R. X. Stochastic tool wear prediction for sustainable manufacturing //Procedia Cirp. – 2016. – Т. 48. – С. 236-241.
6. Кондратюк О. Л., Скоркін А. О. Експериментальні дослідження з вивчення усадки стружки й сили тертя на передній поверхні прохідного різця при точінні заготовок зі сталі марки 45. – 2017.
7. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.03.01/ СумДУ. -Харків, 2010. -40 с.
8. Некрасов С. С. Повышение ресурса твердосплавных концевых фрез при обработке литейных сталей аустенитного класса: Дисс. ... канд. техн. наук:05.03.01. -К., 2012. -167 с.
9. Голобородько Л. В. О критерии начала стружкообразования в процессе микрорезания//Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. -Краматорск: ДГМА, 2012. -Вып. 27. -№ 2. -С. 12- 17.
10. Залога В. А. Методология экспериментального определения деформационной и адгезионной составляющих среднего коэффициента трения при резании/ В. А. Залога, Д. В. Криворучко, О. А. Залога, С. С. Некрасов //Нові технології в машинобудуванні: Вісник КНУ ім Михайла Остроградського. -Кременчук: КНУ, 2010. -Вып. 6. -С. 63- 70.
11. Vereshchaka A. A. et al. A study of the cutting properties and wear mechanism of ceramic edge tools with nanostructure multilayer composite coatings //Journal of Friction and Wear. – 2014. – Т. 35. – №. 6. – С. 483-488.

**Nekrasov S. S.**, Sumy State University (Ukraine)

**Holoborodko L. V.**, Sumy State University (Ukraine)

**Zhyhylyi D. O.**, Sumy State University (Ukraine)

**Kupriienko B. H.**, Sumy State University (Ukraine)

#### **Life expectancy estimation of the micro tool cutting edge using fem simulation of the cutting process**

*The paper considers the issues related to the failure causes of microtool cutting edge using finite element process simulation of micro-cutting, and investigation into various factors influence on cutting edge tool life expectancy. There has been a lack of studies devoted to microstructure failure causes recently. It is due to difficulty in microdrill breakdown cause identification by practical experiments. Because cutting processes occur at small sizes so that it is hard to measure cutting forces, the temperature in the cutting zone, or monitor tool wear level, a slight change in these parameters would lead to sudden tool failure. Therefore, a method for micro-cutting process simulation, which has got boosted recently, is proposed.*

*A simulation model of the cutting process with a round blade made of plastic material with subsequent establishing wear rate of the microtool cutting blade depending on the ratio of cut thickness to round edge radius ( $a/\rho$ ) by predicting the contact temperature in the cutting zone by means of known analytical relationship for wear rate of the tool under cutting is developed. Orthogonal cutting in the 2-D model is considered. Geometrical dimensions are selected in proportion to cut thickness. The tool is also deformable. Forces and boundary conditions are set in displacements.*

*On the basis of a finite element method developed to the simulation micro-cutting process modeling, it is found that changes in the studied values are extreme, and accordingly some recommended values of the  $a/\rho$  ratio have been found, which provide the longest life expectancy for microtools. The obtained results show that decrease in  $a/\rho$  ratio induces more intensive wear occurs due to unfavorable conditions of chip formation, which is in good agreement with the known experimental data.*

**Key words:** micro-cutting, tool-wear rate, microtool, cut thickness, round edge radius.

Дата надходження до редакції: 09.11.2020

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ АНАЛІТИЧНОГО ОПИСУ СКЛАДНОГО РУХУ ТОЧКИ ТА ЗНАХОДЖЕННЯ ЇЇ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

**Пилипака Сергій Федорович**

доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: 0000-0002-1496-4615

email: psf55@ukr.net

**Чепіжний Андрій Володимирович**

кандидат технічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0002-7540-8313

email: snau170287@gmail.com

*При дослідженні руху точки обирають певну систему відліку, відносно якої розглядають рух точки. Іноді доводиться розглядати рух точки відносно двох різних систем відліку. Наприклад, рух пасажирів в потязі можна аналізувати відносно потяга та відносно Землі. При цьому рух однієї і тієї ж точки відносно двох різних систем відліку буде різним. Наприклад, точка ободу колеса залізничного вагона, що рухається, відносно Землі опише циклоїду, а відносно вагона – коло.*

*При розгляді руху точки відносно до двох систем відліку система, яка в цій задачі умовно прийнята за нерухому, називається основною системою відліку (нерухомою), а інша, яка рухається відносно основної – рухомою системою відліку. Рух точки відносно основної системи відліку називається абсолютним рухом, а її рух відносно рухомої системи відліку – відносним рухом. Складним рухом точки називається такий рух точки, за якого вона одночасно бере участь у двох або більше рухах.*

*Можливість розкласти більш складний рух точки або тіла на простіші рухи шляхом введення додаткової (рухомої) системи відліку широко використовується при кінематичних розрахунках і визначає практичну цінність теорії складного руху. Крім того, результати цієї теорії використовуються в динаміці для вивчення відносної рівноваги й відносного руху тіл під дією прикладених сил.*

**Ключові слова:** тригранник, площина, складний рух, абсолютна швидкість, напрямна крива, плоский механізм, рух частинки.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.2>

**Постановка проблеми.** Теорія складного руху матеріальної точки має чітку завершену форму й наведена в усіх підручниках із теоретичної механіки. Вона ґрунтується на тому, що рух точки вивчається одночасно відносно до двох систем координат. Одна із них (основна) приймається за нерухому, а друга здійснює відносно до нерухомої відносний рух по заданому закону. В свою чергу у рухомій системі координат здійснює відносний рух матеріальна точка. Сума цих рухів (відносного і переносного) складає абсолютний рух точки відносно основної системи координат. Рухи (як переносний, так і відносний) задаються залежностями у функціях часу.

Відомий також натуральний (природний) спосіб задання руху матеріальної точки, за якого швидкість і прискорення розглядаються в проекціях на орти супровідного тригранника траєкторії (тригранника Френе). При цьому розглядається тільки простий рух точки.

**Аналіз останніх досліджень.** Відомі приклади із застосуванням тригранника й формул Френе під час розгляду руху твердого тіла в його системі, наприклад, літака [1]. Кінематика супровідного тригранника гвинтової лінії розглядається у праці [2]. В останніх виданнях підручників кінематика супровідного тригранника траєкторії, як твердого тіла, або взагалі не досліджується, або ж розглядається із посиланням на більш ранні видання [3]. Тим часом тригранник і формули Френе можна успішно використовувати в задачах кінематики й динаміки складного руху матеріальної точки.

**Формування цілі статті.** Показати доцільність застосування супровідного тригранника кривої і формул Френе в теорії складного руху матеріальної точки на площині.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Із диференціальної геометрії відомо, що в будь-якій точці кривої можна побудувати три взаємно перпендикулярні напрямки, одиничні орти вздовж яких (дотична  $\bar{\tau}$ , головна нормаль  $\bar{n}$  і бінормаль  $\bar{b}$ ) утворюють супровідний (натуральний) тригранник кривої або тригранник Френе. Для плоскої кривої орти  $\bar{\tau}$  і  $\bar{n}$  знаходяться в площині кривої, а орт  $\bar{b}$  перпендикулярний до неї (рис. 1, а).

Нами запропоновано взяти за рухому систему супровідний тригранник Френе напрямної просторової кривої. Незалежний параметр у цьому випадку – довжина дуги  $s$  напрямної кривої.

Переносний рух тригранника стає визначеним і залежить від кривини  $k = k(s)$  і скруту  $\delta = \delta(s)$  кривої. Точка  $B$  у триграннику задається вектором  $\bar{\rho} = \bar{\rho}(s)$ , який розписується в проекціях на орти дотичної  $\bar{\tau}$ , головної нормалі  $\bar{n}$  і бінормалі  $\bar{b}$  тригранника:  $\rho_\tau = \rho_\tau(s)$ ,  $\rho_n = \rho_n(s)$ ,  $\rho_b = \rho_b(s)$  (рис. 1, а).

Радіус-вектор  $\bar{R}$  точки  $B$  запишеться сумою двох векторів (рис. 1, б):  $\bar{R} = \bar{r} + \bar{\rho}$ , де  $\bar{r} = \bar{r}(s)$  – вектор точки  $A$  (вершини тригранника) у нерухомій системі координат Охуз. Таким чином, положення точки  $B$  можна записати одним векторним рівнянням:



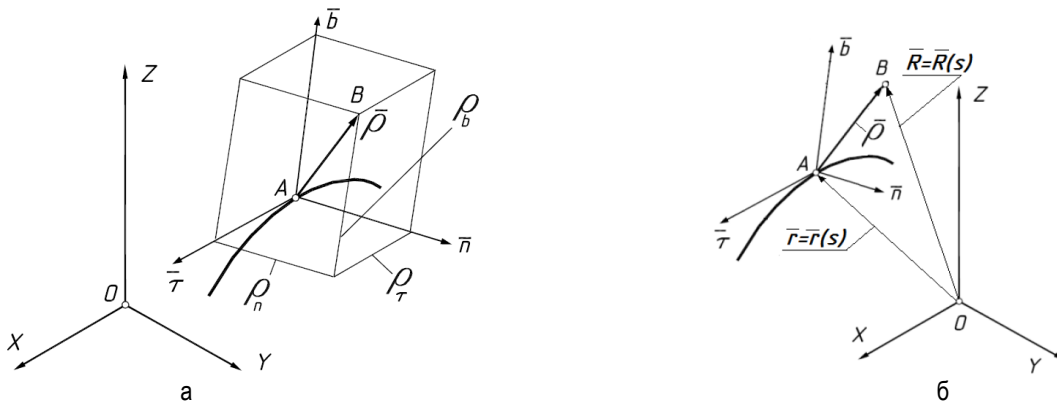


Рис. 1. До аналітичного опису розміщення точки  $B$  у двох системах координат

$$\bar{R}_B = \bar{r}_A + \bar{\tau}\rho_\tau + \bar{n}\rho_n + \bar{b}\rho_b \quad (1)$$

Абсолютна швидкість  $V_B$  і прискорення  $W_B$  точки  $B$  знаходяться послідовним диференціюванням виразу її радіус-вектора (1) із переходом від часу  $t$  до змінної  $s$ :

$$\begin{aligned} \bar{V}_B &= \frac{d\bar{R}_B}{dt} = \frac{d\bar{R}_B}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = V_A \frac{d\bar{R}_B}{ds}; \\ \bar{W}_B &= \frac{d\bar{V}_B}{dt} = \frac{d\bar{V}_B}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = V_A^2 \frac{d^2\bar{R}_B}{ds^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $ds/dt = V_A$  – швидкість руху тригранника по напрямній кривій.  
Зі свого боку

$$\bar{V}_B = V_A \left[ \bar{\tau}(1 - k\rho_n + \rho'_\tau) + \bar{n}(k\rho_\tau - \delta\rho_b + \rho'_n) + \bar{b}(\delta\rho_n + \rho'_b) \right]. \quad (5)$$

Диференціювання виразу (5) із переходом від змінної  $t$  до  $s$  із застосуванням формул Френе (4) дає формулу для

$$\begin{aligned} \bar{W}_B &= \bar{\tau}V_A \{V'_A(1 - k\rho_n + \rho'_\tau) + V_A[\rho''_\tau - k'\rho_n - k(k\rho_\tau - \delta\rho_b + 2\rho'_n)]\} + \bar{n}V_A \{V'_A(k\rho_\tau - \delta\rho_b + \rho'_n) + \\ &V_A[\rho''_n - k'\rho_\tau - \delta'\rho_b + k(1 - k\rho_n + 2\rho'_\tau) - \delta(\delta\rho_n + 2\rho'_b)]\} + \bar{b}V_A \{V'_A(\delta\rho_n + \rho'_b) + V_A[\rho''_b + \delta'\rho_n + \delta(k\rho_\tau - \delta\rho_b + 2\rho'_n)]\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Підтвердженням правильності виведеної формули є порівняння результатів, які отримані із застосуванням традиційного підходу та тригранника Френе.

Нами також розглянуто доцільність застосування тригранника і формул Френе у прямій та оберненій задачах динаміки складного руху точки.

Пряма задача динаміки передбачає пошук сил, які діють на матеріальну точку, якщо її рух відомий. Вона застосовується для силового аналізу механізмів, оскільки рух їх ланок відомий. Розглянемо застосування прямої задачі на прикладі плоских механізмів.

У багатьох плоских механізмів ведучою ланкою є кривошип, який за допомогою шарніра з'єднаний з веденою ланкою. Точка з'єднання цих ланок, тобто кінець кривошипа, під час обертання описує коло. Нами пропонується в точку з'єднання ланок помістити вершину тригранника Френе, орт головної нормалі направити до центру кола, орт дотичної поєднати з вектором швидкості кривошипа, тобто, розташувати по

$$\frac{d\bar{R}_B}{ds} = \frac{d\bar{r}_A}{ds} + \frac{d}{ds}(\bar{\tau}\rho_\tau) + \frac{d}{ds}(\bar{n}\rho_n) + \frac{d}{ds}(\bar{b}\rho_b). \quad (3)$$

Відомо, що  $d\bar{r}_A/ds = \bar{\tau}$ , диференціювання виразів у дужках (3) відбувається за правилом диференціювання добутку, наприклад,  $(\bar{\tau}\rho_\tau)' = \bar{\tau}'\rho_\tau + \bar{\tau}\rho'_\tau$ . Але  $\bar{\tau}'$  є однією із відомих формул Френе:

$$\frac{d\bar{\tau}}{ds} = \bar{n}k; \quad \frac{d\bar{n}}{ds} = \bar{b}\delta - \bar{\tau}k; \quad \frac{d\bar{b}}{ds} = \bar{n}\delta. \quad (4)$$

Після диференціювання виразу (3) із підстановкою формул (4) і групуванням складових за напрямками ортів, вираз абсолютної швидкості точки  $B$  набуває вигляду:

знаходження абсолютного прискорення в проекціях на орти тригранника:

дотичній до кола. При обертанні кривошипа тригранник теж буде обертатися, причому його головна нормаль весь час буде збігатися з кривошипом. Таким чином, рухомий тригранник буде супровідним для кола – траєкторії руху кривошипа й швидкість руху тригранника по колу буде залежати від кутової швидкості обертання кривошипа.

Під час обертання кривошипа разом із ним буде обертатися тригранник Френе. Водночас ведена ланка, у вигляді прямолінійного відрізка, буде проходити через вершину тригранника й утворюватиме з ортом дотичної кут. Закон зміни цього кута буде залежати від конструкції й призначення механізму.

Щоб отримати кінематичні характеристики веденої ланки (його положення залежно від кута повороту кривошипа, траєкторію, швидкість і прискорення довільної точки), необхідно знати закон зміни кута повороту веденої ланки в системі рухомого тригранника в функції довжини дуги направляючої кривої – траєкторії руху шарніра.

Ідея полягає в знаходженні кінематичних характеристик складного руху точки, коли вона робить відносний рух у рухомій системі координат, а сама рухома система за певним законом рухається відносно нерухомої системи. Якщо за рухоми систему координат взяти супровідний тригранник кривої, то закон руху тригранника стає відомим відносно нерухомої системи. Таким чином, поворот веденої ланки навколо вершини тригранника й одночасний рух разом з ним визначає відносний рух веденої ланки відносно нерухомої системи координат.

Положення ланки знаходиться в проекціях на орти тригранника й відразу перераховується на осі нерухомої системи. Таким же чином знаходиться абсолютна траєкторія руху точки ланки, що зі свого боку дозволяє знайти її швидкість і прискорення. Знайдені залежності є загальними для ведених ланок механізмів, які з'єднані за допомогою шарніра з кривошипом.

Під час розрахунків конкретного механізму потрібно знати тільки закон повороту веденої ланки в системі рухомого тригранника.

Дослідження траєкторних кривих руху точок ланок механізму має велике значення в задачах синтезу механізмів. Це завдання утворення механізмів, які могли б відтворювати наперед задані криві.

Обернена задача динаміки передбачає знаходження кінематичних характеристик матеріальної точки (траєкторії руху, швидкості, прискорення) за відомими прикладеними до точки силами. Для її розв'язання потрібно скласти диференціальні рівняння. Обернена задача динаміки нами розглянута на прикладі розсіювальних апаратів мінеральних добрив.

У процесі проектування відцентрових розсіювальних апаратів мінеральних добрив важливо знайти такі параметри і режими роботи цих машин, які б давали якнайкращий ефект. Важливу роль у цьому відіграють лопатки, які забезпечують потрібну траєкторію і швидкість частинки у відносному русі. На сьогодні, достатньо вивчена теоретична складова роботи розсіювальних апаратів із прямолінійними лопатками. Дослідження впливу форми криволінійної лопатки на кінематичні

параметри руху частинки може бути корисним під час проектування відповідних робочих органів.

Усі лопатки (як прямолінійні, так і криволінійні) кріпляться ортогонально до диска й забезпечують рух частинки по ньому в горизонтальній площині. У момент сходження частинки із диска вектор її абсолютної швидкості паралельний площині диска. Однак розсіювання частинок відбувається ефективніше, якщо вони при сході із робочого органу летять вгору під певним кутом до площини диска. Таке розсіювання забезпечують відцентрові конусні розсіювальні органи, у яких прямолінійні лопатки закріплені під певним кутом до площини диска.

Пропонуємо такі задачі розв'язувати із застосуванням тригранника Френе. Це дозволить порівняти розв'язки традиційним і запропонованим способом та їхні можливості для знаходження кінематичних характеристик складного руху матеріальної частинки по ротаційних поверхнях. Прикладом є рух частинки вздовж прямолінійної лопатки, яка закріплена в радіальному напрямі на горизонтальному диску, який обертається зі сталою кутовою швидкістю  $\omega$ .

При традиційному способі потрібно знати три складових абсолютного прискорення в переносному, відносному рухах та прискорення Коріоліса:  $\overline{W}_B = \overline{W}_e + \overline{W}_r + \overline{W}_{кор}$ , де величина й напрям його  $\overline{W}_{кор} = 2\omega \times V_r$  визначається за правилом Жуковського М.Є. (рис. 2,а).

Із застосуванням нашого підходу формула (6) дуже спрощується, тому що  $V_A = const$ , напрямною кривою переносного руху тригранника є коло, отже,  $k = const$ ,  $\delta = 0$ . Крім того, головна нормаль збігається із напрямом лопатки (рис. 2,б), отже таким чином, частинка рухатиметься вздовж головної нормалі, тобто  $\rho_r = \rho'_r = \rho''_r = 0$ ,  $\rho_b = \rho'_b = \rho''_b = 0$ .

За формулою (6) ми отримуємо такі проекції прискорення на орти тригранника:

- на орт  $\overline{T}$ :

$$\overline{W}_{B\tau} = -2V_A^2 k \rho'_n, \quad (7)$$

- на орт  $\overline{n}$ :

$$\overline{W}_{Bn} = V_A^2 (\rho''_n - k \rho_n^2 + k). \quad (8)$$

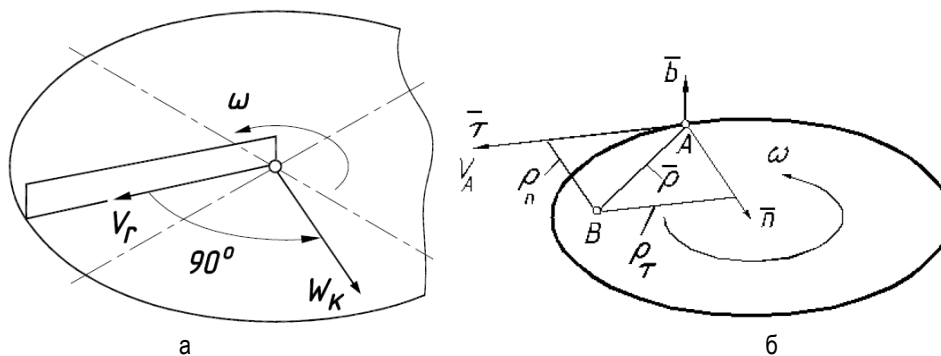


Рис. 2. До визначення прискорення точки B, що рухається в радіальному напрямі по диску, який обертається із кутовою швидкістю  $\omega$

На орт  $\overline{T}$  ми отримали складову зі знаком «мінус». Це і є прискорення Коріоліса, тільки воно має інший вигляд, оскільки змінною є не час  $t$ , а довжина дуги напрямного кола  $s$ . Спрямоване воно в протилежну сторону орта  $\overline{T}$ , що відповідає правилу Жуковського М.Є., проте отримано автоматично.

Універсальність запропонованого методу дає можливість використовувати його у вирішенні задач, розв'язок яких традиційними методами нам невідомий. Однією з них може бути дослідження руху вантажу в кузові автомобіля (причепа), що рухається дорогою з криволінійною просторовою віссю. Ця вісь може бути й плоскою зі змінною кривиною, що

характерно для повороту дороги, коли кривина зростає від нуля на прямолінійній ділянці до максимальної величини на середині повороту й знову зменшується до нуля.

Із певним припущенням вантаж, який по днищу кузова автомобіля здійснює відносний рух, можна прийняти за матеріальну точку. У такому випадку знаходження відносного переміщення вантажу в кузові при русі автомобіля дорогою із просторовою віссю зводиться до знаходження відносної траєкторії матеріальної точки. Ця задача не є простою, оскільки абсолютне прискорення точки є геометричною сумою переносного, відносного і Коріолісового прискорень, напрям і модуль кожного із яких можуть бути змінними, залежними від траєкторії, шляху й швидкості автомобіля.

Просторова крива характеризується двома параметрами, від яких залежить кінематика супровідного тригранника

Френе. Такими параметрами є кривина  $k$  і скрут  $\sigma$  кривої. Їх значення в будь-якій точці кривої будуть визначені, якщо відомі залежності  $k = k(s)$  і  $\sigma = \sigma(s)$ , де  $s$  – дугова координата (довжина дуги кривої). Будемо вважати, що такою просторовою кривою є вісь криволінійної ділянки дороги, яка йде на підйом або спуск (рис. 3). Якщо таку ділянку дороги взяти за напрямну криву для тригранника Френе, то можна застосувати формули (6) для знаходження вектора абсолютного прискорення. Для прямої задачі в загальному випадку потрібно мати залежності  $\rho_r = \rho_r(s)$ ,  $\rho_n = \rho_n(s)$ ,  $\rho_b = \rho_b(s)$ , а для оберненої ці залежності потрібно знайти за заданими прикладними до точки силами.

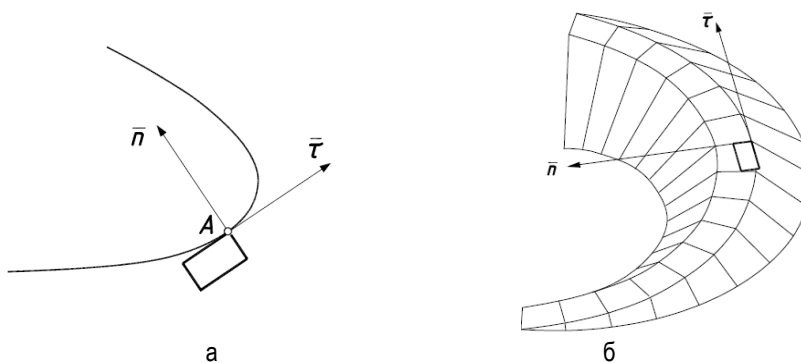


Рис. 4. Схема руху вантажного автомобіля дорогою:  
а) із плоскою криволінійною віссю у вигляді ланцюгової лінії;  
б) із просторовою кривою у вигляді гвинтової лінії

Зважаючи на це, застосування супровідного тригранника кривої та формул Френе дає можливість описати відносний рух вантажу в кузові автомобіля (при  $\rho_b = 0$ , оскільки вантаж знаходиться в стичній площині тригранника), який рухається дорогою, що має просторову вісь, із постійною та змінною швидкостями.

**Висновки.** Тригранник і формули Френе, які мають широке застосування в диференціальній геометрії поверхонь, можуть бути використані при знаходженні вектора абсолютного прискорення точки в складному русі. У цьому ви-

падку роль рухомої системи координат відіграє сам тригранник, який рухається вздовж заданої напрямної кривої – траєкторії переносного руху. Відносний рух точка здійснює в системі тригранника. Перевага такого аналітичного опису складного руху точки полягає в тому, що для нього достатньо тільки одного векторного рівняння, послідовним диференціюванням якого знаходяться вектори абсолютної швидкості й прискорення в проекціях на орти тригранника.

Висунуто припущення, що застосування тригранника й формул Френе може бути доцільним при розв'язанні прямої й оберненої задач динаміки складного руху точки.

#### Список літератури:

1. Лурье А. И. Аналитическая механика. Москва : ФМ, 1961. 823 с.
2. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики : в 2 т. 8-е изд. Москва : Наука, 1982. Т. 1 : Статика и кинематика. 352 с.
3. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики : в 2 т. 4-е изд., исправл. – Москва : Наука, 1985. Т.1 : Статика и кинематика. 240 с.
4. Адамчук В. В. Дослідження загального випадку розгону мінеральних добрив відцентровим розсіювальним органом. Вісник аграрної науки. Київ, 2003. № 12. С. 51–57.
5. Адамчук В. В. Теоретичне дослідження розгону мінеральних добрив розсіювальним органом. Механізація і енергетика сільського господарства. IV міжнародна науково-технічна конференція «Motrol 2003». Том 6. Київ : Національний аграрний університет, 2003. С. 19–31.
6. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Войтюк Д. Г., Пилипака С. Ф. Дослідження руху частинки по плоскому диску, який обертається навколо перпендикулярної осі, нахиленої до горизонту. Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. – Львів : Львів. нац. аграр. ун-т, 2008. № 12(2). С. 189–197.

**Чепыжний А. В.**, Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Pylypaka S. F.**, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine)

**Analysis of existing methods of analytical description of complex motion of a point and finding its kinematic characteristics**

When studying the motion of a point, a certain frame of reference is chosen, in relation to which the motion of the point is considered. Sometimes it is necessary to consider the motion of a point relative to two different reference systems. For example, the movement of a passenger in a train can be analyzed relative to the train and relative to the Earth. The motion of the same point relative to two different reference frames will be different. For example, the rim point of the wheel of a moving railway car will describe a cycloid relative to the Earth, and a circle relative to the car.

When considering the motion of a point relative to two reference frames, the system, which in this problem is conventionally taken as stationary, is called the main frame of reference (fixed), and the other, which moves relative to the main - mobile frame of reference. The motion of a point relative to the main frame of reference is called absolute motion, and its motion relative to the moving frame of reference is called relative motion. A complex motion of a point is a motion of a point in which it simultaneously participates in two or more motions.

The ability to decompose a more complex motion of a point or body into simpler motions by introducing an additional (movable) frame of reference is widely used in kinematic calculations and determines the practical value of the theory of complex motion. In addition, the results of this theory are used in dynamics to study the relative equilibrium and relative motion of bodies under the action of applied forces.

The theory of complex motion of a material point has a clearly completed form and is given in all textbooks on theoretical mechanics. It is based on the fact that the motion of a point is studied simultaneously with respect to two coordinate systems. One of them (the main) is taken as immovable, and the other carries out relative to the immovable relative movement according to the given law. In turn, in a moving coordinate system, the material point carries out the relative motion. The sum of these motions (relative and figurative) is the absolute motion of a point relative to the basic coordinate system. Movements (both figurative and relative) are given by dependencies in time functions.

There is also a natural (natural) way to specify the motion of a material point, in which velocity and acceleration are considered in the projections on the axes of the accompanying trihedron of the trajectory (Frenet trihedron). Thus only simple movement of a point is considered.

**Key words:** trihedron, plane, complex motion, absolute velocity, guide curve, planar mechanism, particle motion.

Дата надходження до редакції: 11.11.2020

## САНІТАРНО-ГІГІЄНИЧНІ УМОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРАЦІ НА ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВАХ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ

**Василенко Ольга Олександрівна**

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID ID: 0000-0003-1643-0702  
email: [vasylenko.sumy@gmail.com](mailto:vasylenko.sumy@gmail.com)

**Семерня Олена Володимирівна**

старший викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID 0000-0002-0201-1294  
[Semernya.olena@gmail.com](mailto:Semernya.olena@gmail.com)

*У роботі проаналізовані санітарно-гігієнічні умови праці працівників основних професійних груп, які працюють на хлібокомбінатах Сумської області, а саме хлібокомбінатів: ПАТ «Шосткинський хлібокомбінат» та ТОВ «Сумська паляниця». Обґрунтовано необхідність модернізації і поліпшення санітарно-гігієнічних аспектів технологічного процесу і обладнання, оптимізації умов мікроклімату і режиму праці робітників. На обох підприємствах температура повітря на робочих місцях тістобобів, зайнятих у великому хлібопекарському виробництві в холодний період року перевищувала допустимі параметри на 3,6-4,6 °С. У теплий період року температура повітря робочої зони в тістоприготувальне відділенні цеху з випікання білого хліба і батонів досягала 41,6 °С, що на 19,6 °С перевищувала оптимальні норми і на 14,6 °С - допустимі. Відносна вологість повітря в усіх виробничих приміщеннях відповідала гігієнічним нормативам. Таким чином, вивчення умов і організації праці пекарів і тістобобів на сучасних великих хлібопекарських підприємствах дозволило виявити наявність сукупності несприятливих професійно-виробничих факторів, найбільш виражених в теплий період року. Незважаючи на використання нового обладнання, механізацію технологічного процесу, істотних змін умов праці працівників великих хлібопекарських підприємств у 2019 та 2020-х роках не відбулося. Результати проведених досліджень свідчать про необхідність розробки і реалізації комплексу гігієнічних заходів, спрямованих на поліпшення умов і організації праці працівників ПАТ «Шосткинський хлібокомбінат» та ТОВ «Сумська паляниця».*

**Ключові слова:** санітарно-гігієнічні умови, мікроклімат, хлібопекарське виробництво, борошняний пил, виробничі фактори.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.3>

**Вступ.** Питання охорони і зміцнення здоров'я працюючого населення, що становить основу економічного благополуччя суспільства, є одним із пріоритетних проблем формування здоров'я нації [1]. У харчовій промисловості хлібопечення є провідним в галузі як за значенням, так і за кількістю зайнятих у ньому робітників. Незважаючи на вдосконалення технологій і автоматизацію виробничих процесів, не виключено шкідливий вплив факторів виробничого середовища на організм робочих [2]. На підприємствах харчової промисловості до теперішнього часу не приділяється належної уваги створенню оптимальних умов мікроклімату, безпечних умов праці, охорони праці та створенню належних соціально-побутових умов для працівників. Особливо важливим є той факт, що серед працюючого контингенту на цих підприємствах понад 50% складають жінки [3]. Природно, що проблема збереження в цих умовах здоров'я, підтримки високого рівня професійної працездатності, стійкості до несприятливих еколого-професійними факторів є актуальною і потребує свого вирішення. Таким чином, виявлення недоліків в організації трудового процесу, соціально-гігієнічних факторів, що впливають на стан здоров'я працівників хлібопекарської галузі є актуальною науковою задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** Хлібопекарська галузь - найбільш представницьке виробництво в харчовій промисловості за обсягом продукції, що випускається, кількості зайнятих робітників і числу виробничих об'єднань [4]. В останні роки на виробництвах з'явилася нове обладнання, що могло змінити характеристики умов праці

працівників.

Для випуску хлібобулочних виробів характерним є масовий тип виробництва. Для цього типу виробництва характерні великий обсяг виробництва, висока ступінь механізації і автоматизації, потоковість виробництва. Він обумовлює поділ праці і спеціалізацію робочих місць [5].

На працівників хлібопекарської промисловості можуть впливати такі шкідливі виробничі фактори: фізичні фактори (рухомі механізми устаткування, гарячі поверхні обладнання, освітленість, стан повітряного середовища в робочій зоні), хімічні фактори (хімічні речовини, які проникають в організм людини через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, шкірні покриви і слизові оболонки), психофізіологічні чинники (тяжкість і напруженість трудового процесу) [6].

Робочі хлібопекарень зазвичай піддаються впливу шкідливих виробничих факторів і несприятливих умов мікроклімату, що проявляються у вигляді протягів і тривалої зміни температури навколишнього середовища цеху, наприклад, при завантаженні печі і роботі в приміщенні охолодження. Борошняна пил, що знаходиться в повітрі робочої зони може викликати появу риніту, захворювання горла, бронхіальну астму («астма пекаря») і захворювання очей; цукровий пил може викликати карієс зубів. Для регулювання вмісту рослинного пилу в повітрі пекарського цеху слід використовувати відповідну вентиляцію. У осіб з відповідним нахилом можуть спостерігатися алергічні дерматити [7].

Перераховані вище приклади можливої загрози здоров'ю пекарів вказують на необхідність організації безпечних

умов праці та проведення медичних оглядів (з метою виявлення професійної патології). Крім цього, необхідний контроль за дотриманням правил з техніки безпеки [8].

**Формулювання цілей статті.** Комплексна оцінка умов і організації праці основних професійних груп сучасного хлібопекарського виробництва.

**Методи дослідження.** Як об'єкти вивчення були обрані великі хлібопекарські підприємства Сумської області.

Вивчалися умови і організація праці основних професійних груп - пекарів і тісторобів.

Дослідження проводилися протягом 2019-2021 рр. в цехах, що розрізняються використанням обладнання при ідентичному технологічному процесі - цеху з випікання хліба, де застосовуються сучасні печі тунельного типу і цеху з випікання житнього хліба з печами барабанного типу, більш старої конструкції.

Отримані результати оцінювалися відповідно до існуючих гігієнічних нормативних документів.

Вивчення факторів виробничого середовища включало вимір загальноприйнятими методами параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях в теплий і холодний періоди року, рівнів шуму і освітленості на робочих місцях, концентрації борошняного пилу робочої зони, оцінювалася важкість і напруженість трудових процесів пекарів і тісторобів.

Для визначення показників мікроклімату використовувався термоанемометр ТКА-ПКМ, модель 60, шуму - «ОКТАВА-110А», рівні природного та штучного освітлення вимірювалися приладами люксметр-пульсметр «Аргус-07» і цифровим фотометрлюксметр-яркометр «ТКА-04/3», концентрація борошняного пилу в повітрі робочої зони - стандартним ваговим методом.

Розподіл робочого часу протягом зміни вивчалася методом хронометражних спостережень.

На вивчених робочих місцях для кожного фактора були встановлені клас і ступінь шкідливості, що дозволило в кінцевому підсумку дати комплексну оцінку умов праці основних професійних груп хлібопекарського виробництва.

**Виклад основного матеріалу.** Основними стадіями технологічних процесів виробництва хліба є: 1) підготовка сировини; 2) приготування тіста; 3) оброблення тесту; 4) випічка

хлібних виробів; 5) охолодження і зберігання хлібних виробів.

Вивчення факторів виробничого середовища на ПАТ «Шосткинський хлібокомбінат» та ТОВ «Сумська паляниця» включало вимір загальноприйнятими методами параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях в теплий і холодний періоди року, температури, швидкості руху повітря, відносної вологості на робочих місцях, концентрації борошняного пилу робочої зони.

На модельних підприємствах, як і на більшості хлібо заводів, основні технологічні відділення розташовуються в одному приміщенні (тістоприготувальне відділення знаходиться на антресолях пекарського), що визначається виробничою доцільністю. Оцінюючи з гігієнічних позицій обладнання та його розміщення, слід вказати, що основними факторами, що формують мікроклімат в технологічних відділеннях, є хлібопекарські печі.

В даний час на досліджених підприємствах поряд з сучасними тунельними печами, які характеризуються високою герметичністю системи обігріву і помірними температурами нагрівальної поверхні, використовуються старі печі барабанного типу, нераціональна конструкція і теплоізоляція яких призводить до виділення надлишку тепла у виробничі приміщення. У пекарів додатковий тепловий контакт пов'язаний з ручною виїмкою гарячого хліба з печей. У тісторобів погіршення мікрокліматичних умов на робочому місці, перш за все в теплий період року, сприяє розташування тістоприготувальне обладнання на антресолях пекарського відділення, оскільки туди піднімається нагріте повітря від печей. Температура повітря на робочому місці тістороба, зайнятого в великому хлібопекарському виробництві, як в цеху з випікання білого хліба, так і в цеху з випікання житнього хліба, вже в холодний період року перевищувала допустимі параметри на 3,6-4,6 °С на висоті 1,5 м від підлоги, оптимальні - на 4,6-5,6 °С; в пекарних відділеннях в цей період року температура повітря робочої зони перевищувала допустиму на 4,8- 6,2 °С, оптимальну - на 6,8-8,2 °С (табл.1). Відносна вологість повітря, індекс теплового навантаження середовища, як в тістоприготувальних відділеннях цехів, так і в пекарних, відповідали допустимим нормам параметрів мікроклімату.

Таблиця 1 – Показники виробничого середовища на робочих місцях тісторобів і пекарів ПАТ «Шосткинський хлібокомбінат» та ТОВ «Сумська паляниця»

Показники параметрів мікроклімату	Параметри			
	Цех з випічки пшеничного хліба		Цех з випічки житнього хліба	
	Тістоприготувальне відділення	Пекарське відділення	Тістоприготувальне відділення	Пекарське відділення
Холодний період року				
Температура повітря, °С	27,6 15—22	29,2 17—23	26,6 15—22	27,8 17—23
Відносна вологість, %	27,6 15—75	22,0 15—75	24,9 15—75	34,7 15—75
Швидкість руху повітря, м/с	0,36 0,2—0,4	0,25 0,1—0,3	0,01 0,2—0,4	0,21 0,1—0,3
Теплий період року				
Температура повітря, °С	41,6 21,1—27,0	42,1 22,1—27,0	42,3 21,1—27,0	41,9 22,1—27,0
Відносна вологість, %	17,4 15—75	16,1 15—75	16,2 15—75	19,0 15—75
Швидкість руху повітря, м/с	0,46 0,2—0,5	0,17 0,2—0,4	0,97 0,2—0,5	0,29 0,2—0,4
Вміст борошняного пилу, мг/м <sup>3</sup>	3,7 ± 0,05 4,0	—	3,5 ± 0,03 4,0	—

Швидкість руху повітря в тістоприготувальному відділенні цеху з випікання житнього хліба була нижче допустимих меж, в інших підрозділах відповідала санітарно-гігієнічним нормативам. В цілому, не дивлячись на те, що в цеху з випікання білого хліба і батонів використовуються тунельні печі, а в цеху з випікання житнього хліба - печі барабанного типу, істотних відмінностей мікрокліматичних умов не виявлено. У теплий період року температура повітря робочої зони в тістоприготувальне відділення цеху з випікання білого хліба і батонів досягала 41,6 °С, що на 19,6 °С перевищувала оптимальні норми і на 14,6 °С - допустимі.

У цеху з випікання житнього хліба температура повітря в аналогічному відділенні перебувала на ще більш високому рівні (42,3 °С), що на 21,3 °С перевищує оптимальну і на 15,3 °С – допустиму норму температури для виробних приміщень. Швидкість руху повітря в тістоприготувальних відділеннях обох цехів перевищувала допустимі значення, в пекарних відділеннях не виходила за їх межі. Відносна вологість повітря в усіх виробничих приміщеннях відповідала санітарно-гігієнічним нормативам. Слід зазначити, що індекс теплового навантаження середовища в теплий період року в усіх відділеннях і цехах значно перевищував допустимі показники. При цьому в пекарному відділенні цеху з випікання житнього хліба, де використовуються печі барабанного типу, цей показник був вище, ніж у відповідному відділенні цеху з випікання білого хліба. Найбільш висока температура повітря реєструвалася на стадії виймання хліба з печей (до 42,8 °С) і в тістоприготувальних відділеннях (42,1-42,3 °С). Температура поверхні печей досягала 60 °С, готового хліба - 70-75 °С. Інтенсивність теплового випромінювання становила 99 Вт / м<sup>2</sup>, що не перевищувало нормований рівень. Відповідно до СанПін 2.2.4.548-96 «Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень» мікроклімат тістоприготувальних і пекарних відділень хлібозаводів в теплий період року не відповідає допустимим нормам мікроклімату і характеризується як клас 3.2 (табл. 1). Недостатня звукоізоляція технологічного обладнання призводить до утворення виробничого шуму. За нашими даними, рівень шуму на робочому місці тісторобів на обстежених хлібозаводах перевищував гранично допустимий рівень на 2 дБА, переважно в октавних смугах з низько- і середньогеометричними частотами від 63 до 500 Гц. Найбільша інтенсивність звукового тиску відзначалася в хлібопекарських відділеннях цехів на робочому місці пекаря, перевищуючи на 4 дБА встановлені нормативи. Максимальне значення звукового тиску зазначалося на частоті 2000 Гц. Рівні шуму на робочих місцях працівників досліджуваних професій відповідали класу 3.1, що робить можливим класифікувати цей фактор виробничого середовища як шкідливий. Природне освітлення виробничих приміщень модельних

хлібозаводів не відповідає гігієнічним вимогам (КПО = 0,2-0,3% при нормі 0,5%). Вкрай низькі рівні штучного освітлення (96-125 лк при нормованій освітленості 300 лк), що не пов'язане з технологічними особливостями виробництва, а відображає дефекти організації освітлення і порушення встановлених нормативів.

**Обговорення.** На обох підприємствах температура повітря на робочому місці тісторобів, зайнятих у великому хлібопекарському виробництві в холодний період року, перевищувала допустимі параметри мікроклімату на 3,6-4,6 °С. У пекарних відділеннях в цей період року температура повітря робочої зони перевищувала допустиму на 4,8- 6,2 °С, оптимальну - на 6,8-8,2 °С (табл.1). Відносна вологість повітря, як в тістоприготувальних відділеннях цехів, так і в пекарних, відповідали допустимим нормам мікроклімату. Швидкість руху повітря в тістоприготувальне відділення цеху з випікання житнього хліба була нижче допустимих меж, в інших підрозділах відповідала санітарно-гігієнічним нормативам. В цілому, не дивлячись на те, що в цеху з випікання білого хліба і батонів використовуються тунельні печі, а в цеху з випікання житнього хліба - печі барабанного типу, істотних відмінностей мікрокліматичних умов не виявлено.

У теплий період року температура повітря робочої зони в тістоприготувальне відділення цеху з випікання білого хліба і батонів досягала 41,6 °С, що на 19,6 °С перевищувала оптимальні параметри мікроклімату і на 14,6 °С - допустимі. У цеху з випікання житнього хліба температура повітря в аналогічному відділенні перебувала на ще більш високому рівні (42,3 °С), що на 21,3 °С перевищує оптимальну і на 15,3 °С - допустиму. Швидкість руху повітря в тістоприготувальне відділення в обох цехах перевищувала допустимі значення, в пекарних відділеннях не виходила за їх межі. Відносна вологість повітря в усіх виробничих приміщеннях відповідала санітарно-гігієнічним нормативам.

**Висновки.** Таким чином, вивчення умов і організації праці пекарів і тісторобів на сучасних великих хлібопекарських підприємствах дозволило виявити наявність сукупності несприятливих шкідливих виробничих факторів, найбільш виражених в теплий період року. Незважаючи на використання нового обладнання, модернізацію і механізацію технологічного процесу, істотних змін умов праці працівників великих хлібопекарських підприємств в порівнянні з даними попередніх років не відбулося.

Результати проведених досліджень свідчать про необхідність розробки і реалізації комплексу санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на поліпшення умов і організації праці працівників ПАТ «Шосткинський хлібокомбінат» та ТОВ «Сумська паляниця».

#### **Список літератури:**

1. Закон України „Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення”(зі змінами від 17 грудня 1996 року № 607/96-ВР; від 11 червня 1997 року № 331/97-ВР; від 18 листопада 1997 року - ВР, від 30 червня 1999 року № 783-XIV; від 14 грудня 1999 року № 1288-XIV; від 21 грудня 2000 року № 2171-III).
2. Іванова О.В. Санітарія та гігієна закладів ресторанного господарства: підручник / О.В. Іванова, Т.В. Капліна. – Суми: Університетська книга, 2010. – 399с.
3. Смоляр В.І. Фізіологія та гігієна харчування / В.І. Смоляр – К.: Здоров'я, 2000. – 335с.
4. Онищенко Г.Г. Влияние состояния окружающей среды на здоровье населения. Нерешенные проблемы и задачи. Гигиена и санитария. 2003. № 1. С. 3-7.
5. Истомин А.В., Мишквич И.А., Махотин Г.И., Рыжков М.Г. Современные проблемы гигиены на пищевых предприятиях. /Монография. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Компания «Алекс», 2002. 284 с.

6. Мишкич И.А. Гигиенические основы охраны здоровья женщин, занятых на предприятиях по производству и реализации продуктов питания: Автореф. дисс. докт. мед. наук. СПб. 2001. 44 с.
7. Моцкус А.В. Гигиеническая оценка условий труда на предприятиях продовольственной торговли. //Региональные проблемы окружающей среды и здоровья населения. Науч. труды, вып. 7. Ростов-на-Дону. 2002. С. 36-39.
8. Куковякин С.А. и др. Относительные величины, показатели динамического ряда, оценка достоверности результатов исследования: учебное пособие. Киров: Кировская гос. мед. акад., 2006. 10 с.

**Vasylenko O. O.**, Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Semernya O. V.**, Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Sanitary and hygienic conditions of labor organization at bakery enterprises of sumy region**

*The paper analyzes the sanitary and hygienic working conditions of employees of the main professional groups that lead in the Sumy region bakeries JSC "Shostka bakery" and LLC "Sumy Palyanytsya". The necessity of modernization and improvement of sanitary and hygienic aspects of technological process and equipment, optimization of working conditions and working conditions of female workers is substantiated. At both enterprises, the air temperature at the workplace of pastry chefs, engaged in large-scale bakery production in the cold period of the year, exceeded the permissible parameters by 3.6-4.6 °C. During the warm period of the year, the air temperature of the working area in the dough preparation department of the white bread and loaf baking shop reached 41.6 °C, which was 19.6 °C higher than the optimal norms and 14.6 °C - permissible. The relative humidity in all production facilities met hygienic standards. Thus, the study of the conditions and organization of work of bakers and bakers in modern large bakery enterprises revealed the presence of a set of adverse occupational factors, most pronounced in the warm season. Despite the use of new equipment, mechanization of the technological process, significant changes in working conditions of employees of large bakery enterprises in 2019 and 2020 did not happen. The results of the research indicate the need to develop and implement a set of hygienic measures aimed at improving the working conditions and organization of employees of JSC "Shostka Bakery" and LLC "Sumy Palyanytsya".*

**Key words:** sanitary and hygienic conditions, bakery production, flour dust, production factors.

Дата надходження до редакції: 12.11.2020



## УТИЛІЗАЦІЯ ЗНОШЕНИХ АВТОТРАКТОРНИХ ШИН ШЛЯХОМ ПЕРЕРОБКИ В ПАЛИВНІ БРИКЕТИ

**Семірненко Юрій Іванович.**

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-4230-4614  
email: usemirnenko@gmail.com

**Семірненко Світлана Леонідівна**

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-9304-3637  
email: semirnenkosv@gmail.com

*Наведені проблеми, які виникають при накопиченні зношених автотракторних шин. Приведений аналіз результатів досліджень по утилізації автотракторних шин. Наведені результати власних досліджень по утилізації шин шляхом їх переробки та використання у якості комбінованого палива.*

**Ключові слова:** шини, утилізація, переробка, гумава крихта, брикети, щільність, теплотворна здатність.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.4>

**Постановка проблеми.** Однією із нагальних проблем, що стоїть перед автотранспортними підприємствами нашої країни, є проблема утилізації відпрацьованих шин. Утилізація та переробка – це не тільки скорочення забруднення, а й скорочення споживання природних ресурсів та енергії. Безперервне зростання автотракторного парку призводить до постійного збільшення кількості відпрацьованих шин. Тому, у всьому світі значна увага приділяється проблемі використання відходів виробництва і споживання, в тому числі зношених шин [1-3]. Ця проблема має важливе екологічне значення, оскільки зношені шини, накопичуються в місцях їх експлуатації (на автобазах, промислових, сільськогосподарських підприємствах і т. д.), вивозяться на сміттєзвалища або розсіяні на навколишній території, забруднюють навколишнє середовище оскільки не розкладаються, внаслідок своєї високої стійкості до дії зовнішніх чинників (сонячного світла, вологи, кисню, озону, мікробіологічних впливів). Шини мають високу пожежну небезпеку, а продукти їх неконтрольованого спалювання здійснюють вкрай шкідливий вплив як на навколишнє середовище (грунти, води, повітряний басейн), так і на його мешканців. При цьому постійне посилення прийнятих міжнародних норм, що обмежують забруднення навколишнього середовища відходами, змушує витратити значні кошти на ліквідацію наслідків забруднення. Таким чином, на зріла гостра необхідність утилізації зношених шин [3, 4]. Проблема зношених шин має також суттєве економічне значення, оскільки потреби господарства в природних ресурсах безперервно ростуть. Останні стають все більш обмеженими, а їх видобуток – все більш дорого вартісним.

Використання відпрацьованих шин у якості палива дозволить значно заощадити ресурси. Так шини є джерелом цінної вторинної сировини: гуми (каучуку), сажі (практично чистого вуглецю) і представляють величезний резерв сировини, а ліквідація сміттєзвалищ зношених шин звільнить значні площі займаних ними земель [4].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Незважаючи на накопичені наукові здобутки та значний практичний досвід у сфері технології утилізації автотракторних шин, які знайшли відображення в працях ряду дослідників, серед яких

М.І. Сергієнко, А.І. Васильченко, М.П. Веремєнко, Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, О.П. Будьонний та ін. [3, 4], перспективним напрямком досліджень є утилізація відпрацьованих шин сільськогосподарських підприємств у якості місцевого палива, що забезпечить вирішення як екологічних, так і енергетичних та економічних проблем.

**Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми.** На основі аналізу літературних джерел було проведено перевірку можливості утворення брикетів із соломи з обґрунтованими параметрами [5, 6] та визначені найбільш значущі параметри гумової крихти, що впливають на щільність брикетів: розмір крихти, вміст гумової крихти в брикеті, тиск пресування.

**Формування цілей статті.** Метою досліджень є утилізація гумової крихти шляхом виготовлення композитних паливних брикетів із гумової крихти та соломи. Для вирішення даної проблеми нами були проведені лабораторні дослідження по визначенню раціональних параметрів: відсотку гумової крихти, її розміру та тиску пресування для виготовлення паливних брикетів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для забезпечення практичного використання результатів, отриманих при проведенні досліджень, за допомогою комп'ютерного забезпечення були побудовані та проаналізовані залежності щільності брикетів від розміру гумової крихти, вмісту гумової крихти, тиску пресування (рис. 1-3). Брикети виготовлялися діаметром 70 мм. Кожен дослід проводився трикратно, відбиралися результати з найменшими явними похибками.

Для брикетування використовувалася солома озимої пшениці з оптимальними параметрами.

Розмір фракції соломи становив 10 мм, вологість соломи – 14%.

Основною задачею досліджень є – установлення можливості отримання брикетів задовільної щільності з мінімізацією витрат на їх виготовлення.

Першими були установлені залежності щільності композитних брикетів від розміру гумової крихти (тиск пресування 130 МПа, гумава крихта – 5%, солома – 95%). Досліди проводились для фракцій крихти 0,5, 1, 2, 3, 4 та 5 мм. Вибір

вказаних розмірів крихти пов'язаний з роботою обладнання. При подрібненні автомобільних шин до рівня крихти, йде її

розділення на фракції на ситах.

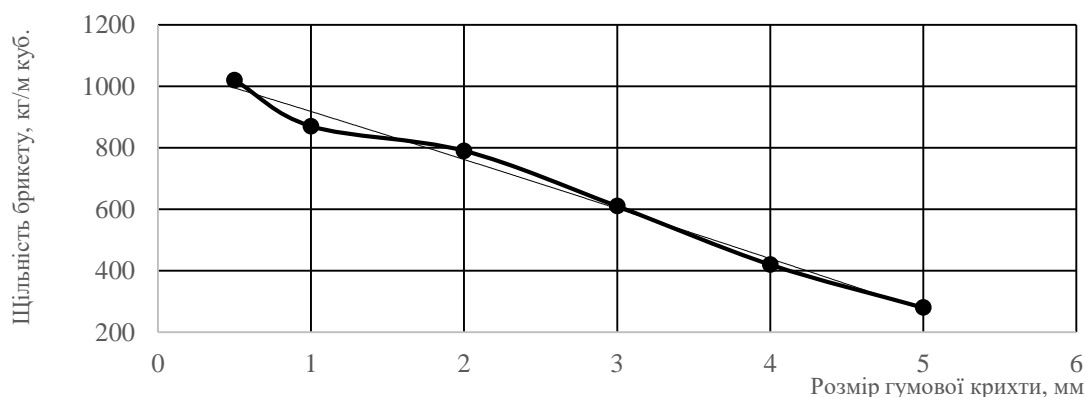


Рис. 1. Залежність щільності композитних брикетів від розміру гумової крихти (тиск пресування 130 МПа, гума крихта – 5%, солома – 95%)

В результаті проведення досліджень (рис. 1), було виявлено, що на щільність брикетів значно впливає розмір фракція гумової крихти. Найбільша щільність при тиску пресування 130 МПа та частці гумової крихти в брикеті 5% буде при розмірі крихти 0,5 мм, найменша – при 5 мм. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням розміру часток, гума крихта виконує функцію демфера, це впливає на щільність брикетів, їх цілісність та крихкість. Проаналізувавши дану залежність, було виявлено, що раціональним при тиску пресування 130 МПа та частці гумової крихти в брикеті 5% є розмір крихти 2 мм. При такому розмірі фракції щільність брикетів буде задовільною – 790 кг/м<sup>3</sup>, задовільними будуть і характеристики міцності.

В результаті проведених досліджень, було встановлено, що залежність щільності композитних брикетів від розміру гумової крихти описується наступним рівнянням:

$$y = -1,6882x^2 - 151,13x + 1071 \quad (1)$$

Були проведені дослідження по визначенню впливу на щільність композитних брикетів вмісту гумової крихти при тиску пресування 130 МПа та визначеного розміру крихти – 2 мм.

Досліди проводилися при вмісті крихти в суміші 1%, 5%, 10% та 15%. Для кожного значення вмісту крихти дослідження проводилось трикратно.

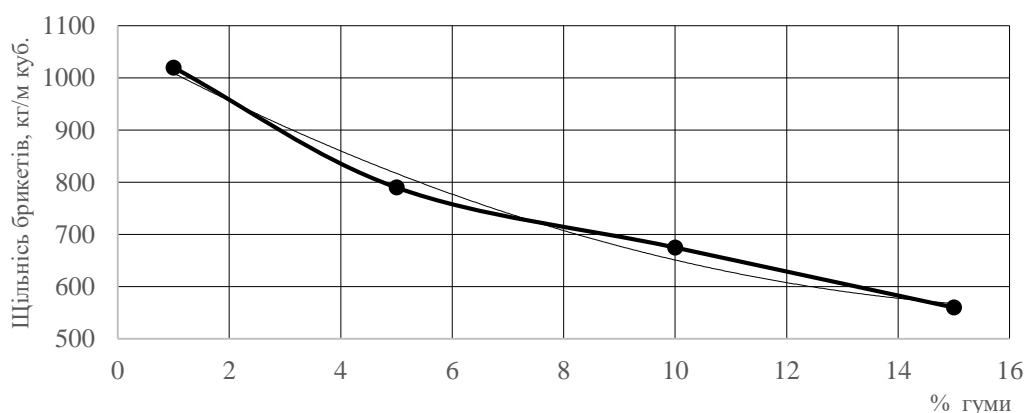


Рис. 2. Залежність щільності композитних брикетів від вмісту гумової крихти (тиск пресування 130 МПа, розмір крихти – 2 мм, і розмірі часток соломи 1,0×10<sup>-2</sup>м)

В результаті проведених досліджень було встановлено, що на щільність брикетів значно впливає відсоток гумової крихти у сировині (рис. 2). Так, при тиску пресування 130 МПа, отримані брикети мали цілісність, якщо відсоток гумової крихти становив 10%. Але дані брикети мали низьку міцність (розсипалися при перекладанні), мали високу крихкість. При більшому відсотку крихти – брикети не формувалися. Найвища щільність брикетів спостерігалася при вмісті крихти – 1%. При відсотку крихти 5% брикети мали задовільну щільність – 790 кг/м<sup>3</sup>. Дані брикети мали достатню міцність, задовільну крихкість. Недоліком їх є наявність тріщин на поверхні (зовнішній вигляд). У більшості своїй тріщини та зменшення

характеристик міцності брикетів пов'язані із релаксацією напруги в них. На релаксацію напруги в брикеті значно впливає наявність гумової крихти. Брикети із такою щільністю можуть бути використані у якості місцевого палива.

Залежність щільності композитних брикетів від вмісту гумової крихти описується рівнянням:

$$y = 1,6535x^2 - 57,997x + 1065,6 \quad (2)$$

Також, нами були проведені дослідження по визначенню впливу щільності композитних брикетів від тиску пресування при вологості соломи 14 %, вмісту крихти 5%, її розміру 2 мм і розмірі часток соломи 10 мм.

Досліди проводилися трикратно для кожного тиску пресування – 110, 120, 130, 140, 150, 160 МПа.

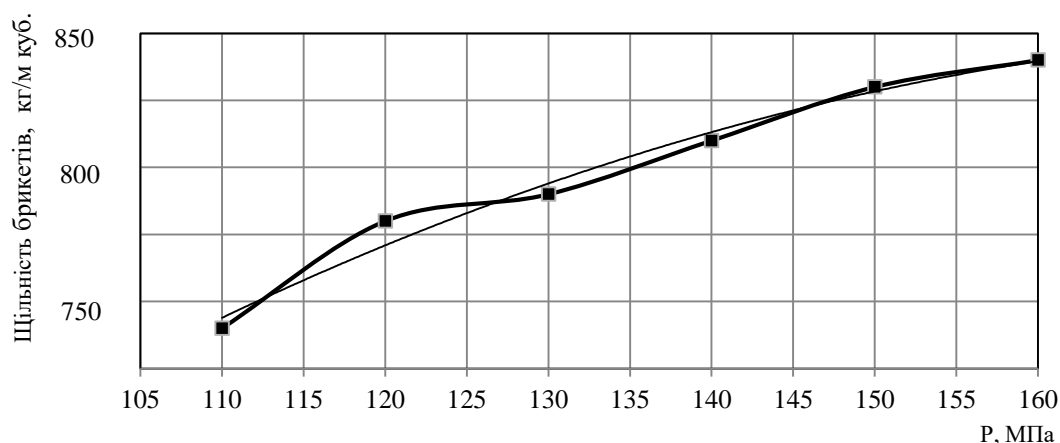


Рис. 3. Залежність щільності композитних брикетів від тиску пресування при вологості соломи 14 %, вмісті крихти 5%, її розміру 2 мм і розмірі часток соломи  $1,0 \times 10^{-2}$  м

Як видно із рис. 3, щільність брикетів безпосередньо залежить від тиску пресування, із його збільшенням, збільшується й щільність брикетів. При тиску 160 МПа щільність брикетів буде становити  $840 \text{ кг/м}^3$ , а при найменшому тиску випробування – 110 МПа, щільність становила  $740 \text{ кг/м}^3$ . Нами було вибрано більш раціональний тиск, при якому забезпечуються задовільні показники міцності брикетів, їх цілісності та крихкості. Таким тиском було вибрано значення 130 МПа. Даний тиск був прийнятий для подальших досліджень також із міркувань робочого тиску, який створює більшість обладнання для брикетування.

Значення залежності щільності композитних брикетів від тиску пресування описується рівнянням:

$$y = -2E-05x^2 + 0,0072x + 0,1876 \quad (3)$$

При зміні тиску з 110 МПа до 160 МПа щільність паливних брикетів збільшилась на  $100 \text{ кг/м}^3$ . При тиску 110 МПа відбувається зовнішнє ущільнення матеріалу за рахунок порожнеч між частками. По мірі зростання тиску, ущільнюються і деформуються самі частки; між ними виникає молекулярне зчеплення. Високий тиск у кінці пресування призводить до переходу пружних деформацій часток в пластичні, внаслідок чого структура брикету зміцнюється і зберігається задана форма. Завдяки хімічній реакції лігніну на тиск більше 120 МПа і високу температуру, речовина набуває в'язко пластичних властивостей і брикет набуває задовільних показників якості.

На рис. 4 наведені зразки брикетів із суміші соломи та гумової крихти, які були виготовлених на лабораторній установці.

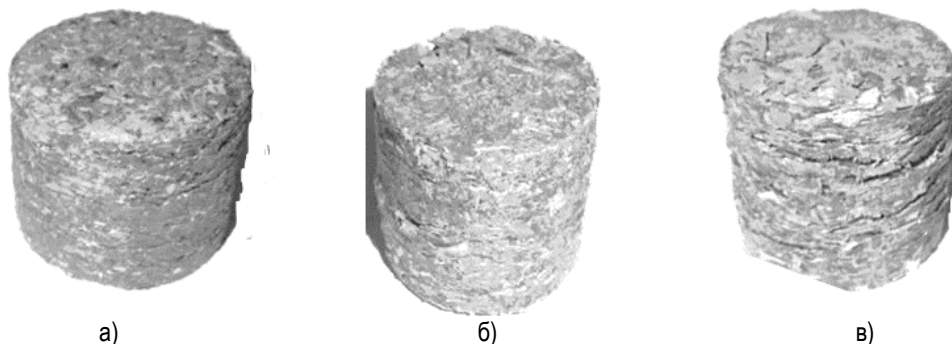


Рис. 4. Зразки брикетів, що були отримані на лабораторній установці із суміші соломи та гумової крихти при різних значеннях відсотку гумової крихти (тиск пресування 130 МПа, розмір крихти – 2 мм, і розмірі часток соломи 10 мм): а) 1%, б) 5%; в) 10%

Як видно із рис. 4, дані брикети навіть візуально відрізняються своєю цілісністю, а відповідно й щільністю та крихкістю.

Таким чином, нами були установлені наступні параметри для виготовлення паливних брикетів із суміші соломи та гумової крихти.

Для соломи:

- розмір фракції – 10 мм,
- вологість соломи – 14 %.

Для гумової крихти:

- розмір фракції – 2 мм,
- вміст крихти в сировині – 5 %

Згідно власних досліджень, раціональним був вибраний тиск пресування для виготовлення паливних брикетів – 130 МПа.

Використання даних композитних брикетів у порівнянні із брикетами, що виготовлялися тільки із соломи озимої пшениці дає підвищення їх теплотворної здатності.

Так, згідно довідникових даних, теплотворна здат-

ність брикетів із озимої пшениці становить 3400 ккал/кг, теплотворна здатність гумової крихти – 7500 ккал/кг. При співвідношенні соломи до гумової крихти 95:5 – теплотворна здатність таких брикетів буде становити 3605 ккал/кг, що забезпечує збільшення теплотворної здатності на 6%.

Так, наприклад, при використанні для виготовлення паливних брикетів преса ударно-механічного Scorpion SP 50-350т з його експлуатаційною продуктивністю 300 кг за годину при двозмінній роботі обладнання можна забезпечити утилізацію гумової крихти за даний час у кількості 240 кг. Тобто,

фактична утилізація гумової крихти за місяць буде становити близько 6 тисяч кг.

**Висновки.** Проведені дослідження показали можливість утилізації відпрацьованих шин шляхом переробки в гумову крихту та виготовлення композитних паливних брикетів. У результаті проведених лабораторних досліджень були визначені раціональні параметри гумової крихти, її відсоток у складі сировини та тиск пресування для виготовлення композитних паливних брикетів.

#### **Список літератури:**

1. Колотило Д. М. Системи технологій і екологія промисловості. -К.: НМКВО, 1992. –400 с.
2. Виллу Варес, Юло Каськ, Пеэтер Муйсте и др. Справочник потребителя биотоплива. - Таллин.: Таллинский технический университет, 2005. - 183 с.
3. Сергієнко М.І. Проблема утилізації автомобільних шин та шляхи її вирішення / М.І. Сергієнко, А.І. Васильченко, М.П. Веремєнко // Збірник наукових праць НТК «Енергетика. Екологія. Людина», розділ «Інженерна екологія» –К., 2009. –С. 338-341.
4. Пляцук Л.Д. Утилізація гумових відходів / Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, О.П. Будьонний // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. Випуск 5/2007 (46).Ч.1 –С. 152 –154.
5. Семірненко С.Л. Брикетування соломи як альтернатива сільськогосподарським спалюванням / С.Л. Семірненко, Ю.І. Семірненко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства: (технічний сервіс машин для рослинництва). 2013. – Вип. 134. – С. 271–275.
6. Kaletnik, H. (2010). Biopalyvo. Prodovolcha, enerhetychna ta ekonomichna bezpeka Ukrainy [Biofuels. Food, energy and economic security of Ukraine]. Kyiv: Khai-Tek Pres (in Ukrainian) (2010).

**Semirnenko Y.I.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Semirnenko S.L.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)

#### **Utilization of used automotive tires by processing into fuel briquettes**

*One of the urgent problems facing the trucking companies of our country is the problem of recycling used tires. Utilization and recycling is not only the reduction of pollution, but also the reduction of consumption of natural resources and energy. The continuous growth of the tractor fleet leads to a constant increase in the number of used tires. This problem is of great environmental importance, as worn tires accumulate in the places of their operation (at the motor depot, industrial, agricultural enterprises, etc.), are taken to landfills or scattered in the surrounding area, pollute the environment because they do not decompose due to their high resistance to action of external factors (sunlight, moisture, oxygen, ozone, microbiological influences). Tires have a high fire hazard, and the products of their uncontrolled combustion have an extremely harmful effect on the environment (soil, water, air pool) and its inhabitants. At the same time, the constant strengthening of accepted international norms limiting environmental pollution by waste forces us to spend significant funds on the elimination of the consequences of pollution. Thus, there is an urgent need to dispose of used tire waste.*

*Tires are a source of valuable secondary raw materials: rubber (rubber), soot (almost pure carbon) and represent a huge reserve of raw materials, and the elimination of landfills of worn tires will free up significant areas of land occupied by them. Based on the analysis of literature sources, the possibility of formation of straw briquettes with reasonable parameters was checked and the most significant parameters of rubber crumb influencing the density of briquettes were determined: crumb size, rubber crumb content in briquette, pressing pressure.*

*To ensure the practical use of the results obtained during the research, the dependences of the density of briquettes on the size of the rubber crumb, the content of the rubber crumb, the pressing pressure were constructed and analyzed with the help of computer software. Winter wheat straw with the addition of rubber crumb was used for briquetting. The briquettes were made with a diameter of 70 mm. Each experiment was conducted three times, the results with the smallest obvious errors were selected.*

*As a result of laboratory tests, the optimal parameters for the manufacture of fuel briquettes from a mixture of straw and rubber crumb were determined. For straw, the fraction size is 10 mm, the moisture content of the straw is 14%. For rubber crumb, the fraction size is 2 mm, the content of rubber crumb in the raw material is 5%. According to research, it was rational to vibrate the pressing pressure for the manufacture of fuel briquettes - 130 MPa.*

*The calculations show that the use of the proposed briquettes as fuel in comparison with briquettes, which were made only from winter wheat straw, will increase their calorific value by 6%.*

**Key words:** tires, utilization, processing, rubber crumb, briquettes, density, calorific value.

Дата надходження до редакції: 14.11.2020

## ПРОБЛЕМИ ЗНОСУ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ

Павлов Олександр Григорович

старший викладач

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0001-7421-8502

e-mail: pvalex@ukr.net

*В статті продемонстровані результати дослідження впливу технологічних параметрів процесу електроерозійної обробки металевих виробів. Виявлені та систематизовані основні фактори, які впливають на знос електроду-інструменту при електроерозійній обробці.*

**Ключові слова:** електроерозійна обробка, електрод-інструмент, ерозійна стійкість.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.5>

### **Вступ і постановка проблеми.**

При електроерозійній обробці (ЕЕО) важливими параметрами є швидкість знімання металу, величина шорсткості поверхні та стійкість електроду-інструмента (ЕІ). Якщо при прошивці в заготовках наскрізних циліндричних порожнин знос ЕІ в ряді випадків можливо компенсувати збільшенням його довжини (хоча і в цьому випадку знос ЕІ небажаний), то при виготовленні об'ємних деталей знос навіть 0,1% може виявитися неприпустимим внаслідок високих вимог до точності виготовлення профілю деталі. Більше того, є ряд конструктивних елементів деталей, виконання яких методом електроерозійної обробки (ЕЕО) при наявності зносу ЕІ неможливо, навіть задалегідь корегуючи його профіль. До таких елементів відносяться гострі кромки, тонкі перемички та ін. В цьому випадку необхідно використовувати кілька електродів, виготовлення яких у випадку високої точності або складної форми є досить трудомістким процесом.

Проведення ЕЕО без зносу електроду-інструмента дозволила б знизити вартість операції формоутворення профілю, так як при цьому витрати на виготовлення електроду розподіляються на ту кількість деталей, яку їм можна обробити. Крім того, в цьому випадку можливе використання одного ЕІ для чорнової і чистової обробки при наданні йому орбітального руху. Це також дозволяє знизити вартість виконання операції електроерозійного формоутворення деталі за рахунок зменшення кількості використовуваних електродів і зниження часу обробки.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

З огляду на важливість проблеми, дослідники і розробники обладнання для ЕЕО значну увагу приділяють виявленню та вивченню різних факторів, що впливають на стійкість ЕІ. Вже на перших етапах дослідження процесу електричної ерозії в рідкому середовищі було встановлено істотний вплив властивостей матеріалу ЕІ і заготовки на характеристики обробки і стійкість ЕІ. Були прийняті спроби розробки критеріїв, що характеризують ерозійну стійкість матеріалу [1] через їх теплофізичні та електричні характеристики. Значна кількість досліджень присвячена як теоретичному, так і експериментальному дослідженню впливу властивостей матеріалів на характеристики оброблюваності [2]. Однак в процесі накопичення знань про закономірності ЕЕО було виявлено, що в залежності від характеристик імпульсів (полярності, тривалості, амплітуди струму і напруги, форми та ін.) показники оброблюваності матеріалів суттєво змінюються. Причому ма-

теріали, найбільш ерозійно стійкі на одних режимах, проявляють низьку стійкість на інших. Це виявлено і при вивченні взаємної оброблюваності інструментальних сталей і використанні інших матеріалів.

Розрахунки, виконані при вирішенні теплової задачі [3], а також експериментальні дані виявили, що при коротких імпульсах з великою амплітудою струму відмінності в ерозійній стійкості у міді, сталі, графіту і вольфраму не перевищують 1,2-2,5 раз, причому мідь менш ерозійно стійка, ніж сталь. Зі зменшенням амплітуди і збільшенням тривалості імпульсу струму відмінності в величинах ерозійної стійкості у зазначених матеріалів істотно зростають, досягаючи 10-15 разів, причому стійкість міді більше, ніж у сталі.

На основі наведених даних в [4] дається обґрунтований висновок, що внаслідок сильної залежності ерозійної стійкості матеріалів від параметрів імпульсів неможлива побудова одного ряду ерозійної стійкості різних матеріалів. У зв'язку з цим аналіз якості спеціальних електродних матеріалів для ЕЕО суттєво ускладнюється, а розробка єдиної методики визначення показників якості таких матеріалів стає досить проблематичною.

**Метою** роботи є виявлення та систематизація основних факторів, які впливають на знос електроду-інструменту в процесі ЕЕО.

### **Виклад основного матеріалу.**

У більшості випадків для виготовлення ЕІ використовують матеріали на основі міді і графіту за допомогою яких на деяких режимах досягається незначний знос при обробці конструкційних і вуглецевих сталей. Однак в разі необхідності обробки жаростійких сталей, твердих сплавів величина зносу і цих електродних матеріалів істотно зростає. Більш ерозійно стійкими є композиційні матеріали на основі міді з додаванням тугоплавких добавок - нітриду бору, окису хрому та ін.

Дослідження значної кількості електродних матеріалів підтвердило, що їх ерозійна стійкість залежить від характеристик імпульсних розрядів. Крім того, на величину зносу електроду суттєво впливають не тільки теплофізичні властивості матеріалу, а й його структурні характеристики - пористість, розміри зерна і т.д. Встановлено, що максимум зносу композиційних електродних матеріалів при різних режимах обробки має місце в разі збігу діаметра каналу розряду і середніх розмірів зерна. Для зниження зносу середній розмір зерна повинен бути менше в 5-15 разів, а середній розмір пор в 100-700 разів менше діаметра каналу розряду. Зниження зносу на кромках ЕІ і підвищення продуктивності процесу

ЕЕО при використанні в якості ЕІ пористих матеріалів обумовлено дією газодинамічних факелів, що утворюються в результаті випаровування і піролізу робочої рідини в порах і дисоціації ерозійно-зміцнювальної компоненти композиційних електродних матеріалів [5].

Незважаючи на те, що ряд нових матеріалів ЕІ забезпечують обробку з досить гарними технологічними результатами за величиною зносу і швидкості знімання, слід враховувати й інші сторони їх використання. Зокрема, деякі з них (вольфрам та ін.) досить важко піддаються механічній обробці і тому виготовлення з них електродів є складною технологічною задачею. Для отримання інших потрібне спеціальне обладнання (наприклад, для порошкової металургії) і ряд дорожчих компонентів, що підвищує вартість електродів. Крім того, в ряді технологічних процесів доводиться використовувати не спеціальні електродні матеріали, а нетрадиційні електропровідні матеріали, наприклад, сталь для обробки сталевих виробів. У зв'язку з цим для ЕЕО вельми важливим являється зв'язок характеристик матеріалів і електричних параметрів розряду з особливостями зносу ЕІ.

Існує ряд трактувань фізичного механізму зносу ЕІ і відповідно шляхів його зниження. Відповідно однією з гіпотез, які отримали досить широке поширення, різке зниження зносу при деяких режимах обробки пояснюється захисними властивостями вуглеграфітових плівок, що утворюються на електроді при піролізі вуглецевмісних робочих рідин під час дії розряду. Вуглецева плівка, за даними авторів цієї гіпотези, надає тепलोзахисну дію на поверхневі шари ЕІ завдяки високій температурі плавлення графіту, що становить 3500-3600 °С [6]. Вважається, що на початковій стадії імпульсу, коли щільність струму в каналі розряду велика, відбувається руйнування плівки, а при зменшенні щільності до кінця розряду - її інтенсивне осадження. При цьому можна підібрати такі характеристики імпульсу струму по амплітуді і тривалості, при яких має місце динамічна рівновага між утворенням графітової плівки і її руйнуванням. Захисна плівка відповідно до [7] складається не тільки з пірографіта, але і з матеріалу заготовки. Відповідно до цієї гіпотези для зменшення зносу ЕІ рекомендується витримувати відношення між амплітудою імпульсу струму і його тривалістю в межах 0,03-0,07 А/мкс. З метою зниження зносу запропоновано використовувати імпульси гребінчастої форми. У цьому випадку під час дії піків гребінчастого імпульсу відбувається знімання металу з деталі і руйнування плівки на електроді, а під час западин – плівкоутворення [8]. При цьому канал розряду встигає зміститися і під час наступного піку він знаходиться вже в іншому місці. Встановлюючи певне співвідношення між амплітудою гребнів гребінчастого імпульсу, величиною струму в западині і тривалістю гребнів і западини, можна отримати невелику величину зносу. Експерименти показують, що знос ЕІ при використанні гребінчастих імпульсів знижується при збільшенні кількості гребнів, тобто при збільшенні тривалості імпульсу.

Потрібно відзначити, що це явище зниження зносу електрода при зміні тривалості імпульсу було встановлено в багатьох дослідженнях, виконаних на самому різному обладнанні і в широкому діапазоні параметрів імпульсів. Більш того, зниження величини зносу при збільшенні тривалості імпульсу було отримано і при використанні в якості робочої рідини води. В цьому випадку відсутня можливість виділення вуглецю при її розкладанні. Це дозволяє припустити, що зме-

шення зносу при збільшенні тривалості імпульсу обумовлено не тільки утворенням захисних плівок, а й іншими факторами: перерозподілом енергії між анодом і катодом, зміною щільності струму в процесі розряду і т.д.

Тривалість імпульсу не є єдиною характеристикою, що визначає величину зносу ЕІ. Дослідження показують, що на ефективність видалення матеріалу з лунки на деталі і знос ЕІ впливають і інші параметри імпульсу. В експериментах [1,2,6] визначалися швидкості знімання речовини з анода і катода в разі використання суперпозиції імпульсів: на імпульс з тривалістю  $t_1$  і амплітудою  $i_1$  накладався коротший імпульс з тривалістю  $t_2$  і амплітудою  $i_2$ , більшою, ніж  $t_1$ . Початок короткого імпульсу міг зміщуватися відносно початку довгого імпульсу на час  $t_{зм}$ . У результаті експериментів виявлено, що залежності величини швидкості знімання і величини відносного зносу від часу зсуву мають екстремуми. В порівнянні з прямокутним імпульсом еквівалентної енергії при використанні імпульсів ступінчастою форми істотно змінюється кількість металу, що викидається з анода і катода. Якщо протягом імпульсу струм зростає поступово, то знос ЕІ знижується. Якщо ж струм знижується до кінця імпульсу, то має місце різке зростання зносу. Зниження зносу ЕІ при використанні імпульсів з малою величиною струму на початку імпульсу пов'язують з особливостями розподілу і відведення тепла на електродах, яке виділяється при розряді.

Фізичні процеси, що відбуваються при розряді, в значній мірі залежать від складу робочої рідини. Дослідження [9] показали, що введення робочої рідини призводить до зміни розподілу виділеної при розряді енергії між анодом і катодом. Відповідно до гіпотези авторів це відбувається за рахунок утворення на металевих поверхнях міцних адсорбційних плівок, що тягне за собою зміну властивостей рідини по довжині міжелектродного проміжку (МЄП).

При ЕЕО в воді та електролітах також має місце ефект перерозподілу енергії розряду між електродами при зміні складу електроліту і, як наслідок, ерозія анода збільшується. В даний час провідні фірми з випуску електроерозійного обладнання проводять дослідження в напрямку пошуку складів робочих рідин, що забезпечують підвищення продуктивності ЕЕО і зниження зносу ЕІ. У рідини вводять і порошки, що утворюють під дією електричного розряду негативні іони (з оксидів міді, алюмінію, нікелю та ін.) І добавки з біфенільних радикалів, що знижують в'язкість, а також добавки, що змінюють електропровідність. Однак аналіз цих робіт показує, що остаточної ясності про характер впливу складу робочої рідини на знос електродів немає.

На величину відносного зносу електрода впливають не тільки форма імпульсів, які видаються генератором, і склад робочого середовища, а й ряд інших факторів. Процес ЕЕО є імовірнісним, при якому умови проходження розрядів безперервно випадковим чином змінюються. Тому, якщо генератор імпульсів видає в розрядний контур імпульси напруги певної форми, наприклад прямокутної, то і при нормальному перебігу процесу завжди присутні імпульси з різною формою розрядного струму: короткі замкнення, дугові, робочі з різним часом затримки розряду після прикладення напруги, що призводять до різного впливу на електроди і відповідно викликають неоднаковий знос. Тобто що має місце кореляція між часом затримки імпульсів і зносом електродів. Зокрема, збільшення числа імпульсів з малим часом затримки підви-

щуче відносний знос. Тому в деяких систем управління приводом регулятора подачі ця характеристика вибирається в якості керуючого сигналу. Тобто система автоматичного регулювання непрямым чином впливає на величину зносу. Необхідно вказати і на те, що в дослідженнях процесу ЕЕО, в якому виключалися імпульси з малим часом затримки, не було встановлено зниження зносу ЕІ.

На величину відносного зносу впливають і інші фактори, що визначають умови протікання процесу. Зв'язок площі обробки з величиною відносного зносу ЕІ обумовлена концентрацією в МЕР просторі продуктів ерозії і газопарових бульбашок, а також тепловим станом електрода [10]. Так, при зменшенні площі обробки збільшується кількість газопарових бульбашок в МЕР, зростає тепловий потік через одиницю площі електродів і в ряді випадків відбувається зміна величини торцевого зазору. Все це призводить до зростання зносу ЕІ. Якщо ж умови обробки такі, що ускладнено видалення продуктів ерозії і знижена інтенсивність охолодження електродів, то зростає кількість розрядів, вторинно диспергуючих продуктів ерозії, і температура поверхні електродів, що також збільшує знос. Такі умови мають місце при зростанні площі обробки та збільшенні глибини виготовляється порожнини.

Сильний вплив на ЕЕО надає прокачування робочої рідини: інтенсифікується видалення продуктів ерозії і охоло-

дження поверхонь електродів. Характер впливу прокачування на знос залежить від матеріалів електродів: при використанні міді знос зростає зі збільшенням витрати, при використанні графіту знос мінімальний.

Прошивку глибоких отворів малого діаметра трубчастих капілярним електродом з прокачуванням робочої рідини виконують під тиском 7...10 МПа. При її здійсненні ЕІ робить поступальний рух подачі і додаткове обертання навколо власної осі. Така схема обробки забезпечує досить високу продуктивність прошивки отворів з подачею до 20 мм / хв. В даний час порожнисті трубки виробляються спеціально для електроерозійної прошивки отворів. Виготовляють одноканальні і багатоканальні (2, 3, 4 канали) порожнисті електроди з міді та латуні з зовнішнім  $\varnothing$  0,1...3 мм, одноканальні трубки з вольфрамо-мідного сплаву  $\varnothing$  0,15...6 мм, одноканальні трубки з твердого сплаву  $\varnothing$  0,1...3 мм..

**Висновок:** Розгляд описаних вище досліджень показує, що проблема зносу електродів-інструментів є досить багатогранною і в даний час вивчена не у всіх аспектах. Дослідження ведуться за такими основними напрямками: розробка спеціальних електродних матеріалів і робочих середовищ, визначення оптимальних характеристик імпульсів для необхідних пар матеріалів електродів і необхідної якості одержуваної поверхні, підвищення якості регулювання процесів електроерозійної обробки.

#### Список літератури

1. Jeswani M.L. Dimensional analysis of tool wear on electrical discharge machining // Wear. 1979. 55.N1. P. 153—161.
2. Pandit S. M., Rajurkar K. R., Shaw M. C. Analysis of electrodischarge machining of cemented carbides//CIRP Ann. 1981. 30.N1. P. 111—116.
3. Лившиц А. Л. Рогачев И.С., Отто М. Ш. Генераторы импульсов. М., 1959.
4. Артамонов Б.А., Волков Ю.С. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки. Часть 2. Модели процессов электроэрозионной обработки. Проволочная вырезка Москва. ВНИИПИ. 1991. - 144 с.
5. Абляз Т.Р. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов Учеб. пособие / Т.Р. Абляз, А.М. Ханов, О.Г. Хурматуллин. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 121 с.
6. Heuvelmati C. I. Summary report of the CIRP cooperative research of the spark erosion machining of cemented carbides//CIRP Ann. 1980. 29.N2. P. 541—544.
7. Erden A. Effect of material on the mechanism of electrodischarge machining//Trans, of ASME/J. Eng. Mater, and Technol. 1983. 105. N 2. P. 132—138.
8. Немилев Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. —Л.: Машиностроение. Ленинград 1989. — 164 с.
9. Саушкин Б.П. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей. – М.: Изд. Дрофа, 2002. – 656 с.
10. Елисеєв Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники. – М.: Изд. МГТУ им. Н. Баумана. 2010.– 437 с.

*Pavlov A.G., Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

#### **Problems of wear of electrode-tool during electro-erosion machining**

*The article contains research on the problems of wear of an electrode-tool with electric discharge machining. Important parameters are the speed of removal of metal, the surface roughness and the stability of the electrode tool. If during the breakdown in the workpieces of through-cylindrical cavities, the wear of an electrode-tool in some cases can be offset by an increase in its length (although in this case, the wear of an electrode-tool is undesirable), then in the manufacture of bulk parts, wear, even 0.1% may be inadmissible because high demands on the accuracy of the profile details. Moreover, there are a number of structural elements of the parts, the execution of which by the method of electric discharge machining in the presence of wear of the electrode-tool is impossible, even in advance adjusting its profile. These elements include sharp edges, thin jumpers, and so on. In this case, it is necessary to use several electrodes, the manufacture of which in the case of high accuracy or complex form is a rather laborious process.*

*As the research shows in the article of conducting electric discharge machining without the wear of an electrode-tool, it would be possible to reduce the cost of the formation of the profile of the profile, as at the same time the cost of manufacturing the electrode is distributed to the amount of parts that they can handle. In addition, in this case, it is possible to use one electrode-tool for roughing and finishing treatment while giving it orbital movement. It also allows reducing the cost of performing the operation of the electro-erosive form-forming part by reducing the number of used electrodes and reducing the processing time.*

*The analysis of literature and publications carried out in the article shows that the problem of wear of electrode tools is quite versatile and is currently not studied in all aspects. The research is conducted in such basic directions: development of special electrode materials and working media, determination of optimal characteristics of pulses for the necessary pairs of electrodes and the required quality of the resulting surface, improving the quality of the regulation of electroerosive processes.*

**Key words:** *electric discharge machining, electrode-tool, erosion resistance.*

Дата надходження до редакції: 14.11.2020



**ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛОПЛАКУЮЧИХ МАСТИЛЬНИХ ПОКРИТТІВ  
НА ГНУЧКИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРУЖНИХ МУФТ****Марцинковський Василь Сігізмундович**кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-4324-1360  
email: mcb@triz-ltd.com**Тарельник В'ячеслав Борисович**доктор технічних наук, професор  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0003-2005-5861  
email: tarelnyk@ukr.net**Коноплянченко Євген Владиславович**кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0003-4814-1796  
email: yevhen.konoplianchenko@snau.edu.ua**Думанчук Михайло Юрійович**старший викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0003-3559-4729  
email: m\_duman@ukr.net**Рясна Ольга Василівна**старший викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0001-6917-6950  
email: olgar5062017@gmail.com

Роботу присвячено розробці технологічних методів підвищення надійності та довговічності пружних муфт. Відомо, що основною причиною втрати працездатності муфти є знос гнучких елементів пакету внаслідок їх фретинг-корозії і наступного втомного руйнування. Проведено дослідження особливостей процесів фретинг-корозії гнучких елементів пружних муфт. Виконано аналіз існуючих методів зниження фретинг-корозії деталей машин, на підставі якого виявлено існуючі проблеми та запропоновано методи їх рішення. Встановлено, що найбільш ефективним механізмом фізико-хімічного впливу на поверхні гнучких елементів, з точки зору підвищення їх зносостійкості, є нанесення на них металоплакуючих мастильних матеріалів.

В результаті проведених досліджень розроблено нову технологію формування пакету гнучких елементів пружної муфти. Особливістю запропонованої технології є створення між гнучкими елементами проміжного металоплакуючого шару на основі парафіну з додаванням порошку міді і порошку дисульфиду молібдену. Приготування металоплакуючого матеріалу полягає в розплавленні парафіну, введенні необхідної кількості порошку дисульфиду молібдену та ретельному перемішуванні. Нанесення матеріалу на гнучкі елементи виконується при складанні пакету з гнучкими елементами. Дослідження ефективності впливу металоплакуючого матеріалу на знос поверхонь гнучких елементів було виконано на спеціальному стенді, що імітує реальний стан пакету гнучких елементів при роботі муфти. Встановлено, що найбільш раціональний вміст порошку міді та порошку дисульфиду молібдену в металоплакуючому матеріалі знаходиться в межах від 5 до 25 вагових відсотків.

Для механізованого способу нанесення металоплакуючих мастильних матеріалів на гнучкі елементи пружної муфти була виготовлена спеціалізована установка. Установка забезпечує приготування розчину металоплакуючого матеріалу та його нанесення шляхом занурювання гнучких елементів. Надлишки розчину видавлюються при стисканні пакету штатними кріпильними деталями.

Запропонована технологія дозволяє підвищити фретингостійкість гнучких елементів в 6,5 раз в порівнянні з необробленими.

**Ключові слова:** пружна муфта, гнучкий елемент, фретинг-корозія, сталь 12Х18Н9, парафін, мідь, дисульфід молібдену, металоплакуючий мастильний матеріал.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.6>

### Постановка проблеми у загальному вигляді

Основні вимоги, що пред'являються до динамічного обладнання (ДО) – економічність, надійність і зручність в експлуатації і обслуговуванні (а краще: в його не обслуговуванні). Муфти різної конструкції широко застосовуються в різних областях техніки.

У сучасному насосному і компресорному машинобудуванні широко використовуються пружні муфти (ПМ) з гнучкими елементами для передачі крутного моменту від приводу на енергетичний агрегат [1]. Досвід використання в приводах ДО ПМ з гнучкими металевими елементами показує їх переваги в порівнянні з традиційними зубчастими і втулково-пальцевими муфтами: компенсація значно більшої неспіввісності з'єднаних валів, збільшення терміну служби, м'який пуск, демпфірування осьових і радіальних сил, відсутність мастила

і необхідності обслуговування в процесі експлуатації.

Найбільш частою причиною втрати працездатності ПМ є втомлюване руйнування гнучких елементів в наслідок їх фретинг-корозії (Ф-К).

На рис. 1 представлені фотографії зруйнованого пакета гнучких елементів муфти TS18-130AG 1759 (а) і поверхонь їх характерних ділянок муфти TS18-130AG1759 (б) і фірми «ТРИЗ» (в), пошкоджених Ф-К.

Умовами для виникнення Ф-К є наявність взаємних мікропереміщень мембран, стиснутих при складанні в пакет. Дані дефекти розвиваються в середині пакета і тому їх діагностування ремонтними службами ускладнено [2]. У зв'язку з цим, питання захисту деталей муфт від Ф-К є актуальними для всіх галузей промисловості, де вони застосовуються.

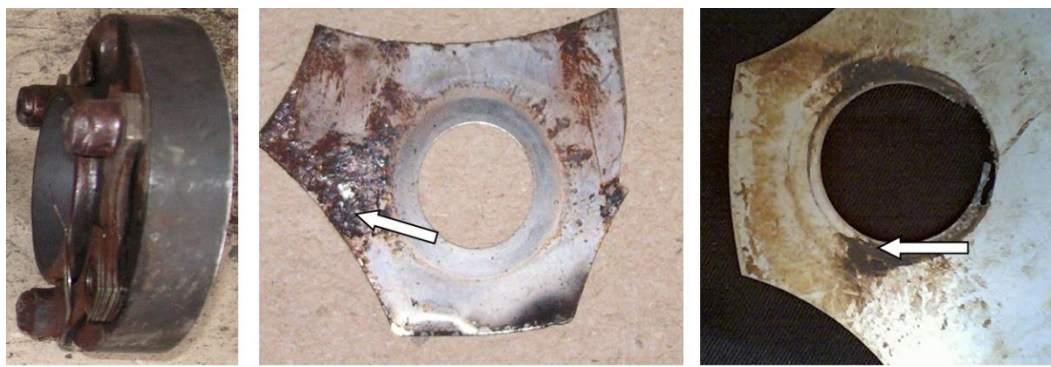


Рис. 1. Наслідки фретинг-корозії деталей муфти з гнучкими металевими елементами.

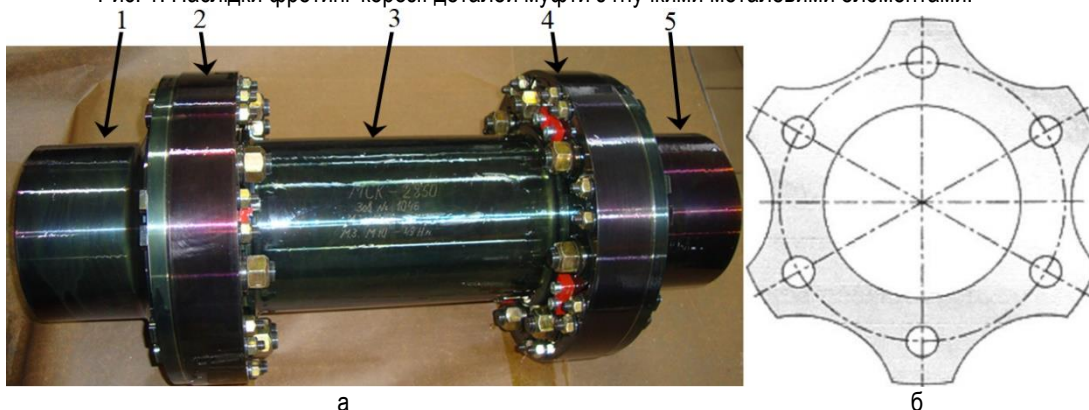


Рис. 2. Муфта (а) з пакетами гнучких елементів типу МСК -2850 (б) конструкції ТОВ "ТРИЗ".

### Аналіз основних досліджень і публікацій

Муфта з пружними металевими елементами (рис. 2) складається з двох напівмуфт (1, 5) пружних передавальних елементів (2, 4), розділених циліндричною проставкою (3). Пружні елементи виконані у вигляді пакетів кільцевих металевих мембран заводського збирання. Матеріалом для виготовлення гнучких елементів муфт служить корозійно- і жаростійка холоднокатана сталь 12Х18Н9, ГОСТ 4986-79.

Їх основними перевагами в порівнянні з традиційними зубчастими і втулково-пальцевими муфтами є значні компенсуючі можливості в плані радіальної неспіввісності і перекосів валів приводу і агрегату, незначні осьових і радіальні реактивні сили; пружні муфти безшумні в роботі, не вимагають мастила і обслуговування в процесі експлуатації.

Заміна штатних зубчастих муфт на пружні забезпечує

стабільність компенсуючих властивостей, запобігаючи осьового зміщення ротора в пускових режимах. При виході на робочий режим осьова сила, що діє на ротор компресора з боку зубчастого зачеплення штатної зубчастої муфти КВТ (компресор високого тиску) – мультиплікатор, становить ~4500 Н, а при зміні форми плями контакту може перевищує ~12000 Н, що може привести до аварії (рис. 3). Максимальна осьова сила з боку муфти з пружними елементами становить не більше ~150 Н.

В даний час ТОВ "ТРИЗ" розроблено пакет прикладних програм, який дозволяє проводити оптимізацію ПМ за критеріями міцності, віброізолюючими та компенсуючими властивостями з урахуванням динамічних особливостей конкретних роторних машин.

Блок-схема завдань, що вирішуються при проектуванні муфт з пружними елементами, наведено на рис. 4.



Рис. 3. Руйнування зубчастої муфти мультиплікатора (компресор К-104 виробництва карбаміду)..

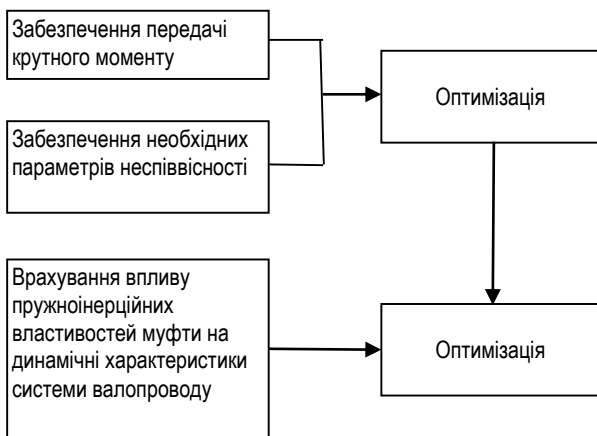


Рис. 4. Блок-схема завдань, що вирішуються при проектування пружних муфт з гнучкими елементами.

Аналіз втрат працездатності пакетів гнучких елементів ПМ показує, що, незважаючи на успішне вирішення оптимізаційних задач в області проектування ПМ, зокрема, вирішення завдань оптимізації геометричної форми, напружено-деформованого стану гнучкого елемента, міцності, мінімізації маси, а також кутової і осової жорсткості, недоліком подібних способів є те, що гнучкі елементи муфт схильні до Ф-К, яка в найвищій мірі проявляється в місцях жорсткого зацмлення кріпильними елементами (рис. 5). Ураження Ф-К становить велику небезпеку, так як може служити джерелом втомного руйнування пружних елементів і в кінцевому підсумку виходу муфти з ладу.

Муфти з пружними металевими елементами поставляються відповідно до вимог стандарту API 671 "Муфти спеціального призначення для застосування в нафтопереробній промисловості". Прогнозований (розрахунковий) ресурс муфти становить 20 років, гарантія та зобов'язання відповідають вимогам AP 671.

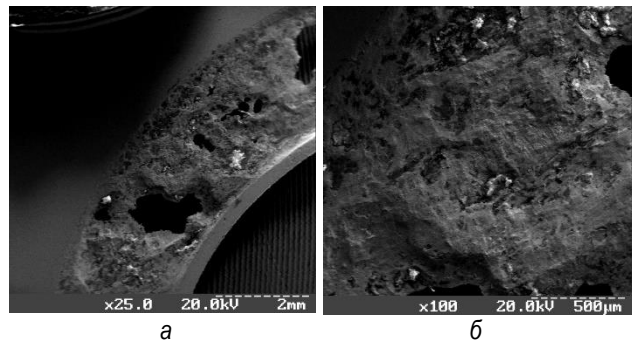


Рис. 5. Топографія поверхні гнучкого елемента пошкодженого Ф-К: а –  $\times 25$ ; б –  $\times 100$ .

Традиційним способом формування пакету гнучких елементів ПМ є спосіб, що включає виготовлення гнучких елементів і подальше їх складання в пакет з механічним кріпленням [3].

Однак недоліком їх конструкції, а значить, і способу виготовлення є схильність поверхонь гнучких елементів до Ф-К.

Відомий спосіб формування пакету гнучких елементів пружних муфт, що включає виготовлення гнучких елементів, подальше їх складання в пакет з механічним кріпленням, в якому перед складанням на поверхні гнучких елементів, що сполучаються наносять металоплакуючий мастильний матеріал (МММ), принаймні, в місцях їх механічного кріплення при формуванні пакета, а після складання пакет стискають, видаляючи надлишок металоплакуючого мастильного матеріалу [4].

При застосуванні такої технології може реалізуватися ефект беззношуваності, який проявляється в тому, що на деталях, що труться в процесі роботи вузлів тертя формується тонка, така що важко піддається окисленню захисна плівка, яка має здатність до самовідновлення. Вона складається з введених в матеріали присадок у вигляді поверхнево-активних речовин, порошкоподібних металів, їх оксидів і т.д., причому товщина плівки складає від декількох атомних шарів до 1-2 мкм. Підвищена ефективність МММ обумовлена наявністю контакту поверхонь тертя через пластично деформуєми м'який і тонкий шар металу, більшою реалізацією ефекту Рєбіндера, перенесенням частинок зносу з однієї поверхні тертя на іншу і утриманням частинок в зоні контакту електричним полем [5].

Нанесення МММ, що складається з парафіну з додаванням порошку з міді або її сплавів забезпечує, практично, повне беззношування поверхонь гнучких елементів, завдяки зашпаклюванню мікронерівностей поверхонь заготовок і збільшення площі їх фактичного контакту, а також зменшення коефіцієнта тертя, що, в кінцевому підсумку, значно знижує силу тертя, а значить, ймовірність руйнування і знос контактуючих поверхонь. Найбільш раціональним процентним вмістом металоплакуючої присадки, як для міді, так і для бронзи БНК є 5-25 вагових відсотків, так як подальше збільшення процентного вмісту присадки не впливає на якість мастила (табл. 1).

Слід зазначити, що випробування, що демонструють досягнення позитивного ефекту, пов'язаного з поліпшенням якості пакетів гнучких елементів ПМ проводилися на стенді, при амплітуді 2 мм і з кількістю циклів  $10^7$  [6]. Однак наступними дослідженнями було встановлено, що при збільшенні

амплітуди до 5 мм і кількості циклів до  $2 \times 10^7$  знос поверхонь гнучких елементів значно зростає, причому більшою мірою не в зоні кріплення, а на ділянках, віддалених від неї, де контактуючі поверхні при переміщенні проходять великі відстані відносно один одного.

Таблиця 1 - Результати вимірювання шорсткості поверхонь гнучких елементів ПМ, пошкоджених Ф-К при випробуванні на стенді з амплітудою 2 мм і кількості циклів  $10^7$

Матеріал поверхонь контакту	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм
сталь 12X18H9	0,76	3,3	3,8
100% парафін	0,35	1,9	2,6
95% парафін+5% мідь	0,18	1,4	1,7
75% парафін+25% мідь	0,17	1,3	1,8
50% парафін+50% мідь	0,17	1,4	1,7
95% парафін+5% БНК	0,17	1,4	1,8
75% парафін+25% БНК	0,18	1,3	1,7
50% парафін+50% БНК	0,18	1,4	1,8

При розбиранні після випробувань пакета з гнучкими елементами на поверхнях останніх було виявлено сліди зносу в результаті Ф-К (рис. 6). Продукти зносу, що з'явилися в результаті більш тривалих випробувань, перебуваючи в замкнутому просторі між поверхнями гнучких елементів, шаржують їх і сприяють появі окремих кратерів.

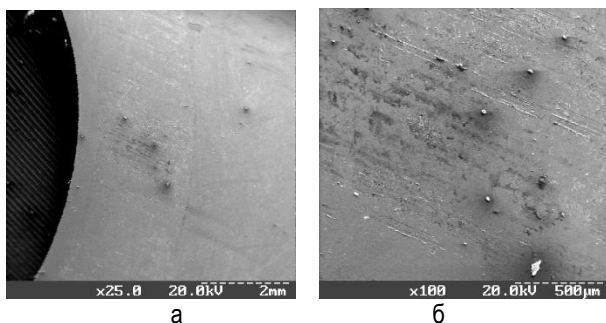


Рис. 6. Сліди Ф-К поверхонь гнучких елементів ПМ при збільшенні  $\times 25$  (а) і  $\times 100$  при амплітуді згинання 5 мм і кількості циклів  $2 \times 10^7$ .

Відома позитивна роль дисульфиду молібдену ( $\text{MoS}_2$ ), що застосовується в якості твердого мастила в загальній проблемі підвищення надійності і довговічності машин і механізмів. Так, в [7] відзначається, що за класифікацією, запропонованою Кемпбелом, дисульфід молібдену, як і графіт, слюда, тальк, нітрид бору, стеарат-цинку відносяться до групи твердих мастил, кристалічна ґратка яких має шарувату структуру. Атоми кожного шару пов'язані між собою міцними хімічними зв'язками, окремі шари пов'язані між собою слабкими молекулярними силами, що забезпечує легкість ковзання по площині спайності. Товщина одного елементарного шару  $\text{MoS}_2$  дорівнює 6,25 Å. Плівка дисульфиду молібдену товщиною 0,025 мкм складається з 40 шарів з 38 площинами ковзання між ними. Висока адгезія дисульфиду молібдену до металів обумовлена міцними молекулярними зв'язками, утвореними атомами сірки з металом; будова кристалічної ґратки забезпечує наявність важливих для мастильних матеріалів високі адгезійних властивостей.

В роботі [8] зазначається, що хороші результати дає

застосування дисульфиду молібдену як наповнювача в мастилах, що запобігають Ф-К.

Таким чином, метою роботи є створення способу, який забезпечує надійний захист гнучких елементів ПМ від Ф-К і підвищення їх довговічності в більш важких умовах, за рахунок зміни якісних параметрів їх поверхневих шарів шляхом нанесення корозійностійких мастильних матеріалів, що включають в свій склад порошок з дисульфиду молібдену.

#### Методика досліджень та обговорення результатів

Для визначення впливу покриттів з дисульфиду молібдену на Ф-К гнучких елементів ПМ проводилися додаткові дослідження.

У запропонованому способі МММ попередньо готують з парафіну з додаванням порошку міді в кількості від 5 до 25 вагових відсотків і порошку дисульфиду молібдену ( $\text{MoS}_2$ ) в кількості від 5 до 25 вагових відсотків і наносять по всій поверхні, що сполучається, кожного гнучкого елемента, принаймні, в межах 20-30 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета [9].

Приготування мастильного матеріалу здійснювалося наступним чином. У розплавлений парафін при інтенсивному перемішуванні вводили порошок з міді і дисульфиду молібдену. Отриманий матеріал наносили на заготовки гнучких елементів муфти. При цьому використовували наступні серії покриттів, виконаних в співвідношеннях:

- 1-й пакет - без покриття;
- 2-й пакет - 100% парафін;
- 3-й пакет - 95% парафін + 5% мідь;
- 4-й пакет - 75% парафін + 25% мідь;
- 5-й пакет - 5% мідь + 5%  $\text{MoS}_2$  + 90% парафін;
- 6-й пакет - 5% мідь + 25%  $\text{MoS}_2$  + 70% парафін;
- 7-й пакет - 5% мідь + 50%  $\text{MoS}_2$  + 45% парафін;
- 8-й пакет - 5% мідь + 75%  $\text{MoS}_2$  + 20% парафін;
- 9-й пакет - 25% мідь + 5%  $\text{MoS}_2$  + 70% парафін;
- 10-й пакет - 25% мідь + 25%  $\text{MoS}_2$  + 50% парафін;
- 11-й пакет - 25% мідь + 50%  $\text{MoS}_2$  + 20% парафін;
- 9-й пакет - 25% мідь + 75%  $\text{MoS}_2$ .

Потім заготовки збирали в пакет. Надлишок покриття видаляли шляхом здавлювання заготовок при температурі плавлення парафіну.

Величину зносу вимірювали профілографіями-профілометрами: моделі 252 і DIAVITE DH-5 за трьома параметрами (Ra, Rz і Rmax). Вимірювання проводилися поперек напрямку прокату. База вимірювань становила 4 мм.

Вихідна шорсткість гнучких елементів муфт зі сталі 12X18H9 (ГОСТ 4986-79) становила: Ra=0,16 мкм; Rz=1,4 мкм і Rmax = 1,7 мкм.

Для випробувань набирали пакет з гнучких елементів муфти МСК-470, розрізаних навпіл. Як матеріал покриття використовували парафін, як в чистому вигляді, так і з добавками з міді і дисульфиду молібдену.

Випробування проводили на стенді (рис. 7), при амплітуді 5 мм і з кількістю циклів  $2 \times 10^7$ . В результаті було встановлено, що додавання в мастильний матеріал, що складається з парафіну і порошку міді в кількості від 5 до 25 вагових відсотків, порошку дисульфиду молібдену в кількості від 5 до 25 вагових відсотків, значно знижує знос поверхонь гнучких елементів. Результати досліджень зведено до табл. 2.



Рис. 7. Стенд для дослідження фретингостійкості: 1 – лічильник циклів; 2 – станина з підшипниковими опорами; 3 – електропривод; 4 – ексцентриковий механізм; 5 – пакет з гнучких елементів; 6 – механізм кріплення гнучких елементів.

Таблиця 2 - Результати вимірювання шорсткості поверхонь гнучких елементів ПМ, пошкоджених Ф-К при випробуванні на стенді з амплітудою 5 мм і кількості циклів  $2 \times 10^7$

№	Матеріал поверхонь контакта	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм
1	сталь 12X18H9	1,63	6,25	7,19
2	100% парафін	0,71	3,81	5,16
3	5% Cu + 95% парафін	0,35	2,74	3,55
4	25% Cu + 75% парафін	0,33	2,41	3,47
5	5% Cu + 5% MoS <sub>2</sub> + 90% парафін	0,29	2,54	3,18
6	5% Cu + 25% MoS <sub>2</sub> + 70% парафін	0,28	2,49	3,12
7	5% Cu + 50% MoS <sub>2</sub> + 45% парафін	0,28	2,47	3,11
8	5% Cu + 75% MoS <sub>2</sub> + 20% парафін	0,27	2,47	3,12
9	25% Cu + 5% MoS <sub>2</sub> + 70% парафін	0,27	2,15	2,95
10	25% Cu + 25% MoS <sub>2</sub> + 50% парафін	0,26	2,13	2,93
11	25% Cu + 50% MoS <sub>2</sub> + 25% парафін	0,26	2,14	2,89
12	25% Cu + 75% MoS <sub>2</sub>	0,25	2,13	2,90

Аналіз результатів табл. 2 показав, що відповідно до запропонованої технології, при використанні МММ у вигляді парафіну з добавками з міді і дисульфиду молібдену знос приблизно на 20% менше, ніж в покриттях без дисульфиду молібдену. Найбільш раціональним процентним вмістом метало-плакуючої присадки як для міді, так і для дисульфиду молібдену є 5-25 вагових проценти, оскільки подальше збільшення процентного вмісту присадки не впливає на якість змащення.

Для механізованого способу нанесення МММ на гнучкі елементи пружних муфт була виготовлена спеціалізована установка для металоплакування (рис. 8), що включає підйомне кільце 1, ємність з парафіном 2, оправку з пакетом заготовок 3, мішалку 4, теплоносію (воду) 5, ТЕН 6, електродвигун 7, підставку 8. Заготовки гнучких елементів пружних муфт занурювали в розплав мастильного матеріалу, що знаходиться в ємності установки для металоплакування.

Установка працює наступним чином. У ємності 2 за рахунок нагрівання води ТЕНами 6 розігрівається парафін до температури 80-90 °С. Після цього включають електродвигун 7 мішалки 4, а в парафін додають розраховану кількість порошку з міді і дисульфиду молібдену. На наступному етапі формують пакет шляхом насадки заготовок гнучких елементів по одній на оправку. Сформований занурений пакет заготовок стискають на оправці, в результаті чого видаляється зайвий мастильний матеріал з простору між заготовками. Потім

оправку піднімають над ємністю для охолодження до кімнатної температури. При цьому залишки мастила стікають в ємність.

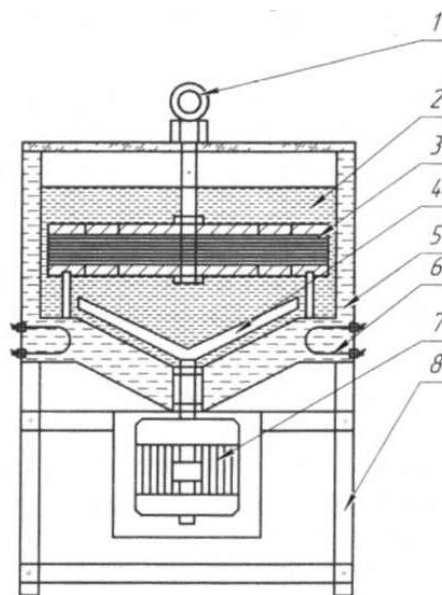


Рис. 8. Установка для металоплакування гнучких елементів ПМ.

#### Висновки:

1. Проведено аналіз найбільш ефективних методів зниження фретинг-корозії гнучких елементів пружних муфт. Встановлено, що найбільш ефективним механізмом фізико-хімічного впливу на поверхні гнучких елементів, з точки зору підвищення їх зносостійкості, є нанесення на них металоплакуючих мастильних матеріалів.

2. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що введення до складу металоплакуючого мастильного матеріалу, що складається з парафіну і міді, порошку дисульфиду молібдену, дозволяє, відповідно в 6,5 і 1,4 разів підвищити фретингостійкість гнучких елементів в порівнянні з гнучкими елементами без мастильного матеріалу і з металоплакуючим мастильним матеріалом, що складається з парафіну і міді.

### Список літератури:

1. John Crane. Power Transmission Couplings. TLK Membrane Coupling for High Power Applications in the Process Industry. [www.johncrane.co.uk](http://www.johncrane.co.uk). John Crane. Power Transmission Couplings. M Series Membrane Coupling for the Oil & Gas. [www.johncrane.co.uk](http://www.johncrane.co.uk).
2. Тарельник В.Б. Марцинковский В.С. Модернизация и ремонт роторных машин: Монография.- Сумы: Издательство „Казацкий вал” 2005.- 254 с.
3. Гулый А.Н. О возможности применения соединительных муфт ГОСТ 26455-97 в насосных агрегатах для взрывоопасных зон. Сборник материалов XI Международной научно-технической конференции ГЕРВИКОН 2005, Сумы, Украина.
4. Патент України на винахід № 92832, F16D 3/50, C10M 103/00. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт. / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Братушак М.П.; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
5. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания: Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1984.-с.199-204.
6. В. С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братушак, С.А. Горовой, Технология повышения долговечности гибких элементов упругих муфт // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – №2(12). – С.77-80.
7. В.В. Иванов, Ю.В. Марченко. Перспективы применения дисульфида молибдена для формирования вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий. Вестник ДГТУ, 2010. Т. 10. № 3(46)С. 381-385.
8. Папок К.К. Моторные и реактивные масла и жидкости. (См. [nglib.ru](http://nglib.ru)). Москва: Государственное Научно-Техническое Издательство Нефтяной и Горно-Топливной литературы, 1962. — 742 с.
9. Патент України на винахід №137273 F16D 3/70, C10M 103/00. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт / Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Гапонова О.П., Коноплянченко Е.В., Думанчук М.Ю., Тарельник Н.В. ; опубл. 10.1.201, Бюл. № 19.

**Martsynkovskiy V. S.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Tarelnik V. B.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Konoplianchenko Ie. V.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Dumanchuk M. Y.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Ryasnaya O. V.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)

#### **Improvement of the technology of forming metal-clad lubricants on flexible elements of elastic couplings**

*The work is devoted to the development of technological methods for increasing the reliability and durability of elastic couplings. It is known that the main reason for the loss of operation of the coupling is the wear of the flexible elements of the package due to fretting corrosion and subsequent fatigue failure. The study of the features of the fretting corrosion processes of flexible elements of elastic couplings is carried out. The analysis of existing methods for reducing fretting corrosion of machine parts is carried out, on the basis of which the existing problems are established and methods for solving them are proposed. It has been established that the most effective mechanism of physicochemical action on the surface of flexible elements, from the point of view of increasing their wear resistance, is the application of metal-clad lubricants on them.*

*As a result of the research, a new and more effective technology for the formation of a package of flexible elements of an elastic coupling has been developed. A feature of the proposed technology is the creation between the flexible elements of an intermediate metal-cladding layer based on paraffin with the addition of copper powder and molybdenum disulfide powder. Preparation of metal-cladding material consists in melting paraffin, introducing the required amount of molybdenum disulfide powder and thoroughly mixing. The application of material on flexible elements is carried out when assembling a package with flexible elements. The study of the effectiveness of the effect of metal-cladding material on the wear of the surfaces of flexible elements was carried out on a special bench simulating the real state of the package of flexible elements during the operation of the coupling. It was found that the most rational content of copper powder and molybdenum disulfide powder in the cladding material is in the range from 5 to 25 weight percent.*

*For the mechanized method of applying metal-clad lubricants to the flexible elements of an elastic coupling, a specialized installation was made. The installation provides the preparation of a solution of metal-cladding material and its application by immersion of flexible elements. Excess solution is squeezed out when the bag is compressed with standard fasteners.*

*The proposed technology allows to increase the fretting resistance of flexible elements by 6.5 times compared to untreated ones.*

**Key words:** elastic coupling, flexible element, fretting corrosion, steel 12X18H9, paraffin, copper, molybdenum disulfide, metal-clad lubricant.

Дата надходження до редакції: 15.11.2020

Хурсенко Світлана Миколаївна

кандидат фізико-математичних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID 0000-0001-6307-2042  
email: svitlana.khursenko@snau.edu.ua

У статті проведений аналіз рівняння руху тіла в неінерціальній системі відліку. Розглянуто інерціальні сили, які не зустрічаються в інерціальних системах відліку, їх прояв у повсякденному житті і використання в технічних механізмах. Показана суттєва роль, як негативна, так і позитивна, сил інерції в сучасній техніці, що характеризується великими швидкостями і прискореннями.

**Ключові слова:** інерціальні системи відліку, неінерціальні системи відліку, сили інерції, принцип еквівалентності Ейнштейна, принцип Даламбера.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.7>

**Постановка проблеми.** У сучасній техніці, яка характеризується великими швидкостями і прискореннями, неабияку роль відіграють сили інерції. Зазвичай, при русі з постійною швидкістю ми не помічаємо сил інерції, оскільки їх просто немає, а проявляють вони себе лише у тих випадках, коли відбувається рух із прискоренням. Існує багато прикладів, які можуть бути інтерпретовані як прояв сил інерції. Коли потяг набирає швидкість, пасажери у вагоні відчувають дію сили, спрямованої проти його руху. Це і є сила інерції. Сили інерції викликають перевантаження, що діють на пілота при великих прискореннях літака. Якщо у вагоні, який рухається з прискоренням, висить кулька маси  $m$ , то сила інерції відхиляє її в сторону, протилежну прискоренню і т.д.

**Аналіз публікації по темі дослідження.** Навколо поняття сил інерції часто виникають розбіжності, суперечки, різні трактування. Тема даного дослідження є актуальною і на сьогоднішній день в силу того, що ряд авторів визнають силу інерції, як реально існуючу [1-3], у той час як з іншого боку, не рідко доводиться зустріти твердження, що сили інерції не існують в дійсності, лише є штучне фіктивне поняття, яке вводиться заради формальної можливості і зручності запису рівнянь руху тіл в неінерціальних системах відліку [4-6]. Таким чином, виникає безліч питань. Фіктивні чи ні сили інерції? Якщо вони фіктивні, то наскільки правомірно говорити про дію сил інерції на тіла або їх прояв тощо.

**Мета даної роботи** полягає в більш детальному розгляді поняття сил інерції, їх фізичної інтерпретації і проявів у побуті та техніці.

**Виклад основного змісту дослідження.** У точних науках сила інерції зазвичай являє собою поняття, яке використовується в цілях зручності при розгляді руху матеріальних тіл в неінерціальній системі відліку (НІСВ) [7]. Наприклад, рух рухомих деталей автомобіля зручно описувати в системі координат, пов'язаних з автомобілем (у разі прискорення автомобіля ця система стає неінерціальною); рух тіла по коловій траєкторії іноді зручно описувати в системі координат, пов'язаній з цим тілом (така система координат неінерціальна через доцентрове прискорення) і т.д.

У НІСВ закони Ньютона не виконуються. Так, при прискоренні автомобіля, у пов'язаній з корпусом автомобіля системі координат незакріплені предмети всередині отримують прискорення за відсутності будь-якої прикладеної до них сили; а при русі тіла по орбіті, у пов'язаній з тілом неінерціальної системі координат тіло зберігає спокій, хоча на нього діє

нічим не збалансована сила гравітації, яка виступала в якості доцентрової в тій інерціальній системі координат, в якій спостерігалось обертання по орбіті. Для відновлення можливості застосування в цих випадках звичних формулювань законів Ньютона і пов'язаних з ними рівнянь руху, для кожного розглянутого тіла виявляється зручно ввести силу інерції, пропорційну масі цього тіла і величині прискорення системи координат, і протилежно спрямовану вектору цього прискорення.

Введення сил інерції дає можливість описувати рух тіл у будь-яких (як інерціальних, так і неінерціальних) системах відліку за допомогою одних і тих самих рівнянь руху. Повне виведення рівняння руху тіла маси  $m$  в неінерціальній системі відліку наведено, наприклад, у фундаментальній роботі [8], де воно отримане виходячи з принципу найменшої дії. Більш доступне виведення наведено у відомому курсі загальної фізики [3], у результаті якого рівняння руху тіла має вигляд:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial \vec{r}} - m\vec{a} + m[\vec{r}\vec{\omega}] + 2m[\vec{v}\vec{\omega}] + m[\vec{\omega}[\vec{r}\vec{\omega}]]. \quad (1)$$

У правій частині рівняння (1) представлені: «звичайна сила», виражена у вигляді градієнта потенційної енергії тіла, і чотири інерціальні сили, які не зустрічаються в інерціальних системах відліку (ІСВ):

– сила інерції ( $-m\vec{a}$ ) виникає завдяки прискоренню  $\vec{a}$  поступального руху розглянутої системи відліку відносно ІСВ;

– сила  $m[\vec{r}\vec{\omega}]$  обумовлена несталістю в часі кутової швидкості обертання  $\vec{\omega}$ ;

– сила Коріоліса, що дорівнює  $2m[\vec{v}\vec{\omega}]$ , на відміну від інших інерціальних сил залежить від швидкості тіла;

– відцентрова сила  $m[\vec{\omega}[\vec{r}\vec{\omega}]]$  лежить в площині, що проходить через радіус-вектор тіла  $\vec{r}$  і вектор кутової швидкості  $\vec{\omega}$ , і спрямована перпендикулярно до осі обертання (тобто до напрямку  $\vec{\omega}$ ) в сторону від осі.

**Сила інерції.** Розглянемо візок з укріпленим на ньому кронштейном, до якого підвішена на нитці кулька (рис. 1). Поки візок не рухається або рухається без прискорення, ни-

тка розташована вертикально і сила тяжіння  $\vec{P}$  врівноважується реакцією нитки  $\vec{F}_p$ . Якщо тепер привести візок у поступальний рух з прискоренням  $\vec{a}$ , нитка відхилиться від вертикалі на такий кут, щоб результуюча сил  $\vec{P}$  і  $\vec{F}_p$  надавала кульці прискорення, рівне  $\vec{a}$ . Відносно системи відліку, пов'язаної з візком, кулька знаходиться в стані спокою, не дивлячись на те, що результуюча сил  $\vec{P}$  і  $\vec{F}_p$  відмінна від нуля. Відсутність прискорення кульки відносно цієї системи відліку можна формально пояснити тим, що крім сил  $\vec{P}$  і  $\vec{F}_p$ , рівних в сумі  $m\vec{a}$ , на кульку діє також сила інерції  $\vec{F}_{in} = -m\vec{a}$ . Сила інерції при поступальному русі НІСВ має такі властивості: пропорційна прискоренню; пропорційна масі тіла; спрямована проти вектора прискорення. Таким чином, закон динаміки в НІСВ можна сформулювати наступним чином: в неінерціальних системах відліку добуток маси тіла на його прискорення дорівнює векторній сумі всіх реальних сил, що діють на тіло, і сили інерції.

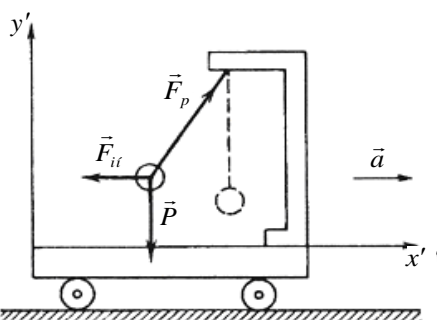


Рис. 1. Інерціальні та неінерціальні системи відліку [3]

Сили інерції в НІСВ, що рухаються прямолінійно, виявляються певною мірою аналогічними до сил тяжіння, оскільки обидві сили пропорційні масі тіл, а значення і напрям цих

сил не залежить від точки простору НІСВ, що рухаються поступально. Таким чином, поле сили інерції еквівалентне однорідному полю сили тяжіння. Це твердження є *принципом еквівалентності Ейнштейна*, що лежить в основі загальної теорії відносності Ейнштейна [3].

Таким чином, відповідаючи на питання про реальність сил інерції, можна прийти до висновку щодо їх фіктивності, оскільки сили інерції: 1) не характеризують якусь реальну взаємодію; 2) не підкоряються третьому закону Ньютона (для них немає протидіючих сил); 3) сили інерції завжди є зовнішніми (всередині системи немає тіла, яке виступало би матеріальним джерелом сил інерції). З іншого боку вони є реальними, оскільки викликають прискорення і можна передбачити результат фізичного дії цих сил, наприклад, переміщення тіл, зміну траєкторій їх руху (падіння вантажу з полиці при гальмуванні) тощо.

**Сила, обумовлена зміною частоти обертання НІСВ**, є дуже незначною, оскільки частота обертання Землі майже не змінюється. Як показано в роботі [9], збільшення земної доби приблизно на 1 с (внаслідок глобального танення льодів Арктики і Антарктики та підвищення рівня світового Океану протягом доби), призведе до того, що тіло масою 1 кг буде відчувати додаткову силу інерції, яка дорівнює 5 мН. Якщо ж подібне танення льодовиків відбудеться протягом року, то сила буде в 365 разів менше, тобто мізерно мала.

**Сила Коріоліса.** Прояв сили Коріоліса можна виявити на прикладі руху кульки по горизонтально розташованому абсолютно гладкому диску, який може обертатися навколо вертикальної осі. Якщо диск не обертається, то запущена зі швидкістю  $\vec{v}$  в напрямку від центру диска кулька скочуватиметься уздовж радіальної прямої  $OA$  (рис. 2а). Якщо ж диск привести в обертання в напрямку, наприклад, проти годинникової стрілки, то кулька котитиметься по штриховий лінії  $OB$ , причому її швидкість  $\vec{v}$  відносно диска буде змінювати свій напрям. Отже, відносно системи відліку, що обертається, кулька поводить себе так, якби на неї діяла сила  $\vec{F}_K$ , перпендикулярна швидкості  $\vec{v}$ . Сила  $\vec{F}_K$  і є коріолісова сила інерції.

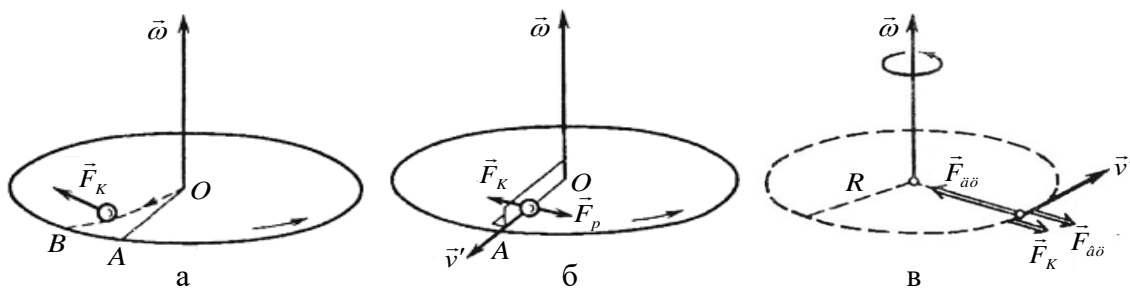


Рис. 2. Виникнення сили Коріоліса і визначення напрямку її дії [3]

Щоб змусити кульку котитися уздовж радіальної прямої по диску, що обертається, можна зробити направляючу, наприклад, уздовж ребра  $OA$  (рис. 2б). При коченні кульки направляюче ребро діє на нього з деякою силою  $\vec{F}_p$ . Відносно диска кулька буде рухатися з постійною за напрямом швидкістю  $\vec{v}'$ . Це можна формально пояснити тим, що сила  $\vec{F}_r$  врівноважується прикладеною до кульки коріолісовою силою інерції  $\vec{F}_K$ , перпендикулярною до швидкості кульки в системі диска. В окремому випадку, коли кулька рухається відносно

диска, що обертається, рівномірно по колу, яке лежить в площині, перпендикулярній до осі обертання, з центром, що знаходиться на цій осі, напрям сили Коріоліса представлено на рис. 2в.

Дією сили Коріоліса пояснюється ряд ефектів, що спостерігаються на поверхні Землі, наприклад, поворот площини коливань маятника Фуко відносно Землі, відхилення на схід від лінії виска вільно падаючих тіл, розмиття правого берега річок в північній півкулі і лівого в південній, неоднаковий знос рейок при двоколіїному русі тощо.



**Відцентрова сила інерції.** Для наочного уявлення цієї сили, яку зазвичай позначають як  $\vec{F}_{\text{вц}}$ , розглянемо диск, що обертається навколо перпендикулярної до нього вертикальної осі  $z'$  з кутовою швидкістю  $\vec{\omega}$  (рис. 3).

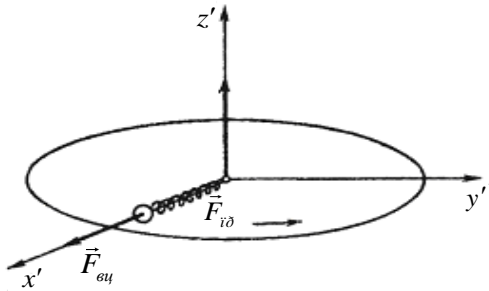


Рис. 3. Пояснення відцентрової сили інерції [3]

Разом з диском обертається надіта на спицю кулька, з'єднана з центром диска за допомогою пружини. Кулька займає на спиці таке положення, при якому сила натягу пружини  $\vec{F}_{\text{пр}}$  виявляється рівною добутку маси кульки на її нормальне прискорення  $\vec{a}_n = -\omega^2 \vec{R}$  (тут  $\vec{R}$  – радіус-вектор, проведений до кульки з центру диска,  $R$  – відстань кульки від центру диска):

$$\vec{F}_{\text{пр}} = -m\omega^2 \vec{R}. \quad (2)$$

Відносно системи відліку, пов'язаної з диском, кулька знаходиться в стані спокою. Це можна формально пояснити тим, що крім сили  $\vec{F}_{\text{пр}}$  на кульку діє відцентрова сила інерції:

$$\vec{F}_{\text{вц}} = m\omega^2 \vec{R}, \quad (3)$$

яка спрямована уздовж радіуса від центру диска. Ця сила діє на тіло в системі відліку, що обертається, незалежно від того, покоїться тіло в цій системі або рухається відносно неї.

Якщо тіло знаходиться в стані спокою відносно системи відліку, що рівномірно обертається, то сума всіх реальних сил і відцентрової сили інерції дорівнює нулю. Це твердження називають *принципом Даламбера*.

Відцентрова сила інерції не характеризує якоїсь реальної взаємодії, а обумовлена обертальним рухом системи відліку. Відцентрова сила інерції і сила тяжіння еквівалентні в обмеженій області простору, оскільки в загальному випадку відцентрова сила інерції зростає зі збільшенням відстані, а гравітаційна – спадає.

Дії відцентрової сили піддається, наприклад, пасажир під час руху автобуса на поворотах. Якщо у відцентровій машині підвісити на нитках кілька кульок і привести машину до швидкого обертання, то відцентрові сили інерції відхилять кульки від осі обертання. Кут відхилення тим більший, чим далі

кулька знаходиться від осі. Відцентрові сили використовуються у відцентрових сушарках для віджимання білизни, у сепараторах для відділення вершків від молока, у відцентрових насосах, відцентрових регуляторах тощо. Ці сили обов'язково треба враховувати при проектуванні деталей механізмів, які швидко обертаються [10, 11].

Сили інерції в машинах можуть відігравати як негативну, так і позитивну роль. Наприклад, при початку руху потягу з місця і при його прискореному русі під дією сил інерції створюються динамічні навантаження на зчепленні вагонів. Такі ж навантаження зазнають стрічки конвеєрів, приводні ланцюги, канати та інші елементи механічних пристроїв. Сили інерції діють також на транспортні машини при русі по закругленій ділянці шляху. Будучи спрямовані від центру кривизни шляху, вони створюють перекидаючий момент. Щоб нейтралізувати дію відцентрової сили, зовнішній рейок на заокругленій ділянці укладають з перевищенням над внутрішнім і відповідно перевищення встановлюють максимально допустиму швидкість проїзду на цій ділянці.

Вплив відцентрових сил враховують також при виборі допустимих швидкостей частин машин, які швидко обертаються (турбін, робочих коліс насосів і т.д.). За умовами міцності максимальна швидкість обмежується певною величиною, перевищення якої пов'язане з небезпекою розриву матеріалу під дією відцентрових сил.

Корисна дія сил інерції, особливо відцентрових, використовується в роботі багатьох машин. На такому принципі працюють відцентрові вентилятори, насоси, турбокомпресори, регулятори, сепаратори та інші механізми. Відцентрові сили дозволяють поліпшити якість виготовлення деяких видів продукції і спростити багато технологічних процесів. Як приклади можна назвати широко поширений спосіб відцентрового лиття, процеси виготовлення залізобетонних труб, арматури та інших виробів.

**Висновки.** Слід чітко розуміти, що сили інерції не можна ставити в один ряд з такими силами, як пружні, гравітаційні сили і сили тертя, тобто силами, зумовленими впливом на тіло з боку інших тіл. Сили інерції обумовлені властивостями тієї системи відліку, в якій розглядаються механічні явища. У цьому сенсі їх можна назвати фіктивними силами. Введення до розгляду сил інерції не є принципово необхідним, оскільки в принципі будь-який рух можна завжди розглянути по відношенню до інерціальної системи відліку. Однак на практиці часто являє інтерес саме рух тіл відносно неінерціальної системи відліку, наприклад, відносно земної поверхні. Використання сил інерції дає можливість вирішити відповідну задачу безпосередньо по відношенню до такої системи відліку, що часто виявляється значно простіше, ніж розгляд руху в інерціальній системі.

Насамкінець необхідно зауважити, що прояв сил інерції на Землі відіграє дуже важливу роль, як в побудові фізичної картини світу, так і в житті самих людей. Навіть із проведеного короткого аналізу стає ясно зрозуміло, що сили інерції не варто залишати без уваги, їх необхідно враховувати в різних сферах діяльності.

#### Список літератури:

1. Бутиков Е.Н. Кондратьев А.С. Физика: Кн.1. Механика. – М.: Физматлит, 2008. – 352 с.
2. Емельянов А.В. Новый взгляд на физическую природу динамических процессов во Вселенной. – М.: Дом Надежды, 2011. – 332 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики: Кн.1. Механика. – М.: Астрель, 2002. – 336 с.
4. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
5. Закинян Р.Г. О силах инерции / Р.Г. Закинян // Естественные науки. – 2006. – №3. – С. 89-96.
6. Блумфилд Л. Как все работает. Законы физики в нашей жизни. – М.: АСТ Corpus, 2016. – 704 с.
7. Вакуленко М., Вакуленко О. Фізичний тлумачний словник. – К.: Київський університет, 2008. – 767 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Том 1. Механика. – М.: Физматлит, 2004. – 223 с.
9. Сафиуллин Р.К. Движение и силы в неинерциальных системах отсчета. Влияние силы Кориолиса на климат Земли / Р.К. Сафиуллин // Известия КГАСУ. 2014. – №1. – С. 253-260.
10. Котов В. Физика внутри автобуса / В. Котов // Kvant. – 2006. – №1. – С. 27-28.
11. Балдаев Р., Раджендран В., Паланичами П. Мир физики и техники. – М.: Техносфера, 2006. – 579 с.

**Khursenko S.M.,** *Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

**Physics in technology: forces of inertia and their manifestation**

*The forces of inertia play a very important role in modern technology, which is characterized by high speeds and accelerations. Usually, when moving at a constant speed, we do not notice the forces of inertia, since they are absent, but they manifest themselves in those cases when there is movement with acceleration. The introduction of inertial forces makes it possible to describe the motion of bodies in any (both inertial and non-inertial) frames of reference using the same equations of motion, in which, in addition to the "ordinary force", inertial forces are also presented that do not occur in inertial frames. Inertial forces include: the force of inertia, which arises due to the acceleration of the translational motion of the considered frame of reference relative to inertial frames of reference; the force of inertia due to the variability of the angular velocity of rotation in time; Coriolis force and centrifugal inertia force. It should be noted that the forces of inertia cannot be placed on a par with such forces as elastic, gravitational and frictional forces, i.e. forces due to the impact on the body from other bodies. The forces of inertia are determined by the properties of the frame of reference in which mechanical phenomena are considered. In this sense, they can be called fictitious forces. The manifestation of inertial forces on Earth plays a crucial role, both in the construction of the physical picture of the world, and in the life of the inhabitants of our planet themselves. From the work done, it becomes clear that the forces of inertia should not be ignored, they must be taken into account in various fields of activity. The beneficial action of inertial forces, especially centrifugal forces, is used in the operation of many machines. Centrifugal fans, pumps, turbochargers, regulators, separators and other mechanisms work on this principle. Centrifugal forces improve the manufacturing quality of certain types of products and simplify many technological processes. Examples include the widespread method of centrifugal casting, processes for the manufacture of reinforced concrete pipes, fittings and other products.*

**Key words:** *inertial reference frames, non-inertial reference frames, inertial forces, Einstein's equivalence principle, d'Alembert principle.*

Дата надходження до редакції: 17.11.2020

## СПОСОБИ ЗНАХОДЖЕННЯ ЗАКОНУ ВІДНОСНОГО РУХУ ЧАСТИНКИ ВЗДОВЖ ПРЯМОЛІНІЙНОЇ ЛОПАТКИ НА ВІДЦЕНТРОВОМУ АПАРАТІ

**Пилипака Сергій Федорович**

доктор технічних наук, професор  
Національний університет біоресурсів і природокористування України  
ORCID: 0000-0002-1496-4615  
email: psf55@ukr.net

**Чепіжний Андрій Володимирович**

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-7540-8313  
email: snau170287@gmail.com

*Теорія складного руху матеріальної точки має чітку завершену форму і наведена в усіх підручниках із теоретичної механіки. Вона ґрунтується на тому, що рух точки вивчається одночасно по відношенню до двох систем координат. Одна із них (основна) приймається за нерухому, а друга здійснює по відношенню до нерухомої відносний рух по заданому закону. В свою чергу у рухомій системі координат здійснює відносний рух матеріальна точка. Сума цих рухів (відносного і переносного) складає абсолютний рух точки по відношенню до основної системи координат. Як переносний, так і відносний рухи задаються залежностями у функції часу.*

*Відомий також натуральний спосіб задання руху матеріальної точки, при якому швидкість і прискорення розглядаються в проєкціях на орти супровідного тригранника траєкторії (тригранника Френе). Однак в наявній літературі нам не вдалося знайти застосування тригранника Френе у якості рухомої системи координат, у якій здійснює відносний рух матеріальна точка. Розробці теорії складного руху матеріальної точки у горизонтальній площині із застосуванням тригранника Френе присвячена дана стаття.*

*В статті показано два способи знаходження закону відносного руху частинки вздовж прямолінійної лопатки на відцентровому апараті. Задачі розв'язуються з допомогою застосування двох координатних систем – рухомої і нерухомої. При цьому за рухому систему координат можна брати супровідний тригранник траєкторії переносного руху. В цьому випадку дуже просто знаходиться вектор абсолютного прискорення в проєкціях на орти тригранника із застосуванням формул Френе. Диференціальні рівняння руху теж складаються в проєкціях на орти цього тригранника на відміну від традиційних підходів. Розв'язано двома способами задачу на знаходження кінематичних параметрів відносного руху частинки вздовж прямолінійних радіально закріплених лопаток відцентрового апарата, яким є горизонтальний диск, що обертається навколо вертикальної осі.*

**Ключові слова:** вектор прискорення, прикладені сили, абсолютна траєкторія, диференціальні рівняння, тригранник і формули Френе, радіально закріплені лопатки, тертя, незалежна змінна, матеріальна частинка, горизонтальний диск, відцентровий апарат.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.8>

**Постановка проблеми.** Дослідження руху матеріальних частинок по горизонтальному диску із ортогонально прикріпленими прямолінійними лопатками при його обертанні навколо вертикальної осі є теоретичною основою при проєктуванні відцентрових апаратів для розсіювання мінеральних добрив. Рух частинки в таких апаратах є складним: він складається із переносного руху частинки при обертанні диска і відносного її руху вздовж лопатки. Внаслідок цього ускладнюється задача відшукування кінематичних параметрів частинки у такому русі.

**Аналіз останніх досліджень.** Рух частинки вздовж прямолінійних лопаток горизонтального диска, що обертається навколо вертикальної осі, досить повно досліджено в працях [1-3]. Теорія такого руху ґрунтується на тому, що рух точки досліджується одночасно по відношенню до двох систем координат. Одна з них (основна) приймається за нерухому, а друга здійснює по відношенню до нерухомої відносний рух за заданим законом. В свою чергу у рухомій системі координат здійснюється відносний рух частинки. Сума цих рухів (відносного і переносного) складає абсолютний рух частинки по відношенню до основної системи координат. В праці

[4] показано, що за рухому систему координат доцільно брати супровідний тригранник Френе траєкторії переносного руху.

**Формуванні цілі статті.** Порівняти способи розв'язання задачі на знаходження відносного переміщення частинки у складному її русі на прикладі відцентрового апарата без та із застосуванням тригранника і формул Френе.

**Результати дослідження.** Візьмемо дві плоскі системи координат, які в початковий момент збігаються: нерухому  $Ox_u$  і рухому  $Ox_r$ . Вважатимемо, що до рухомої системи прикріплена прямолінійна вертикальна лопатка, яка перетинає вісь  $Ox_r$  в точці  $A$  і нахилена до неї під кутом  $\alpha$  (рис. 1,а). При повороті рухомої системи на кут  $\varphi$  навколо спільного початку координат лопатка займе нове положення, при цьому її точка  $A$  опише дугу кола радіуса  $r_0$  (рис. 1,б). Якщо задати постійну кутову швидкість  $\omega$  обертання рухомої системи разом із лопаткою, то за час  $t$  вона повернеться на кут  $\varphi$ :  $\varphi = \omega t$ . За цей же час частинка  $B$  під дією відцентрової сили переміститься вздовж лопатки від свого початкового положення (рис. 1,а) в нове на деяку відстань  $u$  (рис. 1,б). Залежність переміщення частинки від часу  $u = u(t)$  у відносному русі є неві-

домою функцією, яку будемо розшукувати. Положення частинки у рухомій системі координат запишемо в проекціях на її осі через кут  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} x_p &= u \cos \alpha - r_0; \\ y_p &= u \sin \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

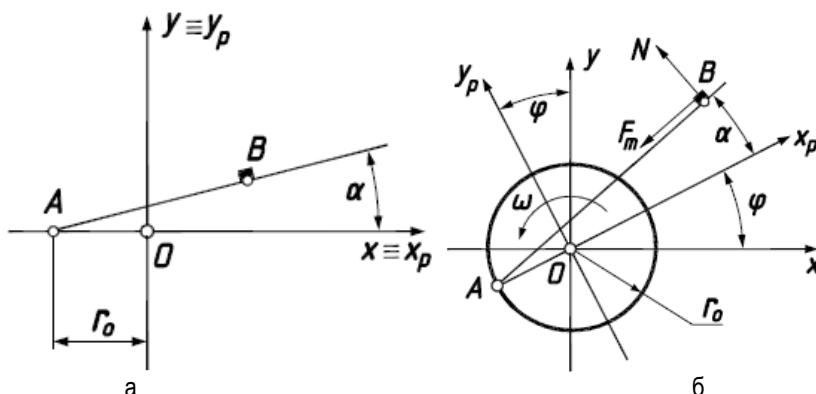


Рис. 1. Нерухома  $Oxy$  і рухома  $Oxpy$  системи координат із закріпленою прямолінійною лопаткою  $AB$  в рухомій системі: а) обидві системи збігаються на початку руху; б) рухома система повернута відносно нерухомої на кут  $\varphi = \omega t$ .

За час  $t$  рухома система разом із лопаткою повернеться по відношенню до нерухомої на кут  $\varphi = \omega t$ . За відомими формулами повороту можна записати:

$$\begin{aligned} x &= (u \cos \alpha - r_0) \cos \omega t - u \sin \alpha \sin \omega t; \\ y &= (u \cos \alpha - r_0) \sin \omega t + u \sin \alpha \cos \omega t. \end{aligned} \quad (2)$$

Зважаючи на те, що величина переміщення частинки вздовж лопатки  $u = u(t)$  є функцією часу  $t$ , параметричні рівняння (2) описують абсолютну траєкторію руху частинки в нерухомій системі координат.

Проекції абсолютної швидкості і абсолютного прискорення частинки на осі нерухомої системи координат знайдемо послідовним диференціюванням рівнянь (2) по часу  $t$ . Після диференціювання (2) і групування членів отримуємо проекції абсолютної швидкості:

$$\begin{aligned} x' &= u' \cos(\alpha + \omega t) - u \omega \sin(\alpha + \omega t) + r_0 \omega \sin \omega t; \\ y' &= u' \sin(\alpha + \omega t) + u \omega \cos(\alpha + \omega t) - r_0 \omega \cos \omega t. \end{aligned} \quad (3)$$

Після диференціювання виразів (3) і спрощень отримуємо проекції вектора абсолютного прискорення:

$$\begin{aligned} x'' &= u'' \cos(\alpha + \omega t) + \omega [r_0 \omega \cos \omega t - u \omega \cos(\alpha + \omega t) - 2u' \sin(\alpha + \omega t)]; \\ y'' &= u'' \sin(\alpha + \omega t) + \omega [r_0 \omega \sin \omega t - u \omega \sin(\alpha + \omega t) + 2u' \cos(\alpha + \omega t)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Диференціальні рівняння абсолютного руху частинки в проекціях на осі нерухомої системи координат запишемо у наступному вигляді:

$$mx'' = F_x; \quad my'' = F_y; \quad mz'' = F_z. \quad (5)$$

де  $m$  – маса частинки;  $x'', y'', z''$  – проекції вектора абсолютного прискорення (4);  $F_x, F_y, F_z$  – проекції рівнодійної прикладених до частинки сил на осі нерухомої системи координат.

Вздовж осі  $Oz$  переміщення відсутнє, отже  $z' = 0$ , а прикладеними силами є вага частинки  $mg$ , де  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , і реакція  $N_z$  горизонтального диска, тобто  $F_z = N_z - mg$ . Отже, із останнього рівняння (5) маємо:  $N_z = mg$ . В горизонтальній площині диска прикладеними до частинки в точці  $B$  силами є сила тертя  $F_m$ , спрямована в протилежну сторону ковзання

частинки вздовж лопатки (рис. 1,б) і сила реакції  $N$  зі сторони лопатки, спрямована перпендикулярно до неї. Сила тертя  $F_m$  включає в себе дві складові: сила тертя по горизонтальному диску  $fmg$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя частинки по диску і  $fN$  – сила тертя по лопатці. При цьому мається на увазі, що матеріал диска і лопатки однаковий, тобто коефіцієнт  $f$  для них є спільним. Таким чином, сила тертя запишеться:  $F_m = f(mg + N)$ . Тепер ми можемо записати проекції прикладених до частинки сил на осі рухомої системи координат через кут  $\alpha$  (рис. 1,б):

$$\begin{aligned} F_{x_p} &= -f(mg + N) \cos \alpha - N \sin \alpha; \\ F_{y_p} &= -f(mg + N) \sin \alpha + N \cos \alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки ми складаємо диференціальні рівняння в проекціях на осі нерухомої системи координат, то проекції сил (6) теж потрібно повернути на кут  $\varphi = \omega t$  разом із рухомою системою:

$$\begin{aligned} F_x &= -[f(mg + N) \cos \alpha + N \sin \alpha] \cdot \cos \omega t + [f(mg + N) \sin \alpha - N \cos \alpha] \cdot \sin \omega t; \\ F_y &= -[f(mg + N) \sin \alpha - N \cos \alpha] \cdot \cos \omega t - [f(mg + N) \cos \alpha + N \sin \alpha] \cdot \sin \omega t. \end{aligned} \quad (7)$$

Підставимо вирази прискорень (4) і вирази прикладених сил (7) в перші два рівняння (5) і отримаємо систему двох диференціальних рівнянь із двома невідомими залежностями  $u = u(t)$  і  $R = R(t)$ . Розв'яжемо її відносно  $u'$  і  $N$  і отримаємо:

$$\begin{aligned} u'' &= u \omega^2 - f(2u' \omega + g) + r_0 \omega^2 (f \sin \alpha - \cos \alpha); \\ N &= m \omega (2u' - r_0 \omega \sin \alpha). \end{aligned} \quad (8)$$

Проаналізувавши (8), ми бачимо, що перше рівняння є незалежним. Його можна розв'язати і отримати залежність  $u = u(t)$ . Нижче наводимо спрощений розв'язок при  $\alpha = 0$ , тобто для радіально установленної лопатки:

$$u = \frac{fg}{\omega^2} + r_0 + c_1 e^{(-f - \sqrt{1+f^2})\omega t} + c_2 e^{(-f + \sqrt{1+f^2})\omega t}, \quad (9)$$

де  $c_1, c_2$  – постійні інтегрування.

Диференціювання залежності (9) дасть вираз швидкості ковзання частинки вздовж прямолінійної лопатки, а його підстановка у (8) дасть залежність сили тиску  $N$ .

Рівняння (9) точно збігається із аналогічним рівнянням в праці [2] (рівняння (7.1.8), (7.1.9), стор. 366), хоча одержані вони при зовсім різних підходах. В праці [2] визначався напрям прискорення Кориоліса за правилом Жуковського, яке в нас теж присутнє в проєкціях на осі координат.

Тепер розглянемо розв'язання цієї самої задачі із використанням тригранника Френе. При обертанні рухомої системи початкова точка  $A$ , з якої починається рух по лопатці, в

попередньому прикладі описувала коло радіуса  $r_0$  (рис. 1,б). Прийmemo це коло за напрямну криву для супровідного тригранника Френе. Його орт  $\bar{\tau}$  завжди спрямований по дотичній до кривої (в нашому випадку до кола), а орт  $\bar{n}$  – по головній нормалі в сторону центра кривини, орт  $\bar{b}$  – бінормаль – проєкціюється в точку, яка збігається із точкою  $A$  в його вершині (рис. 2,б). Тригранник Френе замінить рухому систему у попередній задачі. Закріпимо в його системі жорстко прямолінійну лопатку під кутом  $\alpha$ , вздовж якої буде рухатися частинка, яка знаходиться в точці  $B$  (рис. 2,б). При русі тригранника вздовж дуги кола із постійною швидкістю  $V_A = \omega r_0$  частинка буде знаходитися в таких же умовах, як і в попередній задачі.

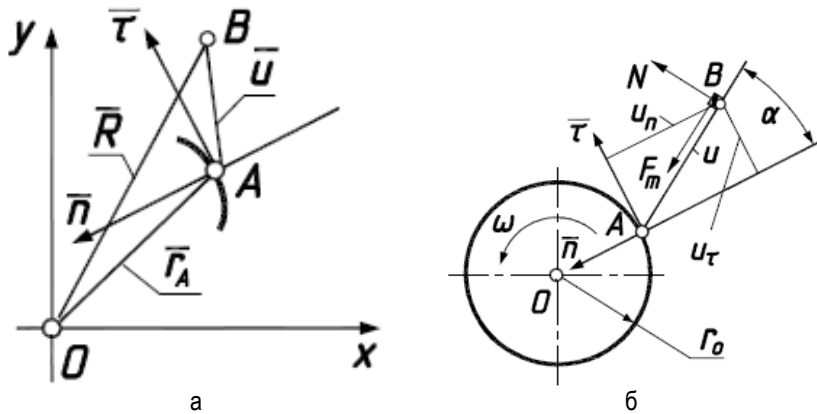


Рис. 2. Нерухома  $Oxy$  і рухома  $A\bar{\tau}\bar{n}$  системи координат із закріпленою прямолінійною лопаткою  $AB$  в рухомій системі: а) до описання положення точки  $B$  у двох системах; б) положення частинки у рухомій системі (триграннику Френе) та прикладені до неї сили.

Положення точки  $A$  в нерухомій системі можна записати у векторному вигляді (рис. 2,а,б):

$$\bar{R} = \bar{r}_A + \bar{u} = \bar{r}_A + \tau \bar{u}_\tau + n \bar{u}_n = \bar{r}_A + \tau u \cos \alpha + n u \sin \alpha \quad (10)$$

При застосуванні тригранника і формул Френе необхідно перейти від незалежної змінної часу  $t$  до натурального параметра напрямної кривої – її довжини дуги  $s$  [4]. Знайдемо абсолютну швидкість точки  $B$  диференціюванням виразу (10) з переходом від змінної  $t$  до дуги  $s$ , маючи на увазі, що  $u$  – змінна величина:

$$\frac{d\bar{R}}{dt} = \frac{d\bar{R}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{d\bar{R}}{ds} V_A = V_A \left[ \frac{d\bar{r}_A}{ds} + \left( \frac{d\bar{\tau}}{ds} u + \bar{\tau} \frac{du}{ds} \right) + \left( \frac{d\bar{n}}{ds} u + \bar{n} \frac{du}{ds} \right) \sin \alpha \right] \quad (11)$$

У виразі (11) похідні  $\frac{d\bar{r}_A}{ds}$ ;  $\frac{d\bar{\tau}}{ds}$ ;  $\frac{d\bar{n}}{ds}$  мають кінематичну інтерпретацію [4]. Ці похідні розписуються в проєкціях на орти тригранника через кривину  $k$  і скрут  $\sigma$  напрямної кривої. Це основні формули диференціальної геометрії, у яких незалежною змінною служить дугова координата  $s$  (наводимо спрощений варіант для плоскої кривої, у якій відсутній скрут

σ):

$$\bar{r}'_A = \bar{\tau}; \quad \bar{\tau}' = k\bar{n}; \quad \bar{n}' = -k\bar{\tau}. \quad (12)$$

де  $k$  – кривина кривої, яка задається натуральним рівнянням  $k = k(s)$ .

В роботі [4] теоретично доведено, що підстановкою (12) в (11) з наступним групуванням отриманих виразів по напрямках ортів ми отримуємо вираз абсолютної швидкості  $V_B$  точки  $B$  в проєкціях на орти тригранника. Підставляємо, групуємо і отримуємо:

$$V_B = \bar{R}' = V_A \times \left[ \bar{\tau} (1 + u' \cos \alpha - uk \sin \alpha) + \bar{n} (u' \sin \alpha + uk \cos \alpha) \right] \quad (13)$$

Щоб отримати вектор абсолютного прискорення точки  $B$ , необхідно вираз (13) ще раз продиференціювати по змінній  $s$  із застосуванням формул Френе, маючи на увазі, що  $u = u(s)$  і  $k = const$ , отриманий результат згрупувати за напрямками ортів і помножити на швидкість  $V_A$  руху тригранника [4]. Нижче наводимо готовий результат:

$$\vec{R}'' = V_A^2 \left[ \vec{\tau} (u'' \cos \alpha - 2u'k \sin \alpha - uk^2 \cos \alpha) + \vec{n} (u'' \sin \alpha + 2u'k \cos \alpha - uk^2 \sin \alpha + k) \right] \quad (14)$$

Оскільки вектор абсолютного прискорення (14) заданий виразами в проекціях на орти супровідного тригранника Френе, то і систему диференціальних рівнянь ми будемо складати в проекціях на орти цього ж тригранника на відміну від першого випадку, коли ми використовували нерухому систему координат.

Запишемо проекції прикладених до частинки сил на орти тригранника Френе через кут  $\alpha$  (рис. 2,б):

$$\begin{aligned} F_\tau &= -f(mg + N) \cos \alpha - N \sin \alpha; \\ F_n &= -f(mg + N) \sin \alpha + N \cos \alpha. \end{aligned} \quad (15)$$

Аналогічно, як у першому випадку, складаємо систему диференціальних рівнянь за формулами (5), але вже на рухому систему тригранника Френе:

$$\begin{aligned} mV_A^2 (u'' \cos \alpha - 2u'k \sin \alpha - uk^2 \cos \alpha) &= -f(mg + N) \cos \alpha - N \sin \alpha; \\ mV_A^2 (u'' \sin \alpha + 2u'k \cos \alpha - uk^2 \sin \alpha + k) &= -f(mg + N) \sin \alpha + N \cos \alpha. \end{aligned} \quad (16)$$

Швидкість руху тригранника  $V_A = \omega r_0 = \omega/k$ . Підставимо цей вираз у (16) і розв'яжемо систему (16) відносно  $u''$  і  $N$  і отримаємо:

$$u'' = uk^2 - f \left( 2ku' + \frac{gk^2}{\omega^2} \right) - k(f \cos \alpha + \sin \alpha); \quad (17)$$

$$N = \frac{m\omega^2}{k} (2u' + \cos \alpha).$$

В системі (17) перше рівняння є незалежним, отже його можна розв'язувати окремо. Розглянемо спрощений варіант при  $\alpha = 90^\circ$ , тобто для радіально установленної лопатки:

$$u'' = uk^2 - f \left( 2ku' + \frac{gk^2}{\omega^2} \right) - k \sin \alpha. \quad (18)$$

Диференціальне рівняння (18) має наступний розв'язок:

$$u = \frac{fg}{\omega^2} + \frac{1}{k} + c_1 e^{(-f - \sqrt{1+f^2})ks} + c_2 e^{(-f + \sqrt{1+f^2})ks} \quad (19)$$

Перейдемо у (19) від незалежної змінної  $s$  до часу  $t$ . Враховуючи постійну кутову швидкість  $\omega$  обертання диска можна записати  $s = r_0 \omega t = \omega t/k$ . Звідси  $ks = \omega t$ . Підставивши

цей вираз у (19), а також вираз  $1/k = r_0$ , ми отримаємо точно таке ж рівняння, як і (9). Отже абсолютно різні підходи в розв'язанні поставленої задачі дають однаковий результат.

**Висновки.** При розв'язуванні задачі на динаміку частинки у складному русі за рухому систему координат можна брати супровідний тригранник траєкторії переносного руху. В цьому випадку дуже просто знаходиться вектор абсолютного прискорення в проекціях на орти тригранника із застосуванням формул Френе. Диференціальні рівняння руху теж складаються в проекціях на орти цього тригранника на відміну від традиційних підходів. Особливістю є те, що за незалежну змінну потрібно брати довжину дуги  $s$  траєкторії переносного руху тригранника. В статті двома способами розв'язано задачу на знаходження кінематичних параметрів відносного руху частинки вздовж прямолінійних радіально закріплених лопаток відцентрового апарата, яким є горизонтальний диск, що обертається навколо вертикальної осі. Диференціальні рівняння і їх розв'язки є різними, оскільки в одному випадку за незалежну змінну взято час  $t$  (традиційний підхід), у другому – довжину дуги  $s$  (запропонований підхід), однак теоретично показано, що при переході від змінної довжини дуги  $s$  до змінної часу  $t$  результати повністю збігаються.

#### Список літератури:

1. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. -К.: УАСХН, 1960. - 283 с.
2. Заика П.М. Избранные задачи земледельческой механики. -К.: Изд-во УСХА, 1992. -507 с.
3. Адамчук В.В. Теоретичне дослідження розгону мінеральних добрив розсіювальним органом. Механізація і енергетика сільського господарства. IV міжнародна науково-технічна конференція «Motrol 2003». –Том 6. –К.: НАУ, 2003. –С. 19-31.
4. Пилипака С.Ф. Дослідження руху матеріальної частинки по горизонтальному диску, який обертається навколо вертикальної осі, за допомогою рухомого натурального тригранника і формул Френе. Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. – Глеваха, 2005. – Вип. 89. – С. 49-60.

**Chepyzhnyy A. V.**, Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Pylypaka S. F.**, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine)

#### **Relative motion of the corpuscule along the rectilinear vane on the centrifugal means**

The theory of complex motion of a point is a clear and complete form given in all textbooks on theoretical mechanics. It is based on the fact that the movement point studied simultaneously with respect to two coordinate systems. One of them (main) taken as fixed, and the other carries against the immovable relative movement of a given law. In turn, in the moving frame carries the relative motion of a point. The sum of these movements (relative and portable) is the absolute motion of a point in relation to the basic coordinate system. As portable and relative movements dependencies defined as a function of time.

There is also a natural way to setting motion of a point at which the speed and acceleration seen in projections to cover orly three-edge trajectory (Frenet formulas). However, the available literature, we could not be used Frenet formulas as moving coordinate system, which provides the relative motion of a point. The development of the theory of complex motion of a point in the horizontal plane using Frenet formulas devoted to this article.

*The article shows two ways of law relative motion of particles along a rectilinear blade for a centrifugal machine. Problems are solved with the help of the two coordinate systems - movable and immovable. At the same time moving coordinate system can take cover three-edge trajectory portable motion. In this case it is very simple absolute acceleration vector projections on orty three-edge using formulas Freinet. Differential equations of motion also consist of projections on orty three-edge unlike traditional approaches. In article two ways to solve the problem of kinematics parameters relative motion of the particles along straight radial fixed blades centrifugal device, which is a horizontal disc rotating around a vertical axis.*

**Key words:** *acceleration vector, applied forces, absolute trajectory, differential equations, trihedron and Frenet formulas, radially fixed blades, friction, independent variable, material particle, horizontal disk, centrifugal apparatus.*

Дата надходження до редакції: 17.11.2020 р.

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ СУШЕНОГО ТОПІНАМБУРА

**Сабадаш Сергій Михайлович**кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-0371-8208  
E-mail: s.v.sabadash@ukr.net**Казаков Дмитро Дмитрович**старший викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-1750-8578  
E-mail: sms.kazak.dd@ukr.net**Колодненко Віталій Миколайович**старший викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-8450-6759  
E-mail: kolodnenko\_vn@ukr.net**Бало Павло Миколайович**старший викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0001-7042-8772  
E-mail: Pavelbalo@ukr.net

*Порошкоподібні матеріали застосовуються в багатьох галузях промисловості. Багато властивостей порошків в значній мірі залежать від дисперсності. Аналіз дисперсного складу є обов'язковим методом контролю у всіх технологічних процесах, пов'язаних з виготовленням і переробкою порошкоподібних матеріалів.*

**Ключові слова:** сушіння, топінамбур, порошок, аналіз, переробка, порошкоподібні матеріали, барда, мікроскоп.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.9>

**Постановка проблеми.** В даний час існує декілька методів визначення дисперсного складу [1, 2]: ситовий аналіз, седиментаційний аналіз, гідродинамічні методи, мікроскопічний аналіз. У цьому ряду мікроскопічний метод вигідно відрізняється тим, що дозволяє визначити не тільки геометричні розміри досліджуваних об'єктів, а й побачити особливості їх форми, структури і будови поверхні.

Мікроскопічний метод [2] дозволяє вимірювати частинки розміром 0,3-100 мкм. Для визначення розміру часток менше 1 мкм застосовують електронні мікроскопи з більш високою роздільною здатністю, ніж оптичні.

Для раціонального використання методів транспортування і зберігання топінамбура, було досліджено методом мікроскопічного визначення дисперсний склад продукту.

**Виклад основного матеріалу.** Досліджено кілька модельних зразків порошків із топінамбура. Досліджувані порошки різної дисперсності досліджували за допомогою USB цифровий мікроскоп. Знявши мікроскопічну лінійку отримали ціну поділки мікрофотографій.

Для кожного зразка знімалися не менше 6 полів з різних ділянок зору. За допомогою програми обробки цифрових фотографій PhotoM 1,21 визначали лінійні розміри частинок.

Процентне співвідношення часток різного розміру визначали за формулою (1):

$$Q_i := \frac{N_i}{\sum_i N} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $N_i$  - число часток в даній фракції;  $\sum N$  - сумарне число часток.

Відповідно до цієї формули ділимо кількість частинок певного розміру на загальну кількість частинок і множимо на 100% [3].

За формулою:

$$\sum Q = Q_0 + Q_1 + \dots + Q_n \quad (2)$$

Спираючись на рівняння 1 та 2 будемо інтегральні функції розподілу, які представлені на рис. 1.

Розпочинаємо побудову з найдрібніших частинок, відкладаючи їх процентний вміст ( $Q_0$ ) на ординаті; потім для частинки наступної фракції, відклали ординату, рівну сумі процентного вмісту часток попередньої фракції і фракції з великим радіусом і так далі, працювали доти, поки остання ордината (відповідна максимальному діаметру) не склала 100%.



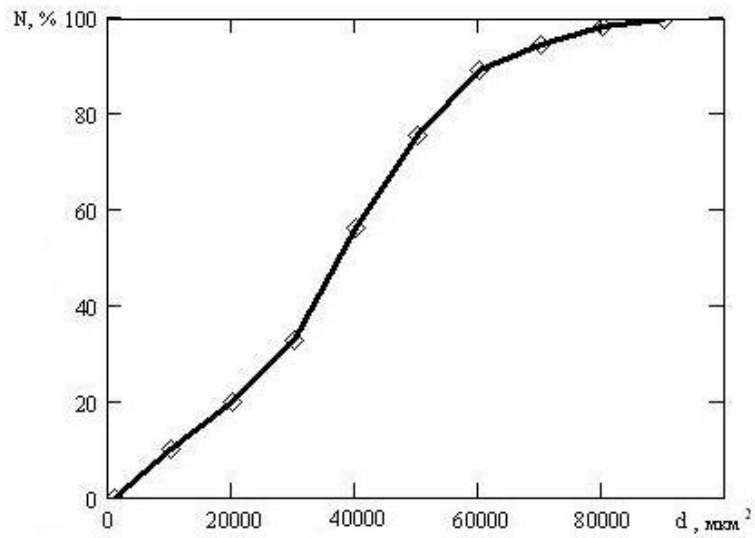


Рис. 1. Інтегральна функція розподілу для зволоженого порошку із топінамбура

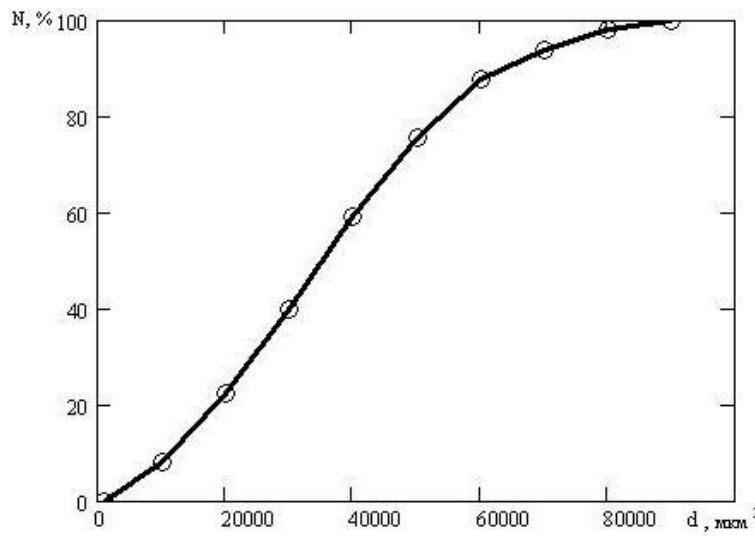


Рис. 2. Інтегральна функція розподілу для сухого порошку із топінамбура

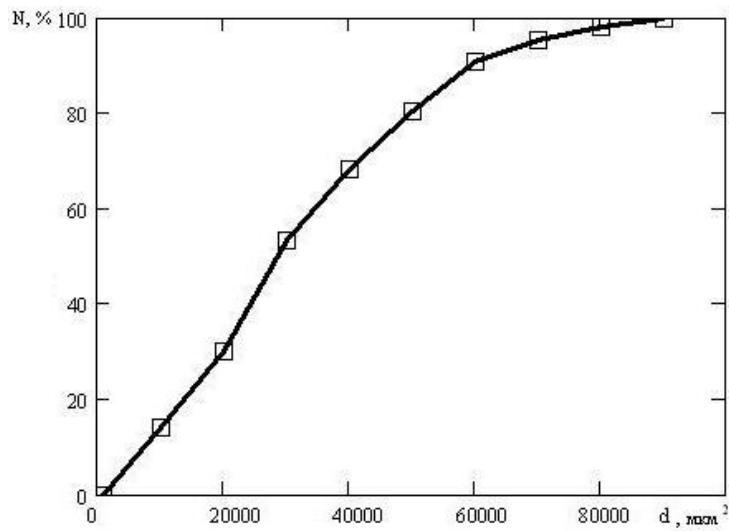


Рис. 3. Інтегральна функція розподілу для відновленого топінамбура

Далі за допомогою наступних операцій, в середовищі програми Mathcad:

$$\begin{aligned}
 d &:= \text{data}^{(0)} \\
 Y_1 &:= \frac{\quad}{\ln(z)} \rightarrow \\
 X_{1,i,0} &:= 1 \\
 X_1 &:= \frac{\quad}{\ln(d)} \rightarrow \\
 X_2 &:= d \\
 a_0 &:= (X_1^T \cdot X_1)^{-1} \cdot X_1^T Y_1 \\
 a_1 &:= \text{genfit}(d, z, a_0, F)
 \end{aligned}
 \quad F(x, a) := \begin{cases} a_1 \cdot x \cdot e^{a_0 + a_2 x} \\ a_1 \cdot x \cdot e^{a_0 + a_2 x} \\ x \cdot e^{a_0 + a_2 x} \\ a_1 \cdot x^3 \cdot e^{a_0 + a_2 x} \end{cases}$$

Побудуємо диференціальні функції розподілу  
 Для апроксимації використовувалися функції виду  
 $a_0 \cdot x^{a_1} \cdot e^{a_2 \cdot x}$  для зволоженого топінамбуру;  
 $a_0 \cdot x \cdot e^{a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2}$  для сухого топінамбуру;  
 $a_1 \cdot x \cdot e^{a_0 \cdot a_2 \cdot x^2}$  відновленого топінамбуру. Як бачимо вони повністю і в точній мірі описують експериментальні дані і припадають на експериментальний максимум, що дає можливість визначити найбільш ймовірний розмір часток для даного зразка [4]. Інтегральна функції розподілу для трьох модельних продуктів різної дисперсності показані на рис. 7.  
 Для визначення середнього розміру продукту (барда: віджата, суха, відновлена) із сировини наводимо на одній системі координат всі диференціальні функції розподілу рис 8.

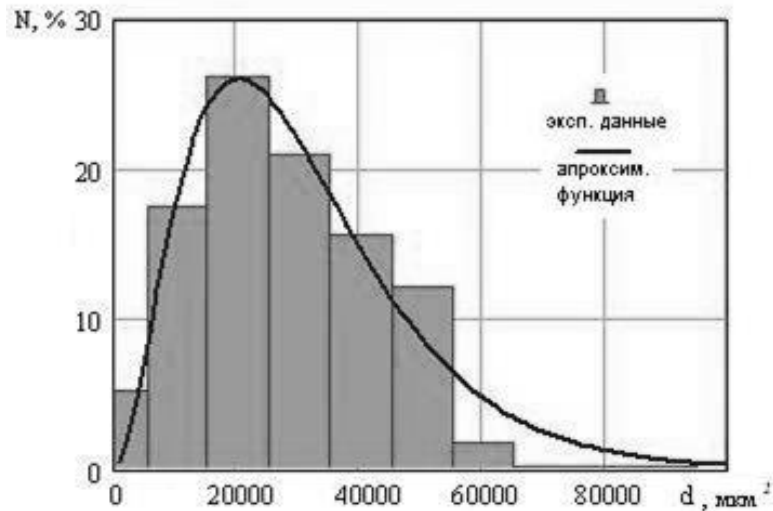


Рис. 4. Диференціальна функція розподілу, на фоні експериментальної дискретної гістограми, яка вказує на кількість частинок різних розмірів (топінамбур зволожений).

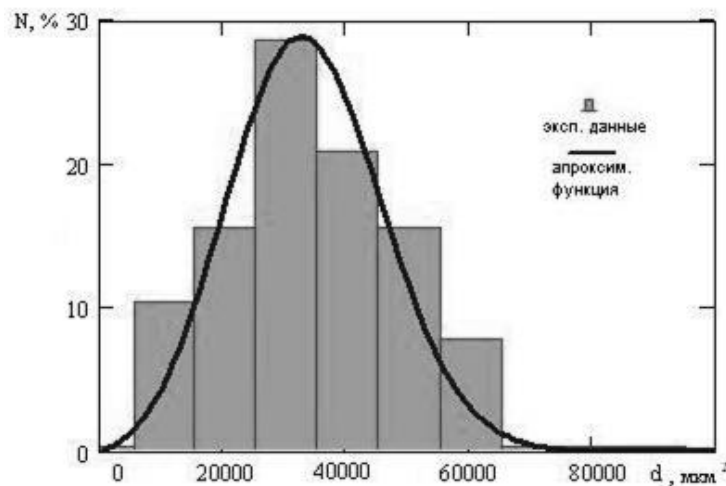


Рис. 5. Диференціальна функція розподілу, на фоні експериментальної дискретної гістограми, яка вказує на кількість частинок різних розмірів (топінамбур сухий)

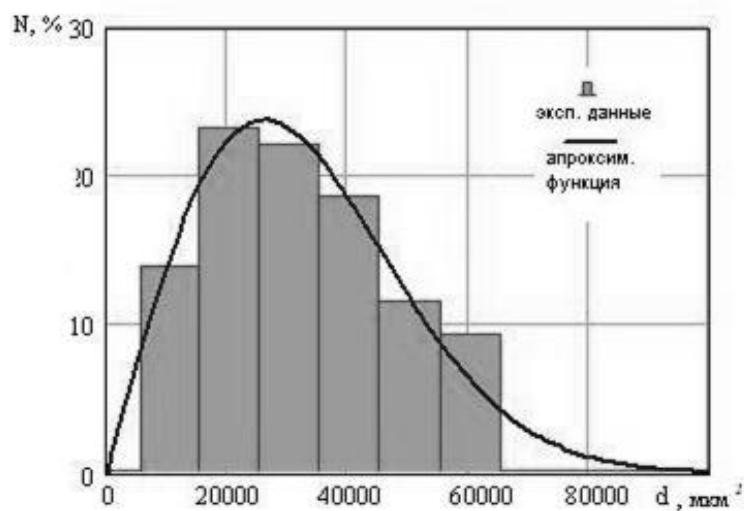


Рис. 6. Диференціальна функція розподілу, на фоні експериментальної дискретної гістограми, яка вказує на кількість частинок різних розмірів (топінамбур відновлений).

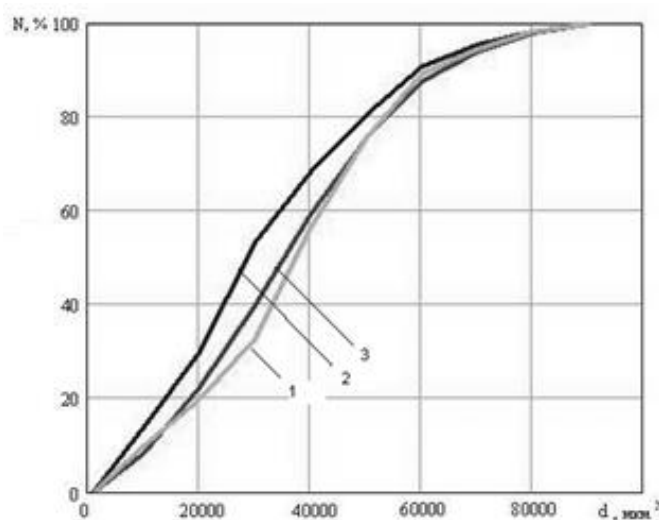


Рис. 7. Інтегральні функції розподілу для трьох модельних продуктів різної дисперсності: 1 - крива для зволоженого топінамбура; 2 - крива для сухого топінамбура; 3 - крива для відновленого топінамбура.

Отримані результати по визначенню розмірів частинок топінамбура методом мікроскопіювання. Для знаходження оптимальних умов транспортування і подальшого зберігання була досліджена дисперсність порошоків із топінамбура шляхом підбору найбільш оптимального варіанту апроксимуючої функції порошоків різної дисперсності. Здійснено математичну обробку отриманих результатів з використанням сучасних комп'ютерних програм.

Розрахунок діаметра частинок сушеного топінамбура табл. 1

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку

№	Найменування	Площа поверхні частинок
1	Топінамбур зволожений	20000 мкм <sup>2</sup>
2	Топінамбур сухий	37000 мкм <sup>2</sup>
3	Топінамбур відновлений	24000 мкм <sup>2</sup>

Знайдемо діаметри цих частинок, щоб оперувати ними як визначальним розміром. У першому наближенні частинки в полідисперсній системі мають сферичну форму, тоді площа сфери:

$$S = 4\pi R^2, \quad (3)$$

де R – радіус сфери;  
S – площа поверхні.

На рисунку 9 представлені середні розміри частинок для трьох модельних продуктів різної дисперсності.

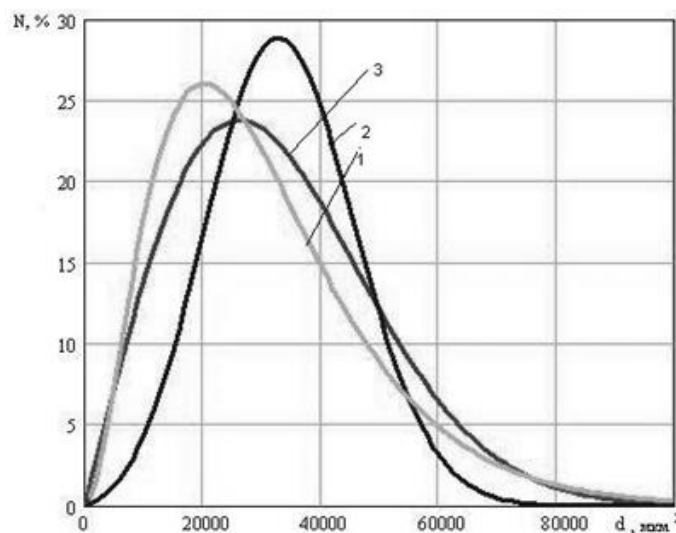


Рис. 8. Диференціальні функції розподілу для трьох модельних продуктів різної дисперсності: 1 - крива для зволоженого топінамбура; 2 - крива для сухого топінамбура; 3 - крива для відновленого топінамбура.

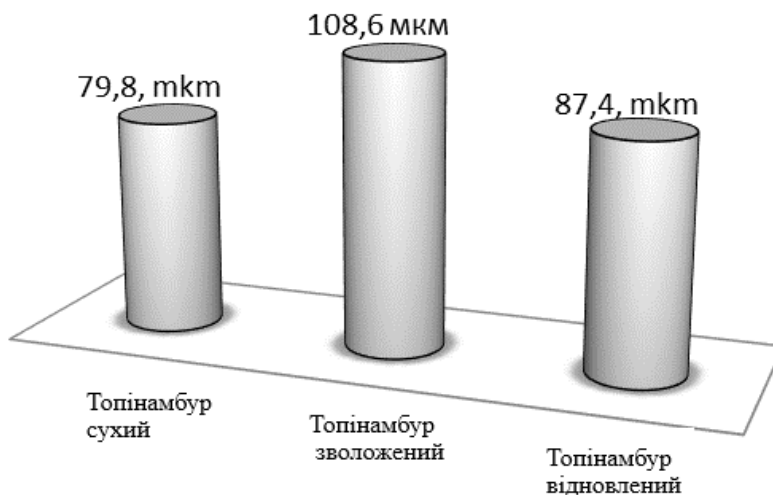


Рис. 9. Середні розміри частинок для трьох модельних продуктів різної дисперсності

**Висновок.** Як видно з рис. 9, дана диференціальна функція розподілу частинок для дослідного продукту для трьох модельних продуктів різної дисперсності, досить точно описує експериментальні дані, видно що після сушіння криві розподілу мають виражений максимум і меншу ширину, так як частинки по розмірам більш однорідні. В той час як вологий топінамбур і відновлена характеризується зміщенням максимуму в ліво, і стає ширше. Очевидно це пов'язано з тим, що

більш крупні частинки при зволоженні в більшій мірі із за часткового набухання збільшують свій розмір що і відражає певна асиметрія самих кривих. Відповідно, при сушінні необхідно враховувати даний факт, який буде відображатися і на режимі утворення псевдозрідження і на масообміні, так як краще частинки (висока дисперсність) легко віддають вологу. Крім того слідче на очікування зміни адгезійних і когезійних властивостей топінамбуру.

#### Список літератури:

1. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов [Текст] / П. А. Коузов.— Л. : Химия, 1987. – 264 с.
2. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур. [Текст] / П. А. Ребиндер.— М. : Наука, 1966.
3. Кирьянов, Д. В. Вычислительная физика [Текст] / Д. В. Кирьянов, Е. Н. Кирьянова.— М. : Полибук Мультимедиа, 2006.
4. Максфилд, Б. Mathcad в инженерных расчетах [Текст] / Б. Максфилд. – М. : КОРОНА-Век : МК-Пресс, 2010.

**Sabadash S.M.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)  
**Kazakov D.D.,** Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Kolodnenko V.M.**, Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Balo P.M.**, Sumy National Agrarian University (Ukraine)

**Determination of the dispersed composition of dried topinambur**

*Powdered materials are used in many industries. Many properties of powders largely depend on the dispersion. Analysis of the dispersed composition is a mandatory method of control in all technological processes associated with the manufacture and processing of powdered materials.*

**Key words:** *drying, Jerusalem artichoke, powder, analysis, processing, powdered materials, bard, microscope.*

Дата надходження до редакції: 19.11.2020 р.