

ISSN 2414-3820

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**КОНСТРУЮВАННЯ, ВИРОБНИЦТВО
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
МАШИН**

Загальнодержавний міжвідомчий
науково-технічний збірник

Випуск 51

Кропивницький • 2021

ISSN 2414-3820

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Central Ukrainian National Technical University

**DESIGN, PRODUCTION
AND EXPLOITATION
OF AGRICULTURAL MACHINES**

National Interagency Scientific
and Technical Collection of Works

Issue 51

Kropyvnytskyi • 2021

Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2021. Вип. 51. 246 с.

В збірнику викладені питання конструювання, розрахунку, удосконалення, створення і дослідження нових робочих органів сільськогосподарських машин, засобів механізації, електрифікації та автоматизації сільськогосподарського виробництва. Наведені результати досліджень в галузі технологій виробництва і експлуатації машин та забезпечення їх надійності і довговічності. Викладені практичні рекомендації по використанню результатів досліджень і дослідно-конструкторських розробок в сільськогосподарській і інших галузях машинобудування. Збірник розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників науково-дослідних установ, ВНЗ, конструкторських організацій та промислових підприємств.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 29 листопада 2021 року № 4.

Редакційна колегія:

Черновол М.І., д.т.н., проф. – головний редактор;
Сало В.М., д.т.н., проф. – заст. головного редактора;
Лещенко С.М., к.т.н., доц. – відповідальний секретар;
Аулін В.В., д.т.н., проф.;
Васильковська К.В., к.т.н., доц.;
Васильковський О.М., к.т.н., проф.
Дідух В.Ф., д.т.н., проф.;
Караєв О.Г., д.т.н., ст. наук. співр.;
Кірчук Р.В., к.т.н., проф.;
Коваленко О.В., д.т.н., доц.;
Кропівний В.М., к.т.н., проф.;
Мацуї А.М., к.т.н., доц.;
Мелешко Є.В., д.т.н., проф.;
Мороз М.М., д.т.н., проф.;

Носуленко В.І., д.т.н., проф.;
Осадчий С.І., д.т.н., проф.;
Павленко І.І., д.т.н., проф.;
Петренко Д.І., к.т.н., доц.;
Сайчук О.В., д.т.н., проф.;
Свірень М.О., д.т.н., проф.;
Степаненко С.В., д.т.н., с.н.с.;
Харченко С.О., д.т.н., доц.;
Anas M. Al-Oraiqat, D.Sc. (Королівство Саудівська Аравія);
Iurie Melnic, Ph.D., Associate Professor (Молдова);
Juozas Padgurskas, Dr., Professor;
Pošta Jozef, Ph.D., Professor (Чехія);
Predrag Dašić, Hon.D.Sc. (Serbia);
Andrii Yatskul, Ph.D., Associate Professor (Франція).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,
Цentrальноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-581, +380 (522) 390-472, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Заснований у 1971 р.

Включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних наук (бюлетень ВАК №5 від 2010р., накази Міністерства освіти і науки України від 21 грудня 2015 року №1328, від 07 листопада 2018 року №1218, від 02 липня 2020 року № 886).

Категорія «Б»

Збірник наукових праць зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «*Україніка наукова*» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus, Word Cat, CrossRef, Open Ukrainian Citation Index, ResearchBib, Google Scholar*

Реєстраційне свідоцтво: серія KB №23511 - 13351 ПР від 13.07.2018 р.
2414-3820 (Print) 2664-9136 (e) DOI: 10.32515/2414-3820

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.3-14>**Б.І. Котов**, проф., д-р. техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна***Р.А. Калініченко**, доц., канд. техн. наук*ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», м. Ніжин, Україна***Ю.І. Панцир**, доц., канд. техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна***І.Д. Герасимчук**, доц., канд. техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна***В.О. Грищенко**, канд. техн. наук*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна**e-mail: bepeck2001@rambler.ru*

Математична модель теплонасосної системи охолодження матеріалу після сушіння і термообробки

В статті розглядається питання підвищення ефективності функціонування охолоджувачів нагрітого в процесі сушіння матеріалу шляхом використання теплонасосної установки для вироблення штучного холоду. Запропоновано схему використання теплового насосу в комплексі із сушильною установкою і виносним охолоджувачем матеріалу. Сформульовано математичний опис стаціонарних режимів функціонування сушильної установки, охолоджувача матеріалу та елементів теплового насосу на основі парокомпресорної холодильної установки.

сушильна установка, охолоджувач матеріалу, тепловий насос, компресор, конденсатор, повітроохолоджувач

Постановка проблеми. Охолодження зернового матеріалу після теплового сушіння є обов'язковою операцією, так як за нормативними вимогами [1] зерно після висушування в зерносушарках повинно мати температуру на 5...10 °С більшу за температуру оточуючого повітря (середовища). Практика експлуатації сушильних установок, в яких використовують охолоджувальні шахти з коробами для розподілу охолоджуючого повітря, показує, що вони не забезпечують належного охолодження зерна. В колонкових сушарках зона охолодження, як правило, є продовженням сушильного тракту, а товща шару збільшена, тому ефективність охолодження нижча чим в шахтних сушарках. Більш перспективними є виносні охолоджувачі зерна з віброзрідженим або пневмозрідженим рухомим шаром зернового матеріалу. Але за обмеження швидкості фільтрації повітря крізь шар охолоджуємого зерна (для попередження виносу зерна) збільшується час охолодження і габарити установок.

Причиною низької ефективності функціонування охолоджувачів зерна існуючих типів є відносно висока температура охолоджуючого повітря (атмосферне повітря 15...25 °С, а в збиральний період до 30 °С). Радикальним способом підвищення ефективності охолоджуючих систем є застосування штучного машинного охолодження повітря.

Перспективним напрямком холодильної підготовки повітря в установках для охолодження зерна є використання теплових насосів (ТН). Основні переваги застосування ТН для охолодження повітря, це використання як джерела енергії теплоти нагрітого зерна та отримання до 4 кВт·год енергії на вироблення холоду на кожну затрачену 1 кВт·год електроенергії. Крім того ця ж енергія використовується і для нагрівання сушильного агенту. Особливо слід відмітити необхідність застосування штучного холоду для охолодження зерна після мікронізації, коли його температура на виході мікронізатора досягає 80...90 °С.

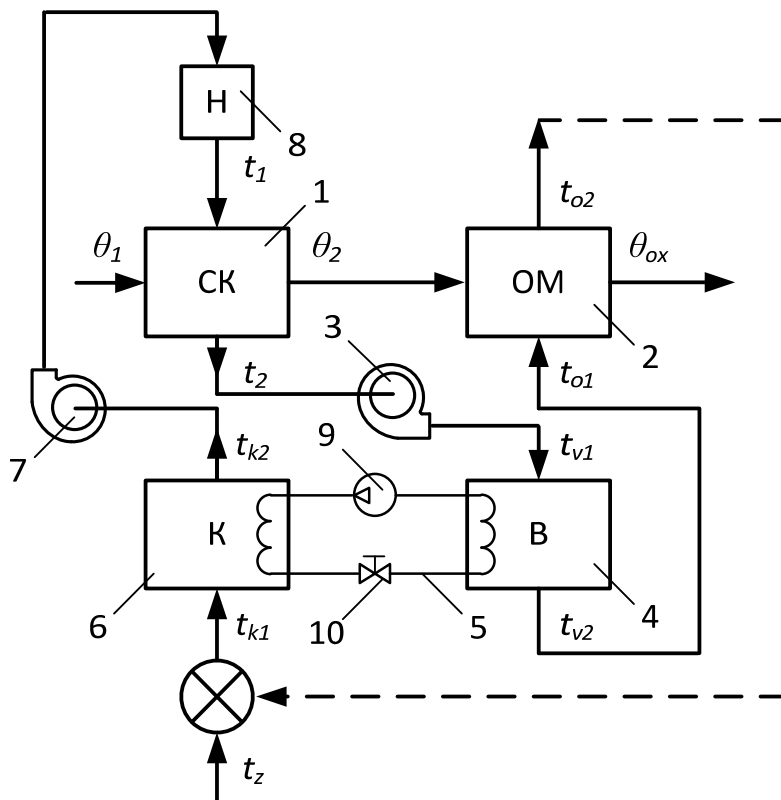
Для виявлення резервів підвищення ефективності установок для охолодження зернових матеріалів після сушіння і високотемпературної обробки необхідно проаналізувати роботу охолоджувача зерна сумісно з теплонасосною системою підготовки охолоджуючого повітря.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз відомих способів та технік охолодження зернового матеріалу наведено в роботі [2]. Математичні моделі для розрахунків процесу охолодження зерна в різному стані зернового шару наведено в роботах [3-6]. Охолодження зерна у щільному рухомому шарі [3] у вібропневмовідцентровому шарі [4], у нерухомому шарі при перехресному русі зерна і охолоджуючого повітря [5], у висхідному пульсуючому потоці повітря [6], у вихровому повітряному потоці [7]. В роботі [8] запропоновано і обґрунтовано доцільність використання штучного охолодження повітря для охолодження зерна. В роботі [9] висвітлено математичне моделювання режиму повітроохолоджувача в складі холодильної машини, що використовується для охолодження зерна. В роботі [10] наведено схему сушильної установки з теплонасосною системою охолодження зерна; запропоновано методи оптимального проектування теплонасосних сушильних установок різного призначення. Але, що до математичного опису роботи зерноохолоджуючої системи з тепловим насосом або холодильною установкою, то такі дані висвітлено недостатньо.

Постановка завдання. Сформулювати математичний опис теплового режиму сумісного функціонування охолоджувача зернового матеріалу після термообробки (сушіння) та теплонасосної парокомпресорної установки.

Матеріали і методи досліджень. Як приклад виробничої реалізації використовується схема енерготехнологічного процесу сушильної установки з виносним охолоджувачем обладнаної ТН на базі парокомпресорної установки (рис. 1). Функціонування теплонасосної системи охолодження матеріалу, який виходить із сушарки відбувається так: відпрацьований сушильний агент із камери сушіння (1) вентилятором (3) подається в повітряно-рідинний теплообмінник (4) випарника ТН, де передає теплоту нагрітого повітря і водяної пари холодоагенту (в контурі циркуляції холодоагенту). Зневоднене (шляхом конденсації) і охолоджене повітря подається в охолоджувач матеріалу (2), де відбирає теплоту матеріалу, знижуючи його температуру. В залежності від заданого режиму охолодження, повітря відпрацьоване при охолодженні матеріалу з температурою не меншою 25 °С може подаватися в теплообмінник конденсатора (6) і при його нагріванні використовуватись як сушильний агент. В звичайному режимі теплообмінник конденсатора (повітряно-рідинний) (6) використовується для нагрівання сушильного агенту (зовнішнього повітря), яке

вентилятором (7) подається в сушильну камеру (1). При необхідності додаткового підігріву сушильного агента використовують паровий, або електричний калорифер (8).



1 – сушильна камера; 2 – охолоджувач зерна; 3, 7 – вентилятори; 4 – випарник;
5 – контур циркуляції холодоагенту; 6 – конденсатор; 8 – повітрянагрівач;
9 – компресор; 10 – дроселюючий вентиль

Рисунок 1 – Схема сушильної установки із теплонасосною системою охолодження матеріалу після сушки
Джерело: [10]

В основі формування математичного опису досліджуваного об'єкта лежать рівняння теплового балансу, сушильної камери, охолоджувача матеріалу і основних інерційних елементів теплонасосної установки (випарника і конденсатора). Оскільки математична модель створюється для теплоенергетичного аналізу системи утилізації теплових викидів сушарки, змінними параметрами елементів системи можна вважати їх значення на виході кожного елемента, а саме – параметри повітря на виході охолоджувача і сушильного агента на виході сушильної камери, а також параметри повітря і холодоагенту на виході теплообмінників конденсатора і випарника. Параметри теплоносіїв і холодоагентів на вході в робочі елементи вважаються заданими.

Оскільки розглядаємо теплові процеси в безперервно діючих сушильних установках, то доцільно складати математичний опис для стаціонарного режиму функціонування сушильної установки і охолоджувача матеріалу. З врахуванням, що теплова інерційність парокомпресорної установки на декілька порядків менша від сушарки і охолоджувача, параметри ТН визначаються також як для стаціонарного режиму.

Фізико-математичним обґрунтуванням моделі тепло- і масообміну в процесі сушіння і охолодження матеріалу (зернового) є наступні умови спрощуючи математичний опис, але не змінюючи реальний процес:

- волога із матеріалу видаляється за законом випарування Дальтона, при цьому волога в матеріалі випаровується і видаляється одночасно; вологовміст і температура в об'ємі матеріалу розподілені рівномірно, тепло і масообмін відбувається тільки між поверхнею матеріалу і сушильним агентом; ефекти випромінювання і контактної теплопередачі враховуються коефіцієнтами теплообміну; стаціонарні поля температур і вологовмісту приймаються одномірними, які змінюються за координатою y , що відраховується в напрямку руху матеріалу;

- при охолодженні матеріалу видалення вологи не враховується за малосності залишкової вологи;

- величина поверхні матеріалу в процесі сушіння і охолодження не змінюється;

- теплообмінне обладнання теплового насосу є об'єктом із зосередженими параметрами (температура трубчастої частини контуру циркуляції холодоагенту за координатою руху холодоагенту не розподілена (температура трубки у конденсаторі дорівнює температурі конденсації, а у випарнику – температурі кипіння холодоагенту)).

Результати досліджень. Стаціонарний тепловий режим сушильної установки за прийнятою схемою [11] і зробленими припущеннями можна описати наступною системою диференціальних рівнянь:

$$G_m c_m L \frac{d\theta}{dy} = \alpha f (t - \theta) + G_o r \frac{du}{dy} L, \quad (1)$$

$$G_c c_p L \frac{dt}{dy} = \alpha f (\theta - t) + r G_c L \frac{dd}{dy}, \quad (2)$$

$$- G_o \frac{du}{dy} L = \beta f (P_n(\theta) - P(d)), \quad (3)$$

$$G_c L \frac{dd}{dy} = \beta f (P_n(\theta) - P(d)), \quad (4)$$

де $P_n(\theta) = a\theta + c$ – парціальний тиск насиченої пари при температурі матеріалу;

$P(d) = bd$ – парціальний тиск пари в повітрі;

G_m, G_c – масові витрати матеріалу і сушильного агента;

c_m, c_p – питома теплоємність матеріалу і газу;

r – питома теплота випарювання;

α, β – коефіцієнти теплообміну і масообміну;

L – довжина транспорту матеріалу;

G_o – масові витрати абсолютно сухого матеріалу;

y – координата в напрямку руху потоків матеріалу і сушильного агента;

θ, t – температура матеріалу і сушильного агента;

u, d – вологовміст матеріалу і сушильного агента;

(1, 2) – позначення параметра на вході і виході сушарки;

f – поверхня матеріалу.

Стаціонарний режим охолодження матеріалу при прямотечійному русі можна описати системою диференціальних рівнянь в такому вигляді:

$$G_{m0}c_{m0}d\theta = \frac{\alpha f}{L}(t_0 - \theta)dy, \quad (5)$$

$$G_{v0}c_p dt_0 = \frac{\alpha f}{L}(\theta - t_0)dy, \quad (6)$$

де G_{m0}, G_{v0} – витрати (масові) висушеного матеріалу і охолоджуваного повітря;
 c_{m0} – теплоємність висушеного матеріалу;
 t_0 – температура охолоджуючого повітря.

Розв'язок системи рівнянь (5) – (6) при граничних умовах: $y = 0; t = t_1; \theta = \theta_2$; отримано у вигляді:

$$t(y) = t_{01} + \frac{k_1}{k} \Delta T (1 - e^{-ky}); \quad (7)$$

$$\theta(y) = \theta_2 + \frac{k_2}{k} \Delta T (1 - e^{-ky}); \quad (8)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{\alpha f}{G_{v0}c_p L}; k_2 = \frac{\alpha f}{G_{m0}c_{m0} L}; k = k_1 + k_2; \Delta T = (\theta_2 - t_{01}).$$

Значення температури повітря t_{02} та матеріалу θ_{0x} на виході охолоджувача визначається підстановкою $y = L$.

Таким чином вихідні параметри повітря і матеріалу на виході із повітроохолоджувача визначатимуться:

$$t_{02} = t_{01} + \frac{k_1}{k} \Delta T \left(1 - e^{-\frac{\alpha f}{G_{v0}c_p}} \right), \quad (9)$$

$$\theta_{0x} = \theta_2 + \frac{k_2}{k} \Delta T \left(1 - e^{-\frac{\alpha f}{G_{m0}c_{m0}}} \right). \quad (10)$$

Параметри відпрацьованого сушильного агенту і висушеного матеріалу визначаються розв'язанням системи рівнянь (1) – (4): $t(y); d(y); \theta(y); u(y)$. Для розв'язку системи рівнянь (1) – (4) використаємо критерій Ребіндера $Rb = \frac{c_m d\theta}{rdu}$ [11],

та його аналог для сушильного агенту $Rb' = \frac{c_p dt}{rdd}$, який характеризує відношення явної теплоти, до скритої, яку сушильний агент передає матеріалу в процесі теплообміну («мокрый» теплообмін).

В рівняннях (1) і (2) зробимо заміни: $-\frac{du}{dy} = \frac{c_m}{rRb} \frac{d\theta}{dy}$; $\frac{dd}{dy} = -\frac{c_p}{rRb} \frac{dt}{dy}$, і перепишемо рівняння (1) і (2) у вигляді:

$$c'_m L \frac{d\theta}{dy} \alpha f (t - \theta); \quad (11)$$

$$-c'_p L \frac{dt}{dy} = \alpha f(t - \theta). \quad (12)$$

Розв'язок системи рівнянь за граничною умовою: $y = 0$; $\theta = t_1$; $t = t_1$, отримано у вигляді:

$$t(y) = t_1 - \frac{k_1}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}), \quad (13)$$

$$\theta(y) = \theta_1 + \frac{k_2}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}), \quad (14)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{\alpha f}{c'_m L}; k_2 = \frac{\alpha f}{c'_p L}; k = k_1 + k_2; c'_m = c_m \left(G_m + \frac{G_o}{Rb} \right);$$

$$c'_p = c_p G_v \left(1 + \frac{1}{Rb} \right); \Delta T_1 = t_1 - \theta_1.$$

Підставляючи значення $\theta(y)$ в рівняння (4) і розкриваючи залежності $P_n(\theta)$, $P(d)$ отримаємо:

$$\frac{dd}{dy} + Ad = B_1 - B_2 e^{-ky}, \quad (15)$$

$$\text{де } A = \frac{\beta f b}{G_c L}; B_1 = \frac{\beta f}{G_c L} \left(c + a \theta_o + \frac{k_1}{k} \Delta T_1 \right); B_2 = \frac{a \beta f}{G_c L} \frac{k_1}{k} \Delta T_1.$$

Розв'язок рівняння (15) за умови: $y = 0$; $d = d_1$, має вигляд:

$$d(y) = \left(d_1 - \frac{B_1}{A} + \frac{B_2}{A - k} \right) e^{-Ay} + \frac{B_1}{A} - \frac{B_2}{A - k} e^{-ky}. \quad (16)$$

Зміну вологовмісту матеріалу за координатою $u(y)$ отримаємо з рівняння матеріального балансу:

$$-G_o du = G_c dd. \quad (17)$$

Інтегруючи (17) матимемо:

$$G_o (u_1 - u) = G_c (d - d_1). \quad (18)$$

звідки:

$$u(y) = u_1 + \frac{G_c}{G_o} d_1 - \frac{G_c}{G_o} d(y), \quad (19)$$

Підставляючи значення $d(y)$ із (16) в (13) після перетворень отримаємо:

$$u(y) = u_1 + \frac{G_c}{G_o} d_1 - \frac{G_c}{G_o} \left(\left(d_1 - \frac{B_1}{A} + \frac{B_2}{A - k} \right) e^{-Ay} + \frac{B_1}{A} - \frac{B_2}{A - k} e^{-ky} \right). \quad (20)$$

Значення параметрів матеріалу та сушильного агента на виході сушарки: θ_2 , u_2 , t_2 , d_2 , визначаються підстановкою $y = L$ в рівняння (13, 14, 16, 20), де L – довжина транспортуючої системи сушарки (стрічка, віброток).

Кількість вологи, що конденсується на поверхнях повітряного теплообмінника випарника, W зневоднюючи відпрацьований сушильний агент можна визначити з рівняння матеріального балансу для випарника:

$$W = G_c(d_2 - d_{dv}) = \sigma_k \beta \left(d_n(\bar{\theta}_v) - \frac{\bar{d}_2 + d_{2v}}{2} \right). \quad (21)$$

Для парокомпресорної теплонасосної установки, яка функціонує у встановленому режимі взаємозв'язки між параметрами теплообмінників конденсатора і випарника визначаються рівняння балансу теплової енергії [12, 13]:

– для контуру випарника

$$\begin{cases} Q_o = G_v c_p \xi (t_{v1} - t_{v2}), \\ Q_o = k_o F_o \Delta T_v, \\ \Delta T = (t_{v1} - t_{v2}) \left(\ln \frac{t_{v1} - t_{v2}}{t_{v2} - t_o} \right)^{-1}. \end{cases} \quad (22)$$

– для конденсатора

$$\begin{cases} Q_k = G_k c_p (t_{k2} - t_{k1}), \\ Q_k = k_k F_k \Delta T_k, \\ \Delta T_k = (t_{k2} - t_{k1}) \left(\ln \frac{t_{k2} - t_{k1}}{t_k - t_{k1}} \right)^{-1}. \end{cases} \quad (23)$$

Рівняння енергетичного балансу теплонасосної установки:

$$Q_k = Q_o + N_k. \quad (24)$$

В рівняння (22) – (24) позначено: Q_o, Q_k – теплова потужність випарника та конденсатора; N_k – потужність компресора; G_v, G_k – масові витрати повітря у випарнику та конденсаторі; c_p – питома теплоємність повітря (вологого); t_{v1}, t_{k1} – температура повітря на вході у випарник і конденсатор; t_o, t_k – температура кипіння і конденсації холодоагенту; k_o, k_k – коефіцієнт теплопередачі від холодоагенту до повітря у випарнику і конденсаторі; F_o, F_k – поверхня теплообміну випарника і конденсатора; ξ – коефіцієнт вологовипадіння; $\Delta T_o, \Delta T_k$ – середньологарифмічна різниця температури повітря і холодоагенту у випарнику і конденсаторі.

З розв'язків системи рівнянь (17) і (18) визначені параметри охолоджуючого повітря на виході випарника:

$$t_{v2} = t_o + (t_{v1} - t_o) e^{-\frac{k_o F_o}{G_v c_p \xi}}, \quad (25)$$

та сушильного агента на виході конденсатора:

$$t_{k2} = t_k - (t_k - t_{k1}) e^{-\frac{k_k F_k}{G_c c_p}}. \quad (26)$$

Для замикання отриманої системи рівнянь (9 – 10), (13 – 14, 16), (25 – 26) треба мати рівняння зв'язку між елементами теплонасосної системи тепло-холодопостачання та сушильної установки. Відповідно до розрахункової схеми (рис. 1) матимемо:

$$t_2 = t_{v1}; t_{o1} = t_{v2}; t_{v2} = t_{o2}; t_1 = t_{k2}; t_{k1} = t_z = t_{o2}. \quad (26)$$

Підставляючи значення параметрів (26) у відповідні рівняння, що визначають вихідні параметри сушильної установки і охолоджувача, отримаємо замкнуту математичну модель теплонасосної системи холодо- і тепло постачання сушильної установки із охолоджувачем матеріалу:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{v1} = t_{k2} - \frac{k_1}{k} \Delta T_1 \left(1 - e^{-\alpha f \left(\frac{1}{c'_m} + \frac{1}{c'_p} \right)} \right) \\ d_{v1} = \left(d_1 - \frac{B_1}{A} + \frac{B_2}{A-k} \right) e^{-\frac{\beta f b}{G_c}} + \frac{B_1}{A} - \frac{B_2}{A-k} e^{-\alpha f \left(\frac{1}{c'_m} + \frac{1}{c'_p} \right)} \\ t_{o2} = t_{v2} + \frac{k'_1}{k} \Delta T_o \left(1 - e^{-\frac{\alpha f}{G_{vo} c_p}} \right) \\ t_{v2} = t_o + (t_{v1} - t_o) e^{-\frac{k_o F_o}{G_{vo} c_p \xi}} \\ t_{k2} = t_k - (t_k - t_{k1}) e^{-\frac{k_k F_k}{G_c c_p}} \\ d_{v2} = d_{v1} - \sigma_k F_o (d_n(t_o) - \bar{d}_v) \end{array} \right.$$

де σ_k – коефіцієнт масообміну при конденсації;

d_n – вологовміст насиченого повітря при температурі t_o .

Величини температури кипіння і конденсації орієнтовно приймаються за даними експериментів [14]: $t_o = 10^\circ\text{C}$; $t_k = 70...80^\circ\text{C}$. В подальшому уточнюються розрахунками за методами [13] в залежності від визначеної температури охолодженого зерна, яка залежить від зовнішньої температури: $\theta_{3k} = t_z + (5...10^\circ\text{C})$ [1]. При заданих параметрах t_k та t_o , коефіцієнт перетворення ТНУ дорівнює 3.0.

На рисунках 2 і 3 наведено зміну параметрів процесів сушіння і охолодження (їх розподіл) в напрямку переміщення: при звичайному сушильному циклі та при охолодженні атмосферним повітрям і штучно охолодженим. З аналізу графіків випливає, що застосування ТН для охолодження дозволяє знизити температуру матеріалу на 5°C , і використати відпрацьоване повітря (25°C) для підігріву сушильного агенту.

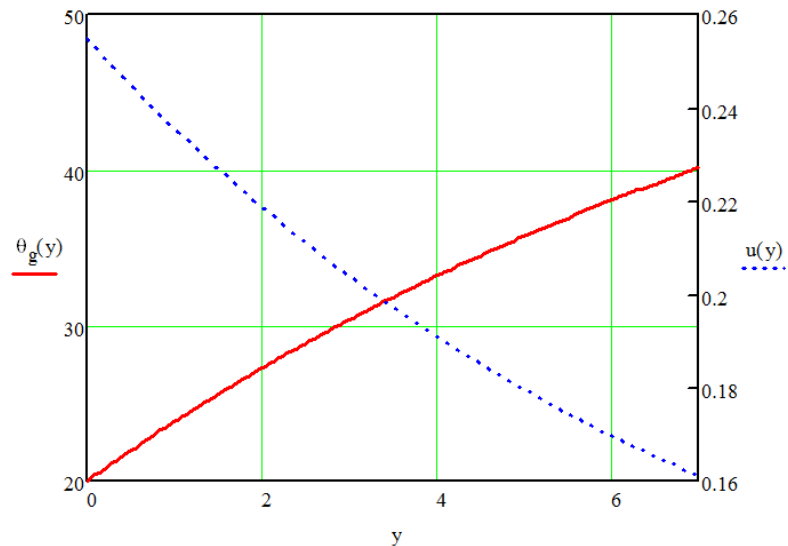
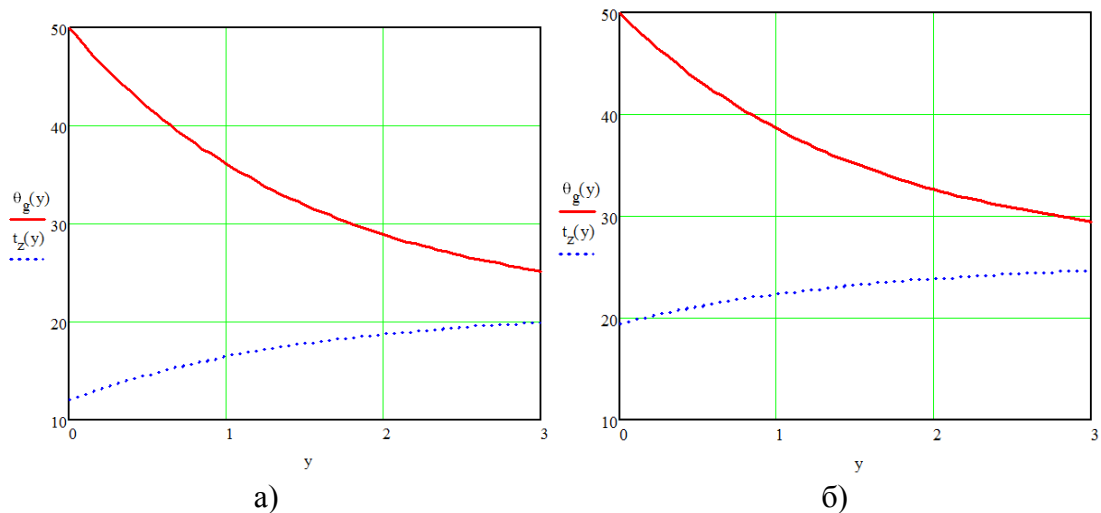


Рисунок 2 – Зміна температури та вологовмісту зерна за координатою сушарки

Джерело: розроблено авторами



а) із використанням теплового насоса; б) атмосферним повітрям

Рисунок 3 – Зміна температури зерна та охолоджуючого повітря за координатою охолоджувача

Джерело: розроблено авторами

Висновки:

1. Сформульована математична модель стаціонарних режимів теплонасосного сушильного агрегату із штучним охолодженням висушеного матеріалу, може використовуватись для оцінки доцільності та енергетичної ефективності використаних холодильних машин для охолодження зерна особливо після високотемпературної обробки.

2. Отримані аналітичні залежності у вигляді замкненої системи рівнянь можна використовувати для оптимізації параметрів теплонасосної сушильної установки за критерієм мінімізації енергоспоживання.

Список літератури

1. Инструкция по сушке продовольственного, кормового зерна, семян масличных культур и эксплуатации зерносушилок / Г.Н. Станкевич и др. Одеса: "АРД-ЛТД", 1997. 72 с.
2. Курганський О.Д., Котов Б.І. Аналіз способів охолодження зернового матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 2(94). С. 49– 52.
3. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Курганський О.Д. Тепло і масообмін при сушінні і охолодженні зернового матеріалу у щільному рухомому шарі . *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 1. С. 93–95.
4. Теоретичні дослідження процесу охолодження зернового матеріалу при переміщенні у вібровідцентровому шарі / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, О.Д. Курганський, С.П. Степаненко, В.О. Швидя. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2016. Вип. 46. С. 54-60.
5. Калініченко Р.А., Котов, Б.І. Математичне моделювання стаціонарних режимів установок для охолодження і нагріву дисперсних сільськогосподарських матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2018. Вип. 8. С. 97– 104.
6. Визначення шляхів підвищення ефективності охолодження зерна після сушарок і термообробок / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, А.В. Рудь, С.М. Грушецький . *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 2(13). С.111– 120.
7. Алтухова Т.А., Шуханов, С.Н. Экспериментальные исследования работы вихревого охладителя зерна с помощью полнофакторного эксперимента . *Вестник АлтГАУ*. 2013. № 9. С.99– 102.
8. Станкевич Г.Н., Петруня, В.Н. Техника и технология использования искусственно охлажденного воздуха в процессе хранения зерна . *Хранение и переработка зерна*. 2003. №3. С.52–53.
9. Грищенко В.О., Котов Б.І. Математичне моделювання і розрахунок динамічних режимів повітроохолоджувача для охолодження зерна та зберігання. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 252. С. 108–114.
10. Чайченец Н.С. Оптимальное проектирование теплонасосных сушильных установок . *Холодильная техника*. 1989. № 2. С.46–50.
11. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Ліпунов М.І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2012. Вип. 42, ч. 2. С.17–23.
12. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. Москва: Колос, 2003. 532 с.
13. Нікульшин, В.Р., Височин, В.В. Теплові насоси та кондиціонери : навч. посіб. О. : Медіа Арт, 2014. 180 с.
14. Хоштария А.Г. Разработка и экспериментальное изучение процесса теплонасосного теплоснабжения чаефиксационных и чаесушильных агрегатов и теплотехническое исследование низкотемпературного хранения чайного листа : Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.14.04. Груз. политехн. ин-т. Тб., 1973. 25 с.

References

1. Stankevich, G.N., Shapovalenko, O.I., Strahova, T.V., Petrunja, B.M., Jakovenko, A.I. & Ostapchuk, M.V. et al. (1997). *Instrukcija po sushke prodovol'stvennogo, kormovogo zerna, semjan maslichnyh kul'tur i jekspluatacii zernosushilok* [Instructions for drying food, feed grains, oilseeds and operation of grain dryers]. Odessa: "ARD-LTD" [in Russian].
2. Kurhans'kyj, O.D. & Kotov, B.I. (2016). Analiz sposobiv okholodzhennia zernovoho materialu [The analysis of the grain material cooling ways]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Engineering, Energy, Transport AIC*, 2(94), 49– 52 [in Ukrainian].
3. Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A. & Kurhans'kyj, O.D. (2017). Teplo i masoobmin pry sushinni i okholodzhenni zernovoho materialu u schil'nomu rukhomomu shari [Heat and mass transfer in drying and cooling]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Engineering, Energy, Transport AIC*, 1, 93–95 [in Ukrainian].
4. Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A., Kurhanskyj, O.D., Stepanenko, S.P. & Shvydia, V.O.. (2016). Teoretychni doslidzhennia protsesu okholodzhennia zernovoho materialu pry peremischenni u vibrovoditsentrovomu shari [Theoretical research the cooling process of grain material when moving in

- layer vibrocentrifugal]. *Konstruivannja, vyrobnytstvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, Vol. 46, 54–60 [in Ukrainian].
5. Kalinichenko, R.A. & Kotov, B.I. (2018). Matematyčne modeliuvannia stacionarnykh rezhymiv ustanovok dlia okholodzhennia i nahryvu dyspersnykh sil's'kohospodars'kykh materialiv [Mathematical modeling of stationary modes of installations for cooling and heating of dispersed agricultural materials]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil's'koho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture*, Vol. 8, 97–104 [in Ukrainian].
 6. B.I. Kotov, R.A. Kalinichenko, A.V. Rud', S.M. Hrushets'kyj (2021). Vyznachennia shliakhiv pidvyschennia efektyvnosti okholodzhennia zerna pislia susharok i termoobrobok [Increase the efficiency of grain cooling after drying and heat treatment]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Engineering, Energy, Transport AIC*, 2(13), 111–120 [in Ukrainian].
 7. Altuhova, T.A. & Shuhanov, S.N. (2013). Jeksperimental'nye issledovaniia raboty vihrevogo ohladitelja zerna s pomoshh'ju polnofaktornogo jeksperimenta [Experimental studies of the operation of a vortex grain cooler using a full-factorial experiment]. *Vestnik AltGAU – Bulletin of AltSPU*, 9, 99–102 [in Russian].
 8. Stankevich, G.N., Petrunja, V.N. (2003). Tehnika i tehnologija ispol'zovaniia iskusstvenno ohlazhdennogo vozduha v processe hraneniia zerna [Technique and technology for the use of artificially cooled air during grain storage]. *Hranenie i pererabotka zerna – Storage and processing of grain*, 3, 52–53 [in Russian].
 9. Hryshchenko, V.O. & Kotov, B.I. (2016). Matematyčne modeliuvannia i rozrakhunok dynamichnykh rezhymiv povitrookholodzhuvacha dlia okholodzhennia zerna ta zberihannia [Mathematical modeling and calculation of air coolers dynamic mode cooling grain storage]. *Naukovyj visnyk Natsional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Energy AIC*, Vol. 252, 108–114 [in Ukrainian].
 10. Chajchenec, N.S. (1989). Optimal'noe proektirovanie teplonasosnykh sushil'nykh ustanovok [Optimal design of heat pump dryers]. *Holodil'naja tehnika – Refrigeration technology*, 2, 46–50. [in Russian].
 11. Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A. & Lipunov, M.I. (2012). Analitychne vyznachennia dynamichnykh teplovolohisnykh rezhymiv zernosusharok bezpererвної dii [Analytical dependences for determining the parameters of the drying process at the output of grain dryers]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekh. zb. – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, Vol. 42, part. 2, 17–23 [in Ukrainian].
 12. Amerhanov, R.A. (2003). *Optimizacija sel'skoho zjajstvennykh jenergeticheskikh ustanovok s ispol'zovaniem vozobnovljaemykh vidov jenerгии* [Optimization of agricultural power plants using renewable energy]. Moskva: Kolos [in Russian].
 13. Nikul'shyn, V.R. & Vysochyn, V.V. (2014). *Teplovi nasosy ta kondytsionery* [Heat pumps and air conditioners]. O. : Media Art [in Ukrainian].
 14. Hoshtarija, A.G. (1973). Razrabotka i jeksperimental'noe izuchenie processa teplonasosnogo teplosnabzhenija chaefiksacionnykh i chaesushil'nykh agregatov i teplotehnicheskoe issledovanie nizkotemperaturnogo hraneniia chajnogo lista [Development and experimental study of the process of heat pump heat supply of tea-fixing and tea-drying units and thermotechnical study of low-temperature storage of tea leaves] : *Extended abstract of candidate's thesis*. Gruz. politehn. in-t. Tb. [in Russian].

Boris Kotov, Prof., DSc.

Podilsky State Agrarian and Technical University (PDATU), Kamyanets-Podilsky, Ukraine

Roman Kalinichenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Separated subdivision of NUBiP of Ukraine «Nizhin Agrotechnical Institute», Nizhin, Ukraine

Yuri Pantsir, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

State Agrarian and Engineering University in Podilya, Kamyanets-Podilsky, Ukraine

Igor Gerasimchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

State Agrarian and Engineering University in Podilya, Kamyanets-Podilsky, Ukraine

Volodymyr Hryshchenko, PhD tech. sci.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Mathematical Model of Heat Pump Cooling System of Material After Drying and Heat Treatment

The article considers the issue of increasing the efficiency of coolers of the material heated during drying by using a heat pump unit to produce artificial cold. The scheme of use of a thermal pump in a complex with the drying installation and the portable cooler of material is offered. A mathematical description of the stationary modes of operation of the drying unit, material cooler and heat pump elements on the basis of a steam

compressor refrigeration unit is formulated. At creation of physical and mathematical models of heat and mass transfer in the course of drying and cooling of material (grain) the following conditions are accepted simplifying the mathematical description, but without changing real process: moisture from the material is removed according to Dalton's evaporation law, while the moisture in the material evaporates and is removed simultaneously; moisture content and temperature in the volume of the material are evenly distributed, heat and mass transfer occurs only between the surface of the material and the drying agent; the effects of radiation and contact heat transfer are taken into account by heat transfer coefficients; stationary fields of temperature and moisture content are assumed to be one-dimensional, which vary according to the coordinate calculated in the direction of movement of the material; when cooling the moisture removal material is not taken into account for low residual moisture; the size of the surface of the material in the process of drying and cooling does not change; the heat exchange equipment of the heat pump is an object with concentrated parameters. Using the obtained mathematical dependences, graphical dependences of changes in grain and air temperature are constructed, which allow to evaluate the expediency of using a heat pump.

The formulated mathematical model of stationary modes of the heat pump drying unit with artificial cooling of the dried material can be used to evaluate the feasibility and energy efficiency of the used refrigeration machines for grain cooling, especially after high-temperature processing. The obtained analytical dependences in the form of a closed system of equations can be used to optimize the parameters of the heat pump drying unit by the criterion of minimizing energy consumption.

drying unit, material cooler, heat pump, compressor, condenser, air cooler

Одержано (Received) 16.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 24.10.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 631.674.6:631.559

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.14-20>

К.В. Васильковська, доц., канд. техн. наук, **М.М. Ковальов**, канд. с.-г. наук,
О.О. Андрієнко, доц., канд. с.-г. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна*

e-mail: vasilkovskakv@ukr.net

Технічне забезпечення ін'єкційного зрошення овочевих культур

В статті запропоновано схему краплинного зрошення ін'єкційного типу для вирощування овочевих культур на присадибній ділянці. В запропонованій конструкції для краплинного зрошення розраховано схему та необхідну кількість розміщення трубок з крапельницями та мікротрубок із кілочками для подачі води в підґрунтовий простір кореневої системи рослин. На ділянці під овочеві культури використано ємність для фертигації – введення рідини в зрошувальну систему для підживлення рослин, задля захисту їх від стресів, покращення розвитку та збільшення врожайності. Проведена серія досліджень із забезпечення вологою ділянки у зоні формування коренів і збереження повітрообміну ґрунту та їх впливу на врожайність томатів. Використання краплинного зрошення ін'єкційного типу дало змогу збільшити врожайність до 40% та при цьому економно витратити воду.

зміна кліматичних умов, краплинне зрошення, ін'єкційний тип, мікротрубка, коренева система

Постановка проблеми. Зі зміною кліматичних умов, як в Україні, так і в Світі, постає необхідність забезпечення рослин овочевих культур світлом, повітрям та водою в повному обсязі, тому використання ін'єкційного краплинного зрошення для

аграрного виробництва є необхідною умовою забезпечення сталого майбутнього врожаю та новим викликом для виробників сільськогосподарської продукції. В умовах зміни клімату полив овочевих культур має вирішальний вплив на врожайність, особливо за умов посушливого та жаркого літа. Сільськогосподарські культури, що відчувають стрес через нестачу вологи, погано проростають і вкорінюються, відповідно, зменшується їх врожайність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічний процес вирощування овочевих культур включає в себе по-перше: потенціал насіння, по-друге: зрошування, по-третє: добрива, в четверте: захист рослин і п'яте: механізацію технологічного процесу. Технологічний процес вирощування овочевих культур обов'язково включає в себе наступні складові: якісне насіння з високим генетичним потенціалом, зрошення, добрива, захист рослин та механізацію всіх етапів технологічного процесу. Об'єднання цих головних елементів технології при суворому дотриманні норм внесення і термінів проведення всіх операцій, є основою отримання високих і стабільних врожаїв овочевих культур. Отже краплинне зрошення є незамінною складовою цього технологічного процесу, його могутнім стабілізаційним чинником.

Краплинне зрошення характеризується наявністю постійної розподільної мережі під тиском, що дозволяє здійснювати безперервні або періодичні поливи рослин. При краплинному зрошенні ін'єкційного типу здійснюється локальна подача води в зону формування кореневої системи рослин. В умовах зміни клімату, посушливого та жаркого літа саме краплинне зрошення ін'єкційного типу дозволяє підтримувати вологість кореневого шару ґрунту під час всього вегетаційного періоду на оптимальному рівні, менше води випаровується і більше її потрапляє до кореневої системи рослин.

При краплинному зрошенні ін'єкційного типу зволоження ґрунту здійснюється за допомогою крапельниці. Ін'єкційна крапельниця (кілочок із мікротрубною) подає воду до зони формування коренів рослини, за рахунок цього зберігаються оптимальні водно-фізичні властивості ґрунту [1-7].

Ідею локального внесення води, через механізм поверхневого краплинного зволоження, розвинув у 30-х роках XX ст. ізраїльський інженер С. Бласс, якого вважають винахідником краплинного зрошення [8, 9]. Саме він запропонував конструкцію першої крапельниці, отримавши на неї патент у 1963 р. Аналогічна система з'явилась у США у 1964 р.

Технологію ін'єкційного поливу та внесення за її допомогою рідких добрив вперше продемонстрували в Боннському університеті (Німеччина) наприкінці 1960 р.р. Землевпорядник К. Зоммер, використовував його для підживлення пасовищ, зернових та просапних культур, овочів та навіть винограду [3, 10].

Останнім часом відбувається зміна кліматичних умов та зміщення кліматичного поясу в Україні, що супроводжується посухою, яка негативно позначається на врожайності. Тому особливого значення набуває добір якісних районованих гібридів та сортів сільськогосподарських культур, які б могли перенести тривалий посушливий період. Крім того, для деяких сільськогосподарських культур набуває актуальності питання поливу, що дає змогу підвищити врожайність без збільшення в рази вартості готової продукції. Особливо це стосується овочевих культур.

Постановка завдання. Метою написання статті є обґрунтування застосування краплинного зрошення ін'єкційного типу для отримання сталих врожаїв овочевих культур та збереження екологічних функцій ґрунту в умовах зміни кліматичних умов.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день ін'єкційне краплинне зрошування є найпрогресивнішим способом поливу, що дозволяє найбільш раціонально

використовувати водні ресурси та створювати оптимальні умови розвитку рослин [1-3, 7].

Як відомо, активна зона живлення кореневої системи овочевих культур знаходиться в ґрунті на глибині 20-30 см від поверхні.

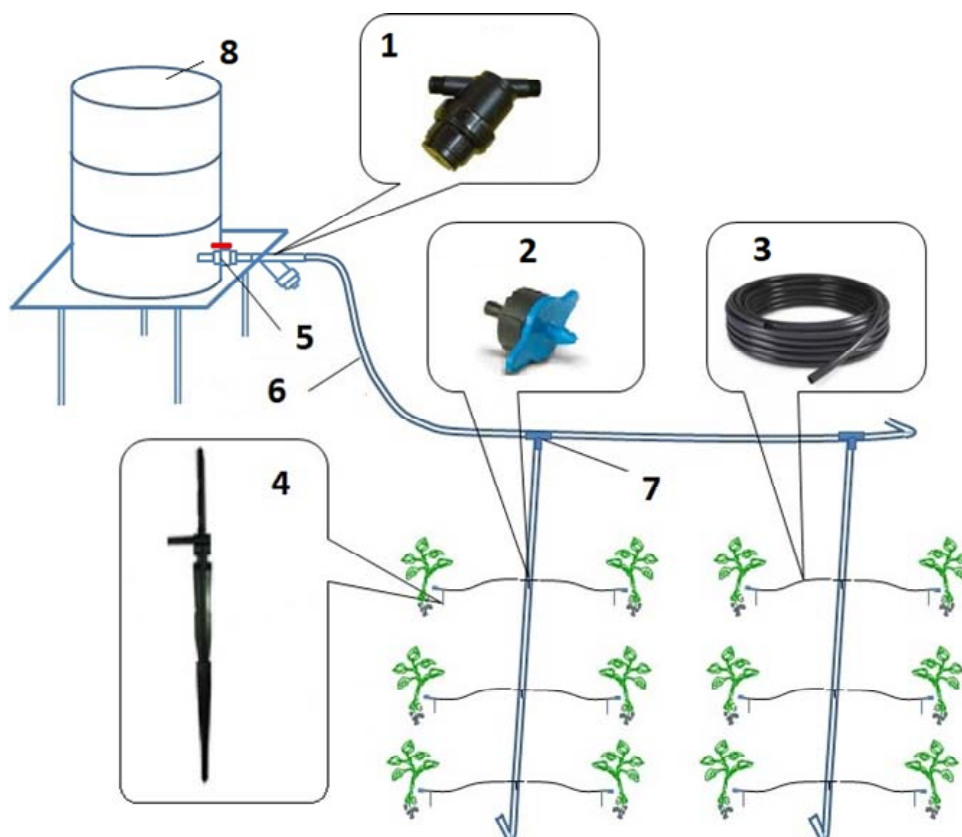
При поверхневому дощуванні овочевих культур витрачається до 30 л на 1 м² для томатів, перців та баклажанів, для капусти – до 50 л 1 м².

Беручи вологу із верхнього шару ґрунту, овочеві культури формують безліч бічних поверхневих корінців. При цьому центральний корінь перестає рости вглиб і, як наслідок, рослини починають відчувати дефіцит води та мінеральних речовин.

Частота поливів регулюється у повній відповідності до водоспоживання рослин, підтримуючи оптимальну вологість та даючи рослинам можливість легко отримувати воду та, за необхідності, поживні речовини. Таким чином, збільшення врожаю за рахунок застосування краплинного способу поливу та живлення рослин зазвичай досягає на овочевих культурах до 50% (при цьому дозрівання овочів відбувається на 5-10 днів раніше).

При організації краплинного зрошення ін'єкційного типу процес поливу повністю автоматизують, що в свою чергу приводить до значної економії трудовитрат.

З метою підвищення технологічної ефективності вирощування овочевих культур на кафедрі загального землеробства Центральноукраїнського національного технічного університету розроблено дослідний зразок системи ін'єкційного краплинного зрошення для овочевих культур (рис. 1) [1, 3].



1 – сітчастий фільтр; 2 – крапельниця; 3 – мікротрубка; 4 – кілочок для мікротрубки; 5 – кран; 6 – труба;
7 – Т-образний переходник; 8 – ємність з водою для фертигації

Рисунок 1 – Типова схема крапельного зрошення ін'єкційного типу для присадибної ділянки.
Джерело: розроблено авторами із використанням [1, 3]

Використовувана для дослідження система краплинного зрошення складається з наступних компонентів (рис. 1):

- джерело водопостачання з насосом для перекачування рідини в установленому обсязі;
- фільтр грубої очистки, що встановлений перед краном для зниження ризику засмічень в магістральних трубах і крапельницях;
- бак з водою або бочка – вузол для фертигації – підготовки та внесення добрив для збагачення ґрунту мінеральними речовинами й іншими корисними компонентами. Підставка висотою 1,0-1,5 м дозволяє створювати додатковий тиск для забезпечення руху системою води із розчиненими в ній добривами;
- магістральний і розвідний трубопровід, що забезпечують вільне транспортування води або водного розчину добрив до крапельниць для поливу;
- регулятор тиску (понижувальний клапан), що встановлено після фільтра, за допомогою якого, можна контролювати об'єм вилитої рідини за одиницю часу;
- сполучна і запірна арматура, що регулює елементи, які використовуються для запуску і припинення роботи всієї системи краплинного поливу (таймер);
- краплинні трубки за допомогою яких відбувається краплинне зрошення рослин.

Ділянка під овочеві культури займала 10 м в довжину на 4 м в ширину, рідини вистачало для якісного промочування підґрунтового кореневого простору ділянки.

Для зрошення 80 кущів томатів сорту «Рожевий фламінго», висаджених рядами по 10 м кожен, використовуються дві 10-метрові трубки. З кожної трубки за допомогою крапельниці було різнонаправлено чотири мікротрубки з кілочком під чотири помідори. Продуктивність однієї крапельниці дорівнює 1,2 л / год.

Норма витрати системи за 1 годину складе 24 л: кількість емітерів 20 шт. – (2x10 м) / 1 м) на норму поливу 1,2 л / год.

Отже, для досліджуваної ділянки томатів використовувалось 2 по 10 метрів крапельної трубки, 20 крапельниць, 80 кілочків з мікротрубками, загальна труба довжиною 5 метрів, ємність з водою для фертигації, насос та інші елементи системи (рис. 2).

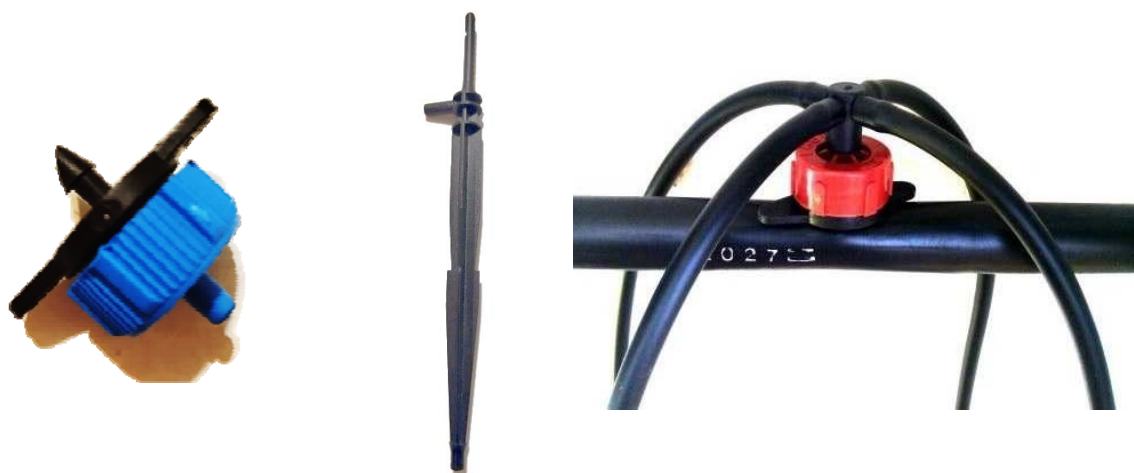


Рисунок 2 – Загальний вигляд крапельниці, кілочка для мікротрубки та крапельниці із чотирма мікротрубками для зрошування томатів

Джерело: розроблено авторами

Використання на дослідній ділянці системи краплинного зрошення ін'єкційного типу дало змогу підвищити кількісні та якісні характеристики врожаю томатів. А використання ін'єкційного підведення води дозволило підтримувати оптимальний водно-фізичний режим в кореновому шарі ґрунту, що створило умови для отримання кращого врожаю.

Середня врожайність томатів сорту «Рожевий фламінго» на ділянці становила 2,4 кг/м². Це на 40% вище, ніж на ділянці без крапельного поливу ін'єкційного типу.

Також економне використання води саме в зоні формування коренів рослини дало змогу збільшити врожайність і не допустити здороження готової продукції. Зниження витрат води при використанні систем ін'єкційного краплинного зрошення становить до 100% порівняно з іншими методами зрошування.

Висновки. Таким чином, із зміною кліматичних умов, більша частина Кіровоградської області потрапила в зону ризикованого землеробства, завдяки цьому постала гостра потреба у використанні новітніх систем поливу сільськогосподарських рослин. Краплинне зрошення ін'єкційного типу є найбільш ефективним при інтенсивних технологіях вирощування просапних та овочевих культур, коли стан рослини в значній мірі залежить від точності підтримки режиму вологості в зоні коріння та режиму харчування рослин. Краплинне зрошення ін'єкційного типу дає змогу підвищити врожайність овочевих культур з економним використанням води.

Список літератури

1. Крапельне зрошення – вся інформація про крапельний полив. *Журнал «Зерно»*. URL: <https://www.zerno-ua.com/guides/krapelne-zroshennya/> (дата звернення 16.09.2021)
2. Розрахунок і проектування систем крапельного поливу. *Інформаційно-аналітична система «Аграрії разом»*. URL: <https://agrarii-razom.com.ua/article/rozrahunok-i-proektuvannya-sistem-kraplinnogo-polivu> (дата звернення 23.08.2021)
3. Васильковська К.В., Ковальов М.М., Молокост Л.А. Технічне та технологічне забезпечення краплинного зрошення овочевих культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2020. Вип. 50. С. 33-41. (DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.35-41>)
4. Коковіхін С.В. Науково-методичні основи встановлення закономірностей та розробки математичних моделей формування урожаю польових культур при зрошенні: монографія. Херсон : Айлант, 2010. 246 с.
5. Мисик Г.А., Куліковський Б.Б. Основи меліорації та ландшафтознавства. Посібник. К: «ІНКОС», 2005. 464 с.
6. Краплинне зрошення – сучасний метод поливу. *Державне агентство водних ресурсів України, Басейнове управління водних ресурсів нижнього Дніпра*. URL: <https://buvrnd.gov.ua/materialy-625.htm?ps=3> (дата звернення 16.09.2021)
7. Mostipan, M.I., Vasylovskaya, K.V., Andriyenko, O.O., Reznichenko, V.P.. Modern aspects of tilled crops productivity forecasting. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 53, 2017. pp. 35-40.
8. Ромашенко М. І., Шатковський А. П. Тенденції розвитку системи краплинного зрошення. *Агрономія Сьогодні*. URL: <http://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/503-tendentsii-rozvytku-systemy-kraplynnoho-zroshennia.html> (дата звернення 15.09.2021)
9. Ковальов М.М., Васильковська К.В. Оцінка якості підземних вод для систем мікрозрошення в умовах захищеного ґрунту. *Зрошуване землеробство: міжвідомчий тематичний науковий збірник*. 2020. Вип. 74. С. 50-53. (DOI: <https://doi.org/10.32848/0135-2369.2020.74.7>)
10. Ковальов М.М., Резніченко В.П. Оцінка якісних показників підземних вод для систем ін'єкційного мікрозрошення за вирощування томату розсадним способом. *Таврійський науковий вісник*. №115, С. 76-84. (DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.10>)

Referencis

1. Krapelne zroshennia – vsia informatsiia pro krapelni polyv [Drip magnification - all information about drip fields]. *Журнал «Зерно»*. – *Journal “Zerno”*. Retrieved from <https://www.zerno-ua.com/guides/krapelne-zroshennya/> [in Ukrainian]
2. Rozrakhunok i proektuvannia system krapelnogo polyvu [Development and design of drip irrigation system]. *Informatsiino-analitychna systema «Ahrarii razom»* – *Information and analytical system “Agrarians together”*. Retrieved from <https://agrarii-razom.com.ua/article/rozrakhunok-i-proektuvannya-sistem-kraplinnogo-polivu> [in Ukrainian]
3. Vasylovskaya K.V., Kovalov M.M., Molokost L.A. (2020) Tekhnichne ta tekhnologichne zabezpechennia kraplynnoho zroshennia ovochevykh kultur [Technical and technological support of drip irrigation of vegetable crops]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodержавnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichnyi zbirnyk* – *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 50: 33-41. (DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.35-41>) [in Ukrainian]
4. Kokovikhin S.V. (2010) Naukovo-metodychni osnovy vstanovlennia zakonornosti ta rozrobky matematychnykh modelei formuvannia urozhaiu polovykh kultur pry zroshenni: monografiia [Scientific and methodical bases of establishment of regularities and development of mathematical models of formation of a crop of field cultures at irrigation: monograph]. Kherson: Aylant. [in Ukrainian]
5. Mysyk H.A., Kulikovskiy B.B. (2005) Osnovy melioratsii ta landshaftoznavstva. Posibnyk. [Fundamentals of land reclamation and landscape science. Handbook.] – Kyiv: “INKOS”. 464. [in Ukrainian]
6. Kraplynne zroshennia – suchasnyi metod polyvu [Drip irrigation is a modern method of watering]. *Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy, Basynove upravlinnia vodnykh resursiv nyzhnogo Dnipro* – *State Agency of Water Resources of Ukraine, Basin Department of Water Resources of the Lower Dnieper*. Retrieved from <https://buvrnd.gov.ua/materialy-625.htm?ps=3> [in Ukrainian]
7. Mostipan, M.I., Vasylovskaya, K.V., Andriyenko, O.O. & Reznichenko, V.P. (2017). Modern aspects of tilled crops productivity forecasting. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 53, 35–40 [in English].
8. Romashchenko, M. I. & Shatkovskiy, A. P. (2014). Tendentsii rozvytku systemy kraplynnoho zroshennia [Trends in the development of drip irrigation]. *Ahronomiia Sohodni – Agronomy Today*. Retrieved from <http://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/503-tendentsii-rozvytku-systemy-kraplynnoho-zroshennia.html> [in Ukrainian]
9. Kovalov, M.M. & Vasylovskaya, K.V. (2020). Otsinka yakosti pidzemnykh vod dlia system mikro-zroshennia v umovakh zakhyshchenoho gruntu [Groundwater quality assessment for micro-irrigation systems in protected soil conditions]. *Zroshuvane zemlerobstvo: mizhvidomchyi tematychnyi naukovyi zbirnyk* – *Irrigated agriculture: interdepartmental thematic scientific collection*, Vol. 74, 50-53. (DOI: <https://doi.org/10.32848/0135-2369.2020.74.7>) [in Ukrainian]
10. Kovalov, M.M. & Reznichenko, V.P. (2020). Otsinka yakysnykh pokaznykiv pidzemnykh vod dlia system iniektiinoho mikro-zroshennia za vyroshchuvannia tomatu rozsadnym sposobom [Evaluation of groundwater quality indicators for injectable micro-irrigation systems for tomato seedling cultivation]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk – Taurian Scientific Bulletin*, 115, 76-84. (DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.10>) [in Ukrainian]

Kateryna Vasylovskaya, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Kovalov**, PhD agr. sci., **Olha Andriienko**, Assoc. Prof., PhD agr. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Technical Support of Injectable Irrigation of Vegetable Crops

With the change of climatic conditions, both in Ukraine and in the world, there is a need to provide vegetable crops with light, air and water in full, so the use of injectable irrigation for agricultural production is a prerequisite for sustainable future crops and a new challenge for producers of agricultural products. In climate change, irrigation of vegetable crops has a decisive impact on yields, especially in dry and hot summers.

The technological process of growing vegetable crops necessarily includes the following components: quality seeds with high genetic potential, irrigation, fertilizers, plant protection and mechanization of all stages of the technological process. Combining these main elements of technology with strict adherence to the rules of application and timing of all operations, is the basis for obtaining high and stable yields of vegetable crops. Therefore, drip irrigation is an indispensable component of this technological process, its powerful stabilizing factor. The article proposes a scheme of injectable drip irrigation for growing vegetables in the backyard. In the proposed design for drip irrigation, the scheme and the required number of placement of tubes with droppers and microtubes with pegs for

water supply to the subsoil space of the root system of plants are calculated. In the area under vegetable crops, a container for fertigation was used - the introduction of liquid into the irrigation system to feed the plants, to protect them from stress, improve development and increase yields. A series of studies was conducted to provide moisture to the area in the area of root formation and preservation of soil air exchange and their impact on tomato yield. The use of injectable drip irrigation has increased yields by up to 40% while saving water.

Thus, with the change of climatic conditions, most of the Kirovohrad region fell into the zone of risky agriculture, due to which there was an urgent need for the use of irrigation systems for agricultural plants. Injection-type drip irrigation is most effective in intensive cultivation of row crops and vegetables, when the condition of the plant largely depends on the accuracy of maintaining the humidity in the root zone and plant nutrition. Drip irrigation of the injection type allows you to increase the yield of vegetable crops while economically using water resources.

climate change, drip irrigation, injection type, microtube, root system

Одержано (Received) 18.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 24.10.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 631.632.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.20-35>

Б. І. Котов, проф., д-р. техн. наук

Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна

С. П. Степаненко, д-р техн. наук, ст. наук. співр.

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт Глеваха, Фастівський р-н, Київська обл., Україна

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Теоретичні дослідження руху компонентів зернового матеріалу із штучно сформованим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу

В статті розглядаються дослідження поділу зернових матеріалів у пневматичних каналах із штучно сформованим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу, для визначення раціональної форми та параметрів подачі матеріалу та варіантів поділу зернового матеріалу на фракції.

Теоретично досліджено та встановлено закономірності руху зернівки у вигляді математичних моделей динаміки руху твердої частки в потоці повітря, які відрізняється від відомих тим, що враховують дію бокових сил, концентрацію матеріалу, а застосування степеневого закону та штучно сформованого експоненціального закону розподілу повітря дало можливість підвищити розходження (розщеплення) траєкторій руху зернівок на 20%.

Розв'язок системи нелінійних диференціальних рівнянь із початковими умовами виконано в програмному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху зернівки в повітряному потоці, що дозволяє розраховувати їх траєкторії руху, які різняться коефіцієнтами парусності та визначити раціональні значення параметрів пневмогравітаційних та пневмоінерційних сепараторів.

Використовуючи отримані залежності для розробки повітряних сепараторів, можна визначити початкову швидкість введення і напрямок входження зернівок у повітряний потік, а також визначити траєкторії руху матеріалу в повітряних каналах з нижнім вивантаженням матеріалу.

потік повітря, зернівка, сили Жуковського та Магнуса, траєкторія, процес поділу, пневматичний сепаратор

Постановка проблеми. Рішення проблеми розділення багатокomпонентного зернового матеріалу на окремі фракції певного цільового призначення (насіння, товарне зерно, фураж) на стадії первинної обробки зерна дозволить скоротити кількість і продуктивність машин вторинної і спеціальної обробки кондиційного зерна. Перспективним напрямом підвищення ефективності післязбиральної обробки зерна в зернопродукуючих є застосування на першій стадії пневмосепаруючих машин, функціонування яких не залежить від вихідної вологості зерна. Однак у виробничих умовах ефективність розділення зернового матеріалу коливається в межах від 30 до 60% в залежності від етапу обробки.

Проведеними дослідженнями визначено рекомендації до конструювання, вибору параметрів і режимів роботи пневмосепаруючих каналів. Але подальше покращення якості розділення компонентів зернового матеріалу (КЗМ) утруднено не вирішенням питань зниження негативного впливу на ефективність поділу нерівномірності полів швидкостей повітряного потоку за шириною вертикальних та висотою горизонтальних каналів.

Вирівнювання поля швидкостей гофрованими пластинчастими решітками (на вході або виході каналу) неоднозначно впливає на ефективність поділу і потребують додаткового обслуговування. Останнім часом з'явилися пневмосепаратори із заслінками з регулюванням кута розкриття (генератори каскаду повітряних струменів). Встановлення оптимальної епюри швидкостей для вертикальних і горизонтальних каналів є сутністю необхідних досліджень, щодо підвищення ефективності поділу КЗМ, які полягають у потребі визначення впливу штучно створеної епюри швидкостей на величину розходження траєкторій і визначення раціонального профілю поля швидкостей повітряних потоків в каналах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні концептуальні положення пневматичного поділу КЗМ на фракції при первинній обробці зерна висвітлені в роботі [1]. Реалізація способів покращення ефективності функціонування і якості сепарування у повітряних каналах наведена в останніх роботах [2-9]. Так в роботі в [2] для покращення поділу матеріалів в горизонтальному каналі запропоновано подачу зерна здійснювати через вертикальний повітряний канал. В роботі [3] подачу матеріалу у вертикальний канал реалізовано через багаторівневий каскад направляючих жолобів, що зменшує взаємодію між зернівками при вході в канал. В роботі [4] вперше реалізовано поділ КЗМ у нижній зоні вертикального пневмоканалу і доведено можливість фракціонування у вертикальному каналі з нижнім сходом зернівок. В роботі [5] для підвищення ефективності використано вертикальний пневмоканал з періодично змінною площею поперечного перетину за висотою. В роботах [6, 7] вперше визначена ефективність зміни швидкості потоку за висотою нахиленого пневмоканалу і регулювання середньої швидкості повітря в каналі. Але при математичному описі руху зернівки використано модель з рівномірним потоком. Разом з тим в роботі [8] використана модель руху зернівки у вертикальному каналі з розподіленою за логарифмічним законом швидкістю повітря і покладено зниження розходження траєкторій за рахунок нерівномірності поля швидкостей повітря. в роботах [9, 10] досліджено рух зернівок у вертикальному і горизонтальному каналах при зміні швидкості повітря в напрямку його руху та визначено збільшення ефективності поділу КЗМ.

Разом з тим у розглянутих роботах невраховано дію додаткових, так званих бокових (поперечних) сил, зумовлених нерівномірністю поля швидкостей повітряного потоку. Вплив дії бокових сил у вертикальному і горизонтальному пневмосепаруючому каналах висвітлено в роботах [11, 12, 13] та показано негативний вплив (зменшення

розходження траєкторій) дії бокових сил типу Магнуса і Жуковського. Разом з тим окремі дослідження проведено шляхом розрахунку траєкторій руху при довільних формах опису поля швидкостей повітряних потоків в каналах пневмосепараторів, показали, що можливість підвищення якості поділу при певній конфігурації епюри швидкості повітря. окремі дані цих досліджень опубліковано в роботі [13].

Постановка завдання. Сформулювати математичний опис переміщення КЗМ в пневмоканалах із штучно сформованим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу для підвищення якості поділу (розходження траєкторій) КЗМ.

Методи і матеріали досліджень. Оскільки особливості конструкцій технічних засобів для пневмосепарування не розглядаються, обрано аналітичний метод дослідження процесів фракціонування, шляхом побудови математичного опису для розрахунку траєкторій руху КЗМ і наступний їх аналіз.

Виклад основного матеріалу. Експериментальними і теоретичними дослідженнями процесів сепарування зерна в повітряних каналах [14, 15] виявлено, що ефективність поділу зернового матеріалу в значній мірі залежить від рівномірності повітряного потоку в каналі. Рівномірність потоку в повітряних каналах характеризується полем швидкості цього потоку, яке може бути описано напівемпіричними залежностями. Найбільш широко застосовують ступеневий закон розподілу у вигляді виразу [16]:

$$v(x) = v_{max} \cdot \left[\frac{x}{b} \right]^{1/n}, \quad (1)$$

де v_{max} – змінна в часі швидкість повітря в центрі каналу;

b – половина відстані між стінками каналу;

x – відстань від розглядаємої точки до стінки каналу;

n – коефіцієнт, який залежить від числа Рейнольдса Re [$n=7-10$ при $Re=2,3(10^3 \dots 10^5)$].

Або більш точну логарифмічну залежність А. Альтшуля [17]:

$$\frac{v(x)}{v_{max}} = \left(1 - 2 \frac{\lg \left[\frac{b}{x} \right]}{\frac{0.975}{\sqrt{\lambda}} + 1,35} \right), \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт опору каналу.

Наявність градієнта швидкості повітря в каналах, зумовлює виникнення бокових сил [18] типу Жуковського (підйомна сила $\vec{F}_ж$) і типу Магнуса (ефект Магнуса - $\vec{F}_м$). Дія цих $\vec{F}_ж$ і $\vec{F}_м$ спрямовані нормально вектору відносної швидкості потоку обтікаючого зернівку $\vec{u}$. При цьому напрямок дії сили $\vec{F}_ж$ спрямовано в бік збільшення значення швидкості повітря в перетині каналу (тобто до вісі каналу); вектор сили $\vec{F}_м$ в напрямку того боку зернівки де вектор швидкості повітряного потоку $\vec{V}_п(x)$ співпадає з напрямком обертання зернівки (з кутовою швидкістю $\vec{\omega}$ [20]).

Таким чином, сила $\vec{F}_ж$ відхиляє зернівку в процесі її руху до центральної частини каналу де швидкість повітря найбільша. Напрямок дії бокової сили $\vec{F}_м$ залежить від напрямку обертання зернівки: якщо зернівка при сходженні із живильника починає обертатися за годинниковою стрілкою то вона буде відхилятися від осьової лінії до (правої) стінки, якщо напрям обертання протилежний, зернівка буде відхилятися від стінки (правої) до вісі каналу. При відсутності градієнту швидкості повітря або обертання зернівки бокові сили на неї не діють, тобто $\vec{F}_м = \vec{F}_ж = 0$. Тому вирівненість швидкості повітряного потоку сприяє підвищенню ефективності поділу КЗМ.

Але, в зв'язку з тим, що центр тиску повітряного потоку не співпадає з центром тяжіння, на зернівку діє момент аеродинамічної сили і вона обертається в потоці в

процесі переміщення. Зернівка відрізняється від форми кулі, тому при повороті змінює площу міделового перетину, а відповідно і силу опору, в наслідок чого з'являються компоненти реакції повітряного потоку в горизонтальній площині і траєкторія її руху стає просторовою кривою [19].

За умови рівномірного поля швидкостей повітряного потоку подальше збільшення якості розділення КЗМ досягається змінюю швидкості повітря в каналах в напрямку його руху, що висвітлено в роботах [8, 9].

Оскільки дія і напрямок бокових сил певною мірою залежать від форми кривої розподілу швидкості повітря і, відповідно, модуля та вектора градієнта швидкості, то величину і напрям дії цих сил можна спрямувати на підвищення якості розділення КЗМ шляхом штучного формування необхідного поля швидкостей повітря в каналах.

Розглянемо процес руху КЗМ в нерівномірних повітряних потоках при заздалегідь заданих формах епюри швидкостей повітря в площині Декартової прямокутної системи координат ХОУ при загальноприйнятих спрощуючих припущень [10-13].

Використовуючи модель силової взаємодії КЗМ з нерівномірним стаціонарним повітряним потоком, запишемо диференціальні рівняння руху зернівки у векторній формі:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{F}_M(\omega) + \vec{F}_J, \quad (3)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = M, \quad (4)$$

де $\vec{G} = mg$ – сила тяжіння;

$\vec{R} = -m \cdot k_V \cdot \vec{u}^2(t)$ – сила аеродинамічного опору;

$\vec{F}_J = \frac{4}{3} \pi \rho r^2 \text{ grad } V(x) \vec{u}$ – сила Жуковського;

$\vec{F}_M(\omega) = \frac{16}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega \cdot \vec{u}$ – сила Магнуса;

$\vec{u} = \vec{V}_\Pi(x) - \vec{V}$ – відносна швидкість (швидкість обтікання);

I – момент інерції;

$m = \frac{\pi d_e^3}{6} \rho_3$ – маса зернівки;

$d_e = 2r$ – еквівалентний діаметр зернівки;

ρ, ρ_3 – густина повітря і речовини зернівки, відповідно;

$\vec{V}$ – швидкість зернівки;

$\vec{V}_\Pi(x)$ – швидкість повітря (розподілена).

Проектуючи рівняння (3) на вісі ХОУ матимемо систему диференціальних рівнянь руху зернівки в координатній формі:

$$\begin{cases} m \frac{dV_x}{dt} = -R \sin \beta \pm F_{M(x)} \cos \beta \pm F_{J(x)} \cos \beta, \\ m \frac{dV_y}{dt} = mg - R \cos \beta \pm F_{M(y)} \sin \beta \pm F_{J(y)} \sin \beta, \end{cases} \quad (5)$$

де $V_x = \frac{dx}{dt}$; $V_y = \frac{dy}{dt}$; $\sin \beta = \frac{V_x \pm V_\Pi(x)}{u}$, $\cos \beta = \frac{V_y \pm V_\Pi(x)}{u}$;

$u = \sqrt{(V_x \pm V_\Pi(x))^2 + (V_y \pm V_\Pi(x))^2}$;

u – відносна швидкість руху зернівки в потоці (швидкість обтікання зернівки повітрям);

β – кут між вектором абсолютної швидкості і віссю ОХ.

Рівняння системи (5) записані в загальному вигляді при наявності двох потоків повітря V_Π , кожен з яких (горизонтальний або вертикальний) може бути використано окремо.

Розглянемо процес руху КЗМ в горизонтальному каналі найпростішого сепаратора типу «віялка» рис.1.

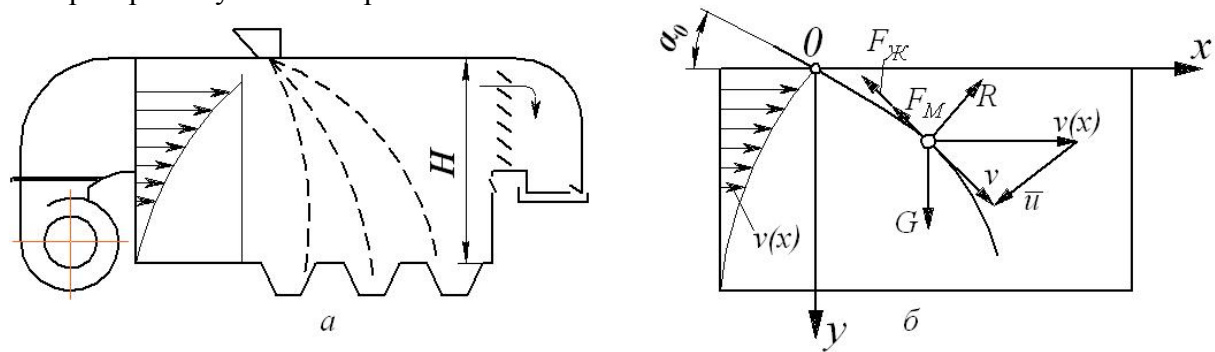


Рисунок 1 – Схема сепаратора (а) та силової взаємодії зернівки з нерівномірним повітряним потоком (б)

Джерело: розроблено авторами з використанням [13, 21, 24]

Не вдаючись до деталей технічних можливостей формування епюри швидкостей повітря в горизонтальному каналі, прийmemo експоненціальну залежність зміни швидкості повітря за висотою каналу:

$$V(y) = v_{max} e^{-ky}, \quad (6)$$

яка наближено характеризує розподіл швидкості повітря на виході з відцентрового вентилятора.

Гradient швидкості повітря матиме протилежний знак порівняно із степеневим розподілом (1), а саме:

$$\text{grad } V(x) = -k v_{max} e^{-ky}, \quad (7)$$

де v_{max1} – швидкість повітря в зоні верхньої стінки каналу.

В цьому випадку сили $\bar{F}_M$ і $\bar{F}_K$ з умовно заданим напрямком обертання, спрямовані в бік протидії рухові зернівки, що має збільшити час її перебування в камері (каналі) поділу.

Проекції $\bar{F}_M$ і $\bar{F}_K$ на вісі координат визначаються наступними залежностями:

$$F_{K(x)} = -\frac{4}{3} \pi \rho r^3 k v_{max1} e^{-ky} \left[v_{max1} e^{-ky} - \frac{dx}{dt} \right], \quad (8)$$

$$F_{M(x)} = -\frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[v_{max1} e^{-ky} - \frac{dx}{dt} \right], \quad (9)$$

$$F_{K(y)} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 k v_{max1} e^{-ky} \left[\frac{dy}{dt} \right], \quad (10)$$

$$F_{M(y)} = -\frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[\frac{dy}{dt} \right]. \quad (11)$$

Підставляючи значення визначених складових в рівняння (5) отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = & k_v \left[v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right] \sqrt{\left[v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2} - \\ & - \frac{[F_{K(x)} + F_{M(x)}]}{m} \cdot \frac{\frac{dy(t)}{dt}}{\sqrt{\left[v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2}}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = g - k_v \left(\frac{dy(t)}{dt} \right) \sqrt{\left[v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2} - \frac{[F_{ж(x)} + F_{м(\omega)x}]}{m} \cdot \frac{v(y) - \frac{dx(t)}{dt}}{\sqrt{\left[v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2}}, \quad (13)$$

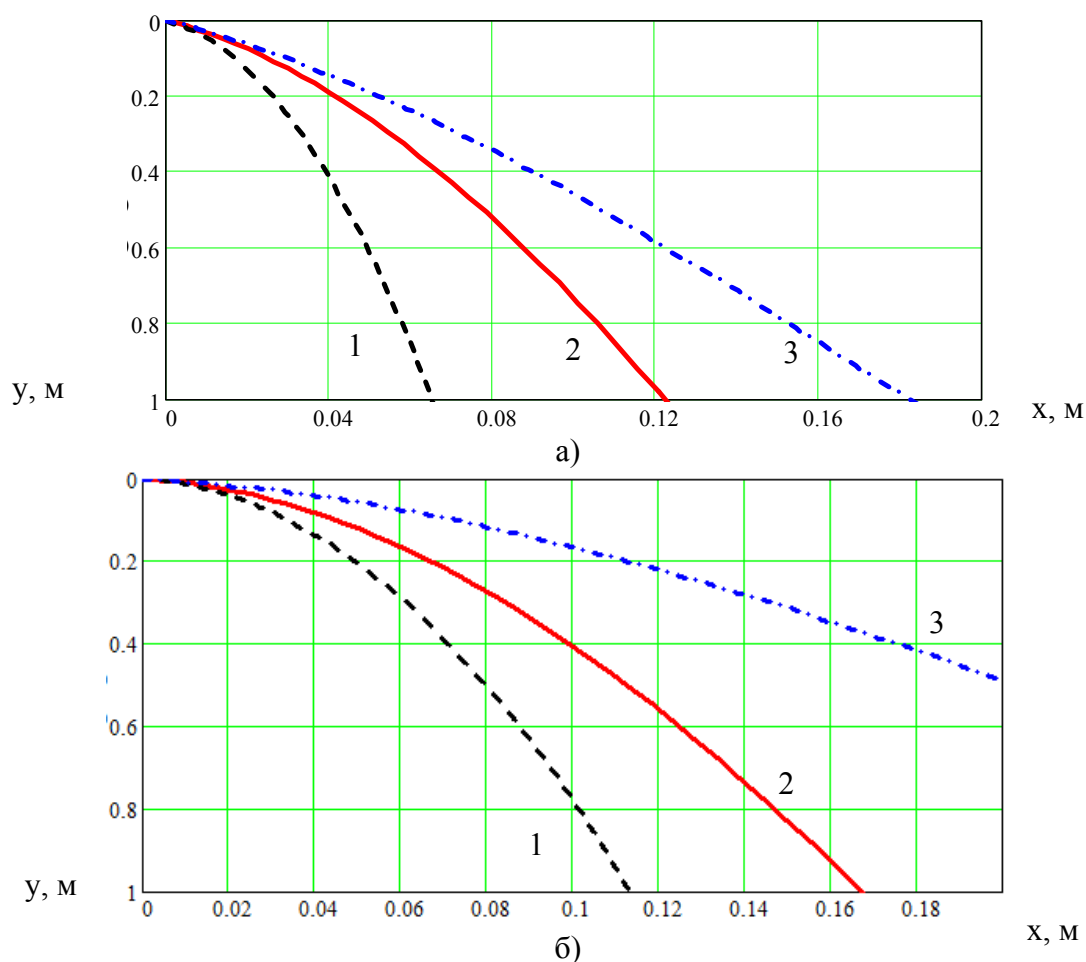
Для замикання системи визначимо залежність $\omega(t)$:

$$I \frac{d\omega(t)}{dt} = 2,3\pi\rho r^3 \frac{h-y}{h-r} \left(\vartheta_{\max} b^{-ky} - \frac{dx(t)}{dt} \right), \quad (14)$$

та запишемо початкові умови:

$$t = 0; x = 0; y = 0; \frac{dx(t)}{dt} = V_0 \cos \alpha_0; \frac{dy(t)}{dt} = V_0 \sin \alpha_0; \omega = \omega_0, \quad (15)$$

Розв'язок системи рівнянь (12) – (14) за початкових умов (15) отримано числено в комп'ютерному середовищі MathCad у вигляді траєкторії руху зернівки з різними значеннями швидкості витання і відповідно маси (рис. 2).



1 – 3 відповідно $k_v = 0.139; 0.184; 0.392$

Рисунок 2 – Траєкторія руху зернівок в горизонтальному каналі з рівномірним (а) та експоненціальним розподілом швидкості повітря за висотою каналу(б)

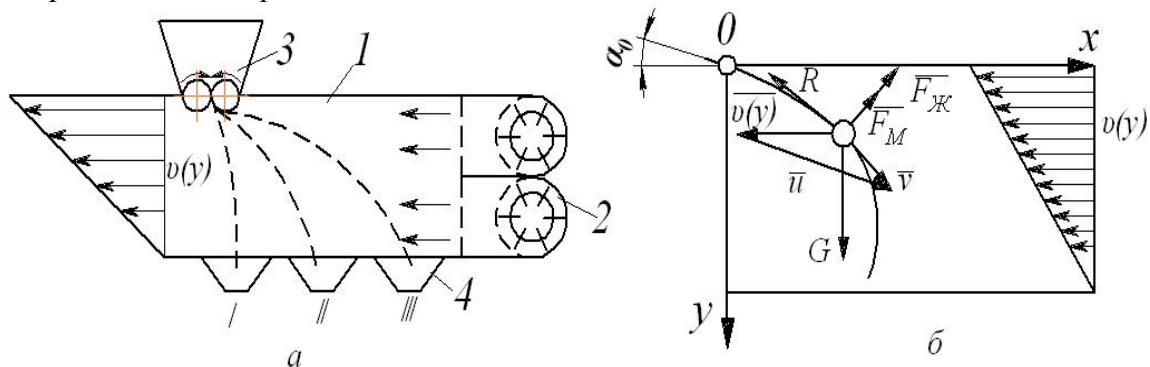
Джерело: розроблено авторами

Порівнюючи отримані залежності $y(x)$ можна зазначити, що зміною епюри швидкості повітря в каналі можна збільшити розходження траєкторій і відповідно ефективність поділу зернового матеріалу на фракції.

Перспективним напрямком підвищення якості розділення зернового матеріалу на фракції у горизонтальному потоці є використання інерційних сил при русі зерна проти напрямку повітряного потоку. В цьому випадку збільшується швидкість обтікання зернівки повітрям при вході в канал і, відповідно сила опору.

Збільшення швидкості повітря в зоні входу зерна в канал шляхом зміни епюри швидкості повітря збільшує як сили опору R так і сили $\bar{F}_ж$ і $\bar{F}_м$, які будуть діяти, як «підйомні».

Схему пневмоінерційного сепаратора та силової взаємодії зернівки з потоком повітря наведено на рис. 3.



1 – пневмоканал, 2 – вентилятори, 3 – живильні вальці, 4 – збірники фракцій

Рисунок 3 – Схема пневмоінерційного сепаратора (а) і силової взаємодії зернівки з повітряним потоком (б)

Джерело: розроблено авторами з використанням [13, 21, 24]

Прийmemo лінійний розподіл швидкості повітряного потоку за висотою каналу:

$$v(y) = v_{max} - by(t) \quad (16)$$

Система диференціальних рівнянь руху зернівки в горизонтальному нерівномірному потоці з протитечієвою подачею матеріалу в координатній формі матиме вигляд:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -R \frac{\frac{dx(t)}{dt} + v(y)}{U} + F_{ж(x)} \frac{\frac{dy(t)}{dt}}{U} + F_{м(x)} \frac{\frac{dy(t)}{dt}}{U}, \\ m \frac{d^2y(t)}{dt^2} = mg - R \frac{\frac{dy(t)}{dt}}{U} - F_{ж(y)} \frac{\frac{dx(t)}{dt} - v(y)}{U} - F_{м(y)} \frac{\frac{dx(t)}{dt} - v(y)}{U} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{де } U = \sqrt{\left[\frac{dx(t)}{dt} + v(y)\right]^2 + \left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2}; \quad R = k_v m U^2.$$

Проекції сил $F_{ж(x,y)}$ та $F_{м(x,y)}$ на вісі прямокутної системи координат XOY можна записати у вигляді:

$$F_{ж(x)} = \frac{-4}{3} \pi \rho r^3 \cdot b \left(v_{max} - by - \frac{dx}{dt} \right), \quad (18)$$

$$F_{м(x)} = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega \cdot \left(v_{max} - by - \frac{dx}{dt} \right), \quad (19)$$

$$F_{ж(y)} = -\frac{4}{3} \pi \rho r^3 \cdot b \frac{dy}{dt}, \quad (20)$$

$$F_{м(y)} = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega \cdot \frac{dy}{dt}. \quad (21)$$

Підставляючи значення діючих сил в рівнянні (17) остаточно отримаємо:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = - \frac{k_v \left(\frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)}{\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2}} +$$

$$+ \frac{\rho}{\rho_r} \left(v_{max} - by + \frac{dx}{dt} \right) (b + 2\omega) \frac{\frac{dy(t)}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2}}, \quad (22)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = g - \frac{k_v \frac{dy(t)}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2}} -$$

$$- \frac{\rho}{\rho_r} \frac{dy}{dt} (b + 2\omega) \frac{\frac{dx(t)}{dt} + v(y)}{\sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2}}. \quad (23)$$

Для замикання системи (22) – (23) необхідно мати залежність $\omega = \omega(t)$. При наявності початкової швидкості обертання зернівки ω_0 (яку забезпечують вальці живильного пристрою (поз. 3 рис. 3а), що обертаються з різною швидкістю.

Зміну кутової швидкості обертання зернівки можна визначити з рівняння [13]:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = 15 \frac{\mu}{\rho r^2} \omega(t), \quad (24)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря.

За умови $t = 0$; $\omega = \omega_0$, зміна швидкості обертання в часі визначається залежністю:

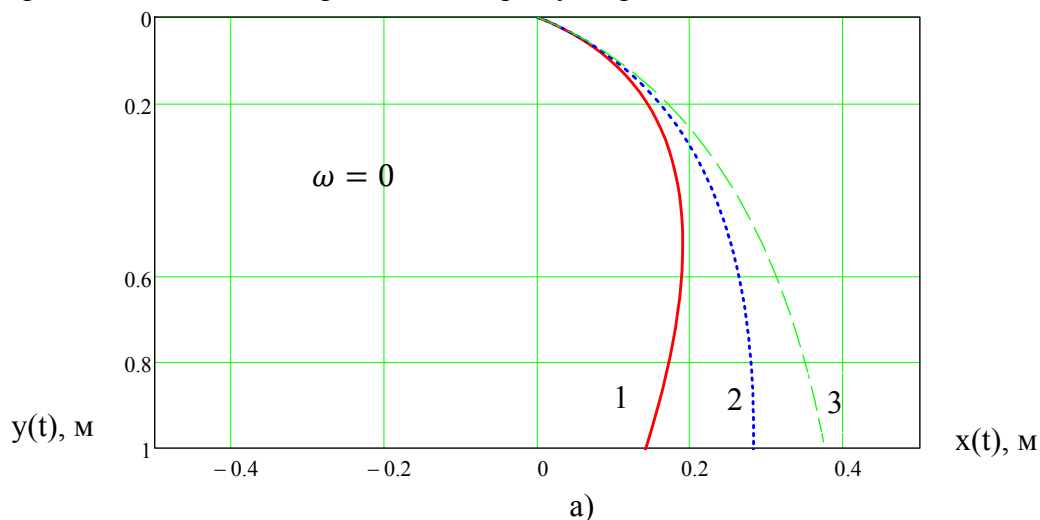
$$\omega(t) = \omega_0 e^{-15 \frac{\mu t}{\rho r^2}}. \quad (25)$$

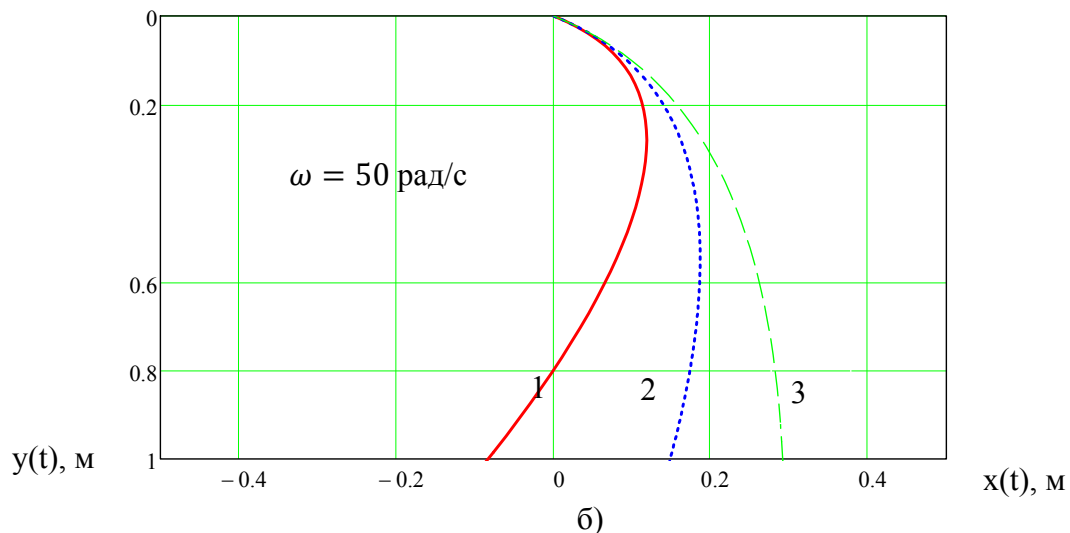
Для розв'язку системи рівнянь сформульовано початкові умови:

$$t = 0; x = 0; y = 0; \frac{dx(t)}{dt} = V_0 \cos \alpha_0; \frac{dy(t)}{dt} = V_0 \sin \alpha_0; \omega = \omega_0, \quad (26)$$

V_0 – швидкість введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал.

Розв'язок системи рівнянь (22) – (24) з початковими умовами (26) виконано в комп'ютерному середовищі MathCad. Результати представлено у вигляді траєкторії руху окремих компонентів зернового матеріалу на рис. 4.





1 – 3 – відповідно $k_V = 0,139; 0,184; 0,392$

Рисунок 4 – Траєкторії руху зернівок з різними значеннями коефіцієнтами парусності

Джерело: розроблено авторами

Основними недоліками вертикальних пневмосепаруючих каналів традиційної прямокутної форми перетину крім суттєвої об'ємної нерівномірності швидкості повітряного потоку, наявності застійних кутових зон є недосконалість системи подачі зерна в канал (похилі або вигнуті скатні дошки, багаторівневе введення), які не забезпечують: рівномірного розподілу зерна за шириною каналу; розшарування і розділення зернового потоку, що в свою чергу призводить до струменевого введення зернового матеріалу в потік повітря.

В результаті багатократного зіштовхування зернин, залучення дрібних фракцій в сліди руху крупніших компонентів. В результаті частина основних фракцій виноситься, частина сміттєвих домішок потрапляє в схід товарних фракцій.

Застосування циліндричних пневмоканалів з кільцевим перетином дозволяє значно покращити процес розділення КЗМ на фракції. Застосування «об'ємних» живильників (конічної форми або у вигляді поверхонь обертання з криволінійною твірною) забезпечує рівномірне по периметру каналу, введення зерна (практично моношаром) в повітряний потік, а також виключає застійні зони в каналі.

Разом з тим, слід відмітити, що нерівномірність поля швидкостей повітряного потоку в кільцевому каналі, негативно впливає на ефективність розділення зернового матеріалу.

Не вдаючись до деталей технічної реалізації зміни епюри швидкості повітряного потоку в кільцевому каналі розглянемо рух зернівок в потоці повітря із штучно сформованою нерівномірністю швидкості повітря. Схеми пневмосепаруючого каналу та силової взаємодії зернівки з потоком повітря наведено на рис. 5а і рис. 5б відповідно. Вісь ОУ умовно поділяє повітряний об'єм каналу на дві частини (вздовж вісі) в яких середня за об'ємними витратами повітря швидкість однакова.

В першій частині розподіл швидкості повітря описується степеневим законом:

$$\vartheta(x) = \vartheta_{max} \cdot \left[\frac{x}{b} \right]^{1/10}, \quad (26)$$

а в другій частині розподіл швидкості повітря описується експоненціальним законом:

$$\vartheta(x) = \vartheta_{max} e^{k_V y}. \quad (27)$$

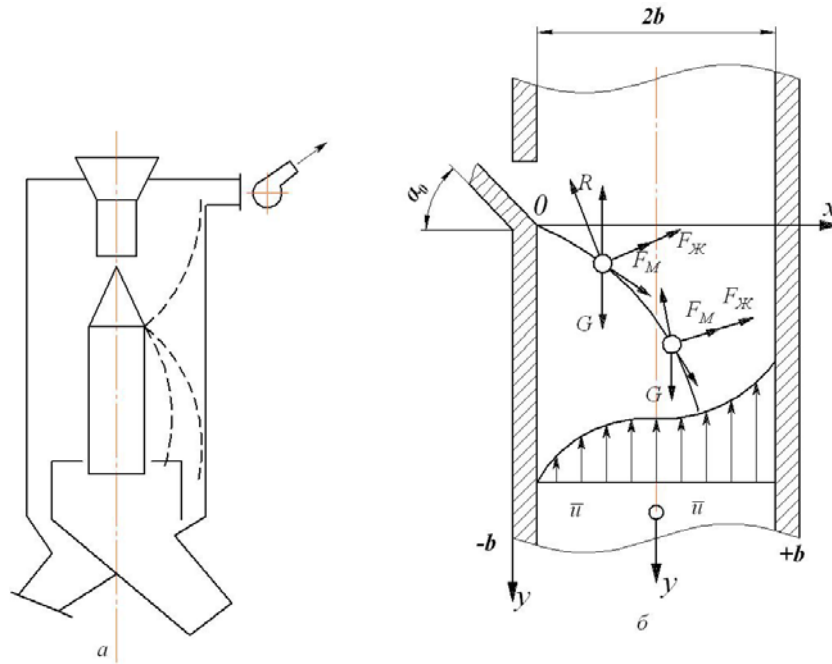


Рисунок 5 – Схема пневмогравітаційного сепаратора (а) та силової взаємодії зернівки з потоком повітря (б)

Джерело: розроблено авторами

На зернівку в повітряному каналі крім сили тяжіння $\bar{G} = mg$, та аеродинамічного опору $\bar{R} = m \cdot k_V \cdot \bar{u}^2(t) = m \cdot k_V \cdot (V_{\Pi}(x) - \vartheta(x))^2$, діють бокові (відхиляючі) сили $\bar{F}_M$ і $\bar{F}_J$.

Рівняння динаміки руху зернівки у вертикальному нерівномірному потоці в координатній формі матимуть вигляд:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -k_V(V_{\Pi}(x) - \vartheta(x))^2 \cos \alpha + \frac{F_{M(x)} + F_{J(x)}}{m} \sin \alpha, \quad (28)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = g \sin \alpha + k_V(V_{\Pi}(y) - \vartheta(y))^2 \sin \alpha + \frac{F_{M(y)} + F_{J(y)}}{m} \cos \alpha. \quad (29)$$

З аналізу взаємодії сил діючих на зернівку та рівнянь руху (28) і (29) випливає, що бокові сили $\bar{F}_M$ і $\bar{F}_J$ відхиляють зернівки різної маси і парусності в один бік на протязі всього часу руху в каналі. Причому, як можна бачити, з рівнянь, менш масові бокові сили мають більший вплив на зернівки меншої маси і менший вплив на зернівки більшої маси, що сприяє розходженню траєкторій руху зернівок різних фракцій.

Проекції сил діючих на зернівку визначаються за аналогією з попереднім дослідженням у наступному вигляді:

- В межах каналу (-b...0):

$$\begin{aligned} F_{J(x)1} &= \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \frac{\vartheta_{max1}}{10b^{0,1}x^{0,9}} \left[\frac{dx}{dt} \right] \\ F_{M(x)1} &= \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[\frac{dx}{dt} \right] \\ F_{J(y)1} &= \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \frac{\vartheta_{max1}}{10b^{0,1}x^{0,9}} \left[\vartheta_{max1} \left[\frac{x}{b} \right]^{0,1} - \frac{dy}{dt} \right] \\ F_{M(y)1} &= \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[\vartheta_{max1} \left[\frac{x}{b} \right]^{0,1} - \frac{dy}{dt} \right] \end{aligned} \quad (30)$$

- В межах каналу (0...+b):

$$F_{J(x)2} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 k_V \vartheta_{max1} e^{kx} \left[\frac{dx}{dt} \right],$$

$$\begin{aligned}
 F_{M(x)2} &= \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[\frac{dx}{dt} \right], \\
 F_{ж(y)2} &= \frac{4}{3} \pi \rho r^3 k_V \vartheta_{max1} e^{k_V y} \left[\vartheta_{max1} e^{k_V y} - \frac{dy}{dt} \right], \\
 F_{M(y)2} &= \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[\vartheta_{max1} e^{k_V y} - \frac{dy}{dt} \right].
 \end{aligned}
 \quad (31)$$

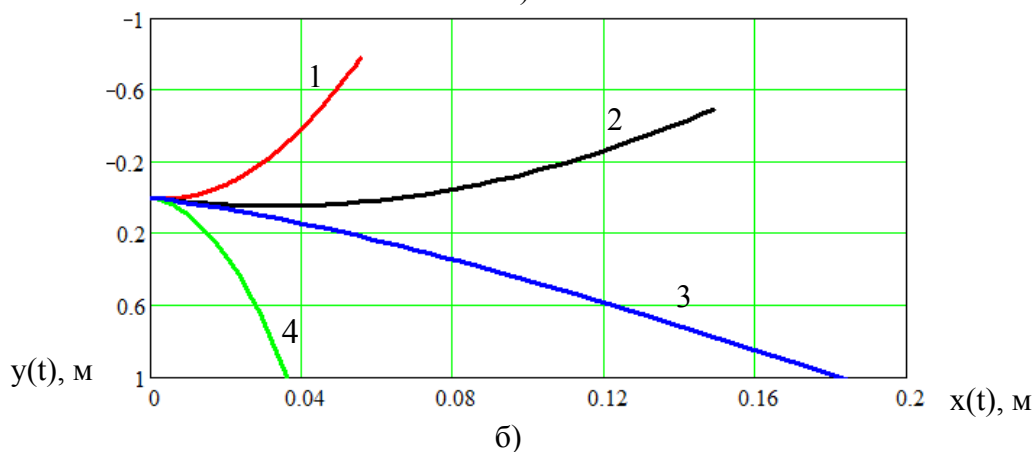
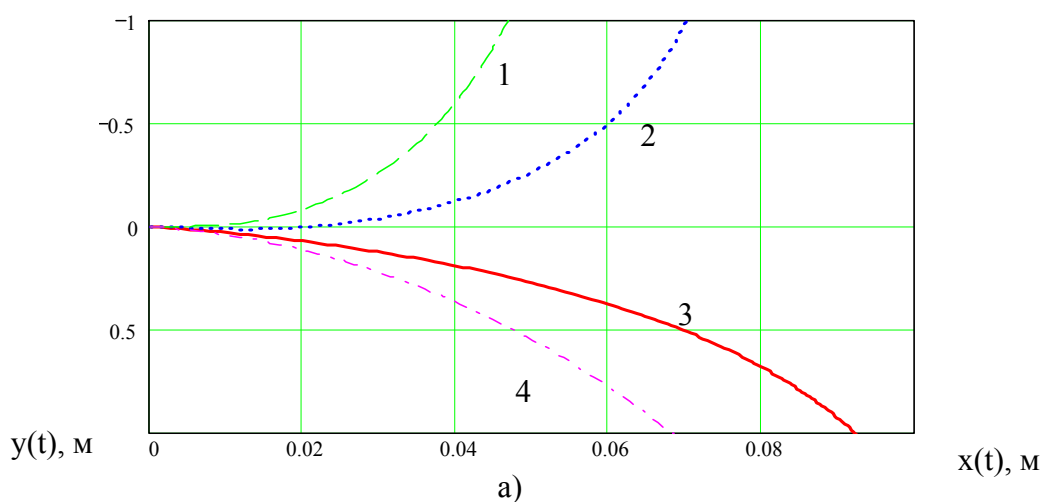
Початкові умови:

$$t = 0; x = -b; y = 0; \frac{dx}{dt} = \vartheta_0 \cos \alpha_0; \frac{dy}{dt} = \vartheta_0 \sin \alpha_0; \quad (32)$$

Граничні умови:

$$\begin{aligned}
 &\text{при } x < 0; F_{ж}, F_M = F_{ж1}, F_{M1}; \\
 &\text{при } x > 0; F_{ж}, F_M = F_{ж2}, F_{M2};
 \end{aligned}
 \quad (33)$$

Розв'язок рівнянь (28)-(29) з урахуванням (30)-(31) за початкових умов (32) і граничних умов (33) отримано в комп'ютерному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху зернівок у рівномірному повітряному потоці рис. 6а і штучно сформованому рис. 6б.



1 – 4 відповідно $k_V = 0,4; 0,27; 0,159; 0,08$

Рисунок 6 – Траєкторії руху зернівок в рівномірному повітряному потоці (а) та при штучно сформованому полі швидкості (б)

Джерело: розроблено авторами

Як можна визначити із отриманих графічних залежностей, величина розходження траєкторій може бути суттєво збільшена при використанні раціональної конфігурації епюри швидкостей у поперечному перетині каналу.

Подальше збільшення ефективності поділу зернівок за аеродинамічними властивостями може бути досягнуто шляхом розподілу швидкості повітряного потоку за висотою каналу, а саме – збільшенням швидкості повітря в напрямку його руху. Так, наприклад, при зміні швидкості повітря (середньої за об'ємними витратами) за лінійним законом:

$$v_{max} = a - by, \quad (34)$$

де $a = 12$; $b = 1,8$.

Суттєво змінюється форма траєкторій і величина їх розходження, тобто ефективність поділу КЗМ.

На рис. 6 наведені траєкторії руху зернівок чотирьох фракцій зернового матеріалу при різних параметрах епюри швидкості повітря у вертикальному перетині каналу, які свідчать про реальну можливість поділу зернового матеріалу на фракції у пневмогравітаційному сепараторі.

Розглянемо також процес поділу зернового матеріалу на фракції в нахиленому пневмосепаруючому каналі, описаного в роботах [19-24]. За технологічними ознаками при вертикальному завантаженні, нахилений канал функціонує в протитечієвому режимі і його можна розглядати, як пневмоінерційний сепаратор рис.7 в якому нахилений канал розташований під кутом α до горизонту з плоско-паралельними стінками. Швидкість повітря за висотою каналу розподілена за експоненціальним законом і визначається залежністю (6).

Використовуючи модель квазігоризонтального каналу [11, 13], коли рух зернівки розглядається в повернутій на кут α прямокутній системі координат XOY.

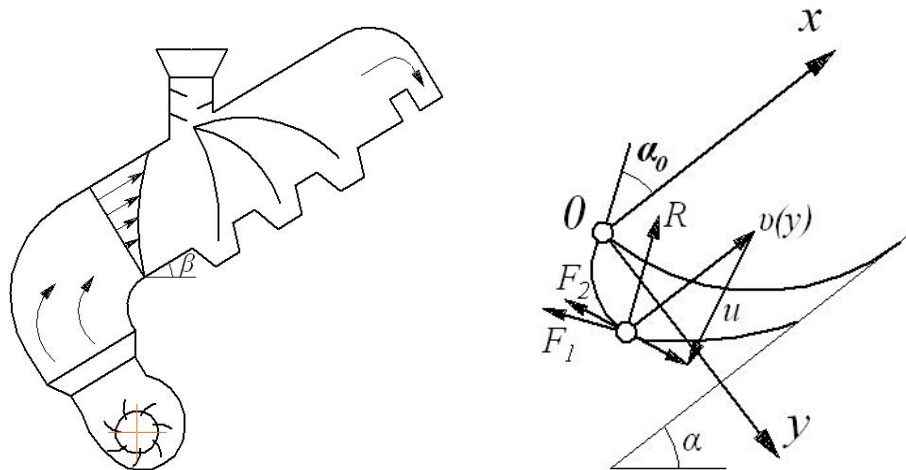


Рисунок 7 – Схема нахилоного пневмосепаруючого каналу (а) і розрахункова схема дії сил (б)
Джерело: розроблено авторами

В цьому випадку використовуємо систему диференціальних рівнянь (5) в такому вигляді:

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = R \sin \alpha - [F_{m(x)} + F_{ж(x)}] \cos \alpha - mg \sin \alpha, \\ m \frac{dv_y}{dt} = mg \cos \alpha - R \cos \alpha - [F_{m(y)} + F_{ж(y)}] \sin \alpha, \end{cases} \quad (35)$$

$$\text{де } \sin \alpha = \frac{dy}{u}, \cos \alpha = \frac{dy + \frac{dx}{dt}}{u}, u = \sqrt{\left(\frac{dy}{dt} + \frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2};$$

Бокові сили визначаються з рівнянь (8)-(11) при заміні в (10) і (11) знаку перед похідною $\frac{dx}{dt}$ на протилежний.

Висновки:

1. Теоретично досліджено та встановлено закономірності руху зернівки у вигляді математичних моделей динаміки руху твердої зернівки в потоці повітря, які відрізняється від відомих тим, що враховують дію бокових сил, концентрацію матеріалу, а застосування степеневого та штучно сформованого експоненціального закону розподілу повітря дало можливість підвищити розходження (розщеплення) траєкторій руху зернівок на 20%.

2. Розв'язок системи нелінійних диференціальних рівнянь із початковими умовами виконано в програмному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху зернівки в повітряному потоці, що дозволяє розраховувати їх траєкторії руху, які різняться коефіцієнтами парусності та визначити раціональні значення параметрів пневмогравітаційних та пневмоінерційних сепараторів.

Список літератури

1. Степаненко С. П., Котов Б. І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб. Глевах.* 2018. Вип. № 8 (107). С. 80–88.
2. Єрмак В. П. Обґрунтування способу сепарування насіння соняшника у повітряних потоках : дис. ... канд. техн. наук. Луганськ. 2003. 166 с.
3. Нестеренко О. В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу : автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЦНТУ. Кропивницький, 2017. 21 с.
4. Колодій О. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2015. 23 с.
5. Степаненко С. П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка* : зб. наук. пр. Серія : Механізація сільськогосподарського виробництва. 2008. Вип. 75. Т 1. С. 59-65.
6. Абдуєв М. М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2007. 20 с.
7. Крекот М. М. Обґрунтування параметрів процесу і розробка пневматичного сепаратора насіння овочевих культур : автореф. дис. ... канд. техн. наук / ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2015. 20 с.
8. До питання пневмогравітаційної сепарації зернових матеріалів / Котов Б. І. та ін. *Процеси та обладнання переробних та харчових виробництв*. 2017. Вип. 4(99). С.51-55.
9. Котов Б. І., Степаненко С. П. Закономірності руху частинок в пневмогравітаційному сепараторі при змінній швидкості горизонтального повітряного потоку. *Сільськогосподарські машини : зб. наук. статей* / Луцький нац. техн. ун. - т. Луцьк, 2016. Вип. 35. С.40-45.
10. Степаненко С. П., Котов Б. І. Дослідження закономірностей руху компонентів зернового матеріалу під час пневмогравітаційного фракціонування у вертикальному каналі. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб.* 2018. Вип. №7 (106). С.82-89.
11. Котов Б. І., Степаненко С. П. Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 50. С. 122–133.
12. Котов Б. І., Степаненко С. П. Математичне моделювання процесів поділу компонентів зернового матеріалу в комбінованому вібраційно-повітряному сепараторі. *Вібрації в техніці та технологіях : Всеукр. наук.-техн. журнал.* 2020. Вип. № 2 (97). С. 51–61.
13. Степаненко С. П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.05.11 . Глевах, 2021. 50 с.
14. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Вопросы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.
15. Малис А. Я., Демидов А. Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машгиз, 1962. 176 с.
16. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гос. изд. Техничко-теор. лит., 1950. 676 с.

17. Барский М. Д. Фракционирование порошков. М., 1980. 327 с.
18. Зуев Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1979. 344 с.
19. Нелюбов А. И., Ветров Е. Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение. 1977. 192 с.
20. Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. О траектории полета вращающейся сферической частицы. *Вісник ХНТУСГ*. Харків, 2009. Вип. 88. С. 54 – 61.
21. Степаненко С. П., Котов Б. І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб.* 2018. Вип. № 8 (107). С. 80–88.
22. Stepanenko S. Experimental study in a pneumatic microbioature separator with apparatus camera / S. Stepanenko, Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. // In: Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, vol. 12 (61), No. 1 . 2019. pp. 117-128.
23. Stepanenko S.P. Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment / Stepanenko S.P, Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Solomka O.V., Popyk P.S., Shvidia V.O. // *INMATEH - Agricultural Engineering* . Jan-Mar 2019, Vol. 57, Issue 1, p. 141-146.
24. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження): монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.

Referencis

1. Stepanenko, S.P. & Kotov, B.I. (2018). Osnovni kontseptual'ni polozhennia pnevmatychnoho fraktsionuvannia zernovykh materialiv [Basic conceptual provisions of pneumatic fractionation of grain materials]. *Mekhanizatsiia ta elektrifikatsiia sil's'koho hospodarstva : zahal'nodерж. zb. Hlevakha – Mechanization and electrification of agriculture: nationwide. zb. Glevakha, Vol. 8 (107), 80–88* [in Ukrainian].
2. Yermak V. P. (2003). Obgruntuvannia sposobu separuvannia nasinnia soniashnyka u povitrianykh potokakh [Substantiation of the method of separation of sunflower seeds in air streams]. *Candidate's thesis*. Science. Luhans'k [in Ukrainian].
3. Nesterenko, O.V. (2017). Obgruntuvannia parametriv pnevmoseparuiuchoho kanalu z bahatorivnevym vvedenniam zernovoho materialu [Substantiation of parameters of the pneumatic separating channel with multilevel introduction of grain material]. *Extended abstract of candidate's thesis*. TsNTU. Kropyvnyts'kyj [in Ukrainian].
4. Kolodij O. S. (2015). Obgruntuvannia konstruktyvno-tehnologichnykh parametriv pnevmohravitatsijnogo separatora nasinnia soniashnyka [Substantiation of constructive-technological parameters of pneumogravity separator of sunflower seeds]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Melitopol' [in Ukrainian].
5. Stepanenko, S. P. (2008). Doslidzhennia protsesu pnevmatychnoi separatsii nasinnia v kil'tsevomu zyzhahopodibnomu separatori [Research of the process of pneumatic separation of seeds in a ring zigzag separator]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. Petra Vasylenka : zb. nauk. pr. Serii : Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasylenko: coll. Science. etc. Series: Mechanization of agricultural production, Vol. 75, 1, 59-65*. [in Ukrainian].
6. Abduiev, M. M. (2007). Obgruntuvannia parametriv separatora z nakhylenym povitrianykh kanalom dlia rozdilennia zernovykh sumishej [Substantiation of parameters of the separator with the inclined air channel for separation of grain mixes]. *Extended abstract of candidate's thesis*. KhNTUSH im. P. Vasylenka. Kharkiv [in Ukrainian].
7. Krekot, M. M. (2015). Obgruntuvannia parametriv protsesu i rozrobka pnevmatychnoho separatora nasinnia ovochevykh kul'tur [Substantiation of process parameters and development of a pneumatic separator of vegetable seeds]. *Extended abstract of candidate's thesis*. KhNTUSH im. P. Vasylenka. Kharkiv [in Ukrainian].
8. Kotov, B. I., Spirin, A. V., Tverdokhlib, I. V., Stepanenko, S. P. & Shvydia, V.O. (2017). Do pyttannia pnevmohravitatsijnoi separatsii zernovykh materialiv [On the issue of pneumogravity separation of grain materials]. *Protsesy ta obladnannia pererobnykh ta kharchovykh vyrobnytstv – Processes and equipment of processing and food production , Issue 4 (99), 51-55*. [in Ukrainian].

9. Kotov B. I. & Stepanenko, S. P. (2016). Zakonomirnosti rukhu chastynok v pnevmohravitatsijnomu separatori pry zminnij shvydkosti horyzontal'noho povitrianoho potoku [Regularities of particle motion in a pneumogravity separator at a variable speed of horizontal air flow]. *Sil'skohospodars'ki mashyny : zb. nauk. statej – Agricultural machinery: Coll. Science. articles , Luts'kyj nats. tekhn. un - t. Luts'k, Issue 35*, 40-45. [in Ukrainian].
10. Stepanenko, S. P. & Kotov, B. I. (2018). Doslidzhennia zakonomirnostej rukhu komponentiv zernovoho materialu pid chas pnevmohravitatsijnoho fraktsionuvannia u vertykal'nomu kanali [Investigation of patterns of motion of grain material components during pneumogravity fractionation in the vertical channel.]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil's'koho hospodarstva : zahal'noderzh. zb. – Mechanization and electrification of agriculture: a national collection, Issue 7 (106)*, 82-89. [in Ukrainian].
11. Kotov, B. I. & Stepanenko, S. P. (2020). Osnovni teoretychni polozhennia separatsii zernovoho materialu v povitrianykh kanalakakh z nerivnomirnoiu shvydkistiu povitrianoho potoku [The main theoretical provisions of the separation of grain material in air ducts with uneven air flow rate.]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn : zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb – Design, manufacture and operation of agricultural machinery: nationwide. interdepartmental scientific and technical zb., Issue. 50*, 122–133. [in Ukrainian].
12. Kotov, B. I. & Stepanenko, S. P. (2020). Matematychni modeliuvannia protsesiv podilu komponentiv zernovoho materialu v kombinovanomu vibratsijno-povitrianoomu separatori [Mathematical modeling of processes of separation of grain material components in the combined vibration-air separator]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh : Vseukr. nauk.-tekhn. zhurnal – Vibrations in engineering and technologies: All-Ukrainian scientific and technical journal , Vol. 2 (97)*, 51–61. [in Ukrainian].
13. Stepanenko S. P. (2021). Mekhaniko-tekhnolohichne obgruntuvannia protsesiv i obladnannia bezreshitnoho fraktsionuvannia zernovykh materialiv [Mechanical and technological substantiation of processes and equipment of lattice fractionation of grain materials] . *Extended abstract of Doctor's thesis. Hlevakha*, [in Ukrainian].
14. Hortynskij, V. V., Demskyj, A. B. & Boryskyn, M. A. (1980). *Voprosy sepyarovanyia na zernopererabatyvaiuschykh predpriyatiy [Questions of separation at grain processing enterprises]*. Moskkow: Kolos [in Ukrainian].
15. Malys, A. Ya. & Demydov, A. R. (1962). *Mashyny dlia ochystky zerna vozduzhnym potokom [Machines for cleaning grain by air flow]* . Moskow: Mashhyz [in Ukrainian].
16. Lojtsianskyj, L. H. (1950). *Mekhanika zhydkosti y haza [Mechanics of liquid and gas]*. M.-L.: Hos. yzd. Tekhnyko-teor. lyt [in Ukrainian].
17. Barskyj, M. D. (1980). *Fraktsionyrovanye poroshkov [Fractionation of powders]*. Moskow [in Ukrainian].
18. Zuev, F. H. (1979). *Pnevmatycheskoe transportyrovanye na zernopererabatyvaiuschykh predpriyatiakh [Pneumatic transportation at grain processing plants]*. Moskow: Kolos [in Ukrainian].
19. Neliubov, A. Y. & Vetrov, E. F. (1977). *Pnevmosteparyruischiye systemy sel'skokhoziajstvennykh mashyn [Pneumatic separating systems of agricultural machines]*. Moskow: Mashynostoemye [in Ukrainian].
20. Ol'shanskyj, V. P. & Ol'shanskyj, S. V. (2009). O traektorii poleta vraschaishejsia sferycheskoj chastytisy [On the flight trajectory of a rotating spherical particle]. *Visnyk KhNTUSH – Bulletin of KhNTUSG, Issue. 88*, 54 - 61. [in Ukrainian].
21. Stepanenko, S. P. & Kotov, B. I. (2018). Osnovni kontseptual'ni polozhennia pnevmatichnoho fraktsionuvannia zernovykh materialiv [Basic conceptual provisions of pneumatic fractionation of grain materials]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil's'koho hospodarstva : zahal'noderzh. zb. – Mechanization and electrification of agriculture: nationwide. zb, Issue 8 (107)*, 80–88. [in Ukrainian].
22. Stepanenko S., Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. (2019). Experimental study in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera . In: *Bulletin of the Transilvania University of Brasov , Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, Vol. 12 (61), no. 1* , pp. 117-128 [in English]
23. Stepanenko, S.P., Rogovskii, I.L., Titova, L.L., Trokhaniak, V.I., Solomka, O.V., Popyk & P.S., Shvidiam V.O. (2019). Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment . *INMATEH - Agricultural Engineering. Jan-Mar, Vol. 57, Issue 1*, pp.141-146 [in English]
24. Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A., Stepanenko, S.P., Shvydya, V.O. & Lisetsky V.O. (2017). *Modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'iektakh pisliabzhyr'noi obrobky i zberihannia zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannia, okholodzhennia) [Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling)]* . Nizhyn: Vydavets' PP Lysenko M. M. [in Ukrainian].

Borys Kotov, Prof., DSc.

Podilsky State Agrarian and Technical University (PDATU), Kamyanets-Podilsky, Ukraine

Serhii Stepanenko, DSc., Senior Researcher

National Scientific Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", Glevakha, Fastiv district, Kyiv region, Ukraine

Theoretical Studies of the Motion of Grain Material Components With Artificially Formed Air Velocity Distribution in the Cross Section of the Channel

The purpose of research to formulate a mathematical description of the movement of components of grain material in pneumatic channels with artificially formed distribution of air velocity in the cross section of the channel to improve the quality of separation (trajectory divergence) of grain material components.

The article considers studies of grain separation in pneumatic channels with artificially formed air velocity distribution in the cross section of the channel, to determine the rational form and parameters of material supply and options for separation of grain material into fractions.

The regularities of grain motion in the form of mathematical models of the dynamics of solid particle motion in air flow are theoretically investigated and established, which differ from those known in that they take into account the action of lateral forces, material concentration, and the application of power law and artificially formed exponential air distribution law) trajectories.

The solution of the system of nonlinear differential equations with initial conditions is made in the MathCad software environment in the form of grain motion trajectories in air flow, allows to calculate their motion trajectories that differ in sailing coefficients and determine rational values of pneumogravity and pneumoinertia parameters. Using the obtained dependences for the development of air separators, it is possible to determine the initial velocity of entry and direction of entry of grains into the air stream, as well as to determine the trajectories of the material in the air ducts with lower material unloading.

Conclusions:

1. Theories of grain motion are theoretically investigated and established in the form of mathematical models of solid grain motion dynamics in air flow, which differ from those known in that they take into account the action of lateral forces, material concentration, and the application of power and artificial exponential law (splitting) of grain movement trajectories by 20%.

2. The solution of the system of nonlinear differential equations with initial conditions is made in the MathCad software environment in the form of grain motion trajectories in the air stream, which allows to calculate their motion trajectories differing in sailing coefficients and determine rational values of pneumogravity and pneumoinertial separators.

air flow, grain, Zhukovsky and Magnus forces, trajectory, separation process, pneumatic separator

Одержано (Received) 16.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 24.10.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 631.33.02

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.36-45>**М. Л. Заєць**, доц., канд. техн. наук*Поліський національний університет, м. Житомир, Україна**e-mail: mzaec81@gmail.com*

Результати дослідження впливу рівномірності розподілу пожнивних решток на глибину сівби та урожайність сільськогосподарських культур

Встановлено, що підвищення якості розподілу пожнивних решток зернозбиральними комбайнами з подрібнювачами соломи по площі поля в значній мірі впливають на параметри регулювання та забезпечення глибини сівби польових культур та їх врожайність. Отримано математичні моделі та графічні залежності для визначення динаміки врожаю від нерівномірності розподілу решток соломи. Виявлено основні показники роботи зернозбиральних машин та умови, в яких вони використовуються та вплив відповідних факторів на ці показники. Результати практичних досліджень експериментально підтверджені в польових умовах.

сівба, розподіл соломи, глибина заробки, нерівномірність, математична модель

Постановка проблеми. Основним питанням сьогодення виробників сільськогосподарської продукції є дилема по встановленню глибини заробки насіння сівалками. І на мій погляд – це один із найважливіших показників, який впливає на врожайність будь-якої польової культури. Отже, які параметри потрібно враховувати при виборі глибини закладання насіння. Перший параметр – чим дрібніше насіння, тим менша глибина закладання. І навпаки, що більші параметри насінини, то глибше можна їх сіяти. Це пов'язано з тим, що у великому насінні, більше запасу поживних речовин для появи сходів у порівнянні з дрібним насінням і йому потрібно менша кількість вологи. Другий параметр, який застосовується, в основному, до ярих культур. Чим раніше ми сіємо, тим менше глибина заробки, і чим пізніше сіємо, тим більша глибина закладання. Це пов'язано з двома факторами:

а) при ранній сівбі оптимальна температура для сівби буде на поверхні ґрунту, при пізній сівбі оптимальна температура ґрунту буде досягнута на більшій глибині;

б) при ранній сівбі вологи буде достатньо для швидкого проростання насіння у верхніх шарах ґрунту, при пізнішій сівбі волога переміщується в більш глибокі шари, і ми змушені заглиблювати робочі органи. Третій параметр, який ми повинні враховувати при глибині загортання насіння – це гранулометричний склад ґрунту. На важких суглинистих ґрунтах глибина заробки менша, для легких супіщаних ґрунтів глибина сівби зростає.

Для дрібнонасінневих культур якість сівби та глибина закладання насіння відіграють важливу роль. Для них коткування до і після сівби та робота анкерними або дисковими сошниками, які в достатній мірі витримують глибину заробки – це обов'язкові умови, якщо ви хочете отримати максимальний врожай. Якщо говорити про культури з великим насінням, наприклад, соя або горох, то до їхньої якості сівби не пред'являються такі високі вимоги, і в посушливих умовах глибину закладання можна

збільшувати без значної втрати врожаю. Тобто, вибір робочої глибини заробки насіння сільськогосподарських культур це багатофакторна задача, основними факторами, якої є вологість та температура ґрунту. Тому рівномірність розподілу пожнивних решток попередньо зібраних культур, якими ми можемо змінювати ці фактори, що в значній мірі можуть впливати на параметр оптимізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями [1] доведено зменшення втрати вологи за рахунок розподілу по поверхні поля пожнивних решток попередників. Водний баланс, передбачає перехідні залишки вологи. За даними досліджень Ф. Бакірова і А. Коряковський (2011), мульчування поверхні ґрунту солом'яною мульчою дозволило за теплий період літа-осені накопичити додатково по дрібному розпушування 27 мм і по нульового обробітку 30 мм вологи в порівнянні з контрольним варіантом. Мульчування (розкидання соломи) при нульовій обробці дозволяє ґрунту засвоїти 59% осінніх опадів, тоді як оранка-всього 22%. За рахунок утримання вологи стебловими рештками зернових колосових культур в сівозміні можна суттєво підвищити сумарне накопичення вологи за період сівозміни [2].

Досвід фермерів США свідчить про те, що рослинні залишки (особливо вертикально розташовані) відмінний профілактичний засіб проти ерозії ґрунтів. Збережені рослинні залишки зернових колосових культур, особливо при вузькорядній (10-15 см) сівбі, можуть покращити снігозатримання і накопичення вологи в ґрунті [1] (Nielsen, 1998). Відомо, що висота (понад 30 см) стерні пшениці зменшує швидкість вітру на висоті 15 см майже на 80% в порівнянні з ділянками, де такі ж рослинні залишки були подрібнені (проведено лущення). Рослинні залишки зернових колосових культур і кукурудзи захищають від ерозії та сприяють накопиченню вологи і зменшення дефляції на посівах зернових та технічних культур. Тому одним із способів зберегти вологу в ґрунті – постійно захищати його вегетуючими рослинами або їх рослинними залишками. Необхідною умовою для цього є перехід на технологію з мінімальним впливом на ґрунт, тобто No-till, Strip-till або Mini-till.

Постановка завдання. Враховуючи те, що процес розподілу пожнивних стеблових решток при подрібненні та розкиданні носить випадковий характер, і визначається великою кількістю факторів, які неможливо повністю врахувати, то цей процес можна розглядати у відповідності із законами теорії ймовірності [3, 4]. З метою встановлення закономірностей від рівномірності розподілу подрібнених рослинних пожнивних решток зернозбиральними комбайнами на збереження вологи в ґрунті, їх для подальшого дослідження на зміну глибини заробки насіння та врожайність культур.

Виклад основного матеріалу. Використавши розроблену методику експериментальних досліджень було реалізовано пошуковий багатофакторний експеримент $N=2^3$. Повторність дослідів - триразова. При проведенні експериментів проводилась сівба насіння сої та озимого ріпаку, попередник озима пшениця. При проведенні експерименту по визначенню рівномірності розподілу пожнивних решток та вплив на збереження вологи в ґрунті, використовували два зернозбиральні комбайни John Deer S760 та Палєсьє GS12 з розкидачами подрібненої маси по ширині захвату жатки комбайну (рис. 1).



Рисунок 1 – Загальний вигляд поля зі сходами сої після збирання різними комбайнами
Джерело: розроблено автором

З представленого рисунка 1 видно, що при більш рівномірному розподілі соломи за шириною захвату жатки, волога зберігається в більшій мірі, ніж при концентрованому розподілі по центру збиральної машини. Рівномірний розподіл соломи краще впливає на збереження вологи в ґрунті та забезпечує більш рівномірні сходи рослин (рис. 2).



Рисунок 2 – Сходи озимого ріпаку висіяного за технологією No-till із збереженням стеблового покриву попередника
Джерело: розроблено автором

Проводячи пошуковий багатофакторний експеримент, розглядалися наступні фактори: S – ширина розподілу подрібненої соломи за комбайном, W – відносна вологість ґрунту, L – довжина частинки подрібненої соломи.

Дані фактори були відібрані як найбільш значущі методом апріорного ранжування. Особливість методу апріорного ранжування факторів полягає в тому, що фактори, які згідно з апріорною інформацією можуть мати суттєвий вплив, ранжуються в порядку зменшення внесеного ними вкладу. Вклад кожного фактору оцінюється за

величиною рангу, який відведений дослідником даному фактору при ранжируванні всіх факторів з урахуванням їхнього передбачуваного впливу на параметри оптимізації. При збиранні думок шляхом опитування фахівців кожному з них пропонується заповнити анкету, в якій перераховані фактори, їх розмірність та передбачувані інтервали варіювання. За критерій оптимізації взято урожайність та значення глибини заробки насіння.

Інтервали і рівні варіювання факторів пошукового експерименту 2^3 представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Інтервали і рівні варіювання факторів пошукового експерименту 2^3 для різних збиральних машин John Deer S760 (машина 1) та Палесьє GS12 (машина 2)

Показники	Кодовані значення	Фактори					
		S , м		W , %		L , м	
		машина 1	машина 2	машина 1	машина 2	машина 1	машина 2
Верхній рівень	+1	10,5	7,0	15	12	12	15
Основний рівень	0	9,5	6,0	10	10	10	10
Нижній рівень	-1	8,5	5,0	5	8	8	5
Інтервал варіювання	ΔX_i	1,0	1,0	5	2	2	5

Джерело: розроблено автором на підставі [4], [9]

План пошукового експерименту в кодовому масштабі представлений у табл. 2.

У табл. 3. приведені результати отриманих коефіцієнтів варіації у всіх дослідках експерименту. Для кожного дослідку розрахована порядкова дисперсія S_{yi}^2 . Розрахункова величина критерію Кохрена склала $G_{розр.}=0,22$. Табличне значення критерію $G_{табл}=0,32$ [4, 9].

Таблиця 2 - Матриця планування багатофакторного експерименту 2^3 .

№ дослідку п/п	Кодові позначення			у
	X_1	X_2	X_3	
1	+1	+1	+1	-
2	-1	+1	+1	-
3	+1	-1	+1	-
4	-1	-1	+1	-
5	+1	+1	-1	-
6	-1	+1	-1	-
7	+1	-1	-1	-
8	-1	-1	-1	-

Джерело: розроблено автором на підставі [4], [9]

Маючи виконання умови $G_{\text{розр.}} < G_{\text{табл.}}$ ряди дисперсії експерименту можна прийняти однорідними. Дисперсія досліду експерименту становить $S_y^2 = 7,26$.

За результатами експерименту рівняння регресії буде мати наступний вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

де x_1 – ширина розподілу подрібненої соломи за комбайном, S ;

x_2 – відносна вологість ґрунту, W ;

x_3 – довжина частинки подрібненої соломи, L .

Для розрахунку коефіцієнтів моделі в табл. 3 приведена розширена матриця планування і результати дослідів [9,4].

Таблиця 3 – Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії

Номер досліду	x_0		x_1		x_2		x_3		x_1x_2		x_1x_3		x_2x_3		$x_1x_2x_3$		y	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	48,6	65,8
2	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	59,2	63,8
3	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	54,8	76,2
4	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	39,6	83,4
5	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	65,5	86,7
6	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	43,6	76,6
7	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	58,3	56,2
8	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	64,5	61,5

Джерело: розроблено автором на підставі [4], [9]

Чисельні значення коефіцієнтів регресії вийшли рівними (машина 1):

$B_0=44,23$; $b_1=3,12$; $b_2=16,54$; $b_3=-12,54$; $b_{12}=-1,35$; $b_{13}=-0,84$; $b_{23}=-14,32$; $b_{123}=0,67$.

машина 2: $B_0=71,27$; $b_1=5,62$; $b_2=18,54$; $b_3=-19,21$; $b_{12}=-2,64$; $b_{13}=-1,56$; $b_{23}=-21,32$; $b_{123}=0,91$.

Дисперсія оцінок коефіцієнтів і середньоквадратична помилка відповідно рівні:

$$S_{b_i}^2 = 0,24; \quad S_{b_i} = 0,489.$$

Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії дорівнює $\Delta b_i = 0,78$.

Порівнявши абсолютні значення коефіцієнтів регресії з абсолютною величиною їхнього довірчого інтервалу незначущі коефіцієнти регресії в подальших розрахунках виключаємо.

За результатами багатofакторного експерименту рівняння регресії будуть мати вигляд:

Для машини 1

$$y = 44,23 - 3,12x_1 + 16,54x_2 - 12,54x_3 - 1,35x_1x_2 + 0,84x_1x_3 - 14,32x_2x_3 + 0,67x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Для машини 2

$$y = 71,27 - 5,62x_1 + 18,54x_2 - 19,21x_3 - 2,64x_1x_2 - 21,32x_2x_3 + 1,56x_1x_3 + 0,91x_1x_2x_3. \quad (3)$$

Уточнюючи адекватність отриманих моделей визначали за допомогою отриманих рівнянь регресії розрахункові значення відзиву (табл. 4.). Визначивши дисперсію неадекватності і розрахункове значення F - критерію Фішера, гіпотеза адекватності приймається, оскільки розрахункове значення критерію $F=0,42$ менше значення $F_{\text{табл.}}=2,35$ при 5%-му рівні значимості, а, отже, отримані аналітичні моделі з точністю 95% описують характер впливу обраних факторів на параметр оптимізації.

Вплив факторів визначимо за даними діаграми (рис 1.).

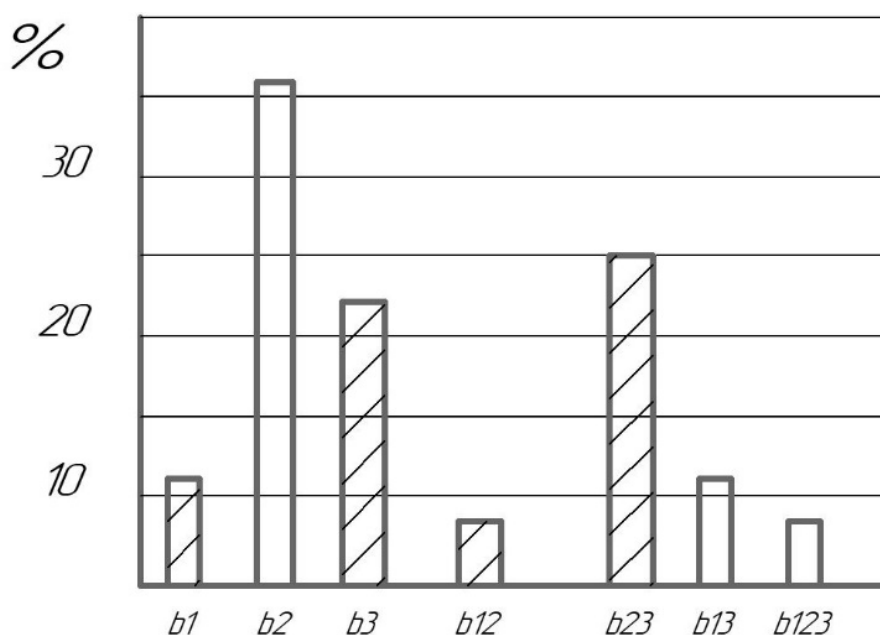


Рисунок 1 – Вплив значущих факторів і їхніх взаємодій (заштриховано для негативних коефіцієнтів, не заштриховано - для позитивних)

Джерело: розроблено автором на підставі [4], [9]

Аналізуючи діаграму, можна відзначити, що найбільше глибина заробки насіння культур залежить від вологості ґрунту, яка накопичується та (x_2) і довжини частинок соломи, яка розподіляється за комбайном (x_3). Помітний вплив співвідношення ширини розподілу пожнивних решток і довжини подрібненої соломи ($x_1 x_3$).

Вплив інших факторів на критерій оптимізації незначний. Тому для подальшого вивчення обираємо три найбільш значимі фактори - ширина розподілу подрібненої соломи за комбайном, S ; x_2 - відносна вологість ґрунту, W ; x_3 - довжина частинки подрібненої соломи, L .

Для визначення значення факторів, що забезпечують оптимальне значення глибини заробки насіння, розв'язували наступну систему:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = -3,9 - 2,17x_2 - 2,47x_2x_3 + 2,36x_3x_2 \\ \frac{dy}{dx_2} = 19,44 - 2,166x_1 - 12,43x_3 - 2,47x_1x_3 \\ \frac{dy}{dx_3} = -11,17 - 12,43x_2 + 2,43x_1 + 2,36x_1x_2 \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язавши систему рівнянь, визначили оптимальні значення параметрів після декодування рівнів: x_1 - ширина розподілу подрібненої соломи за комбайном, $S = 9,54 \dots 10,86$ м; x_2 - відносна вологість ґрунту, $W = 12 \dots 14\%$; x_3 - довжина частинки подрібненої соломи, $L = 8,5 \dots 10,25$ мм.

Таблиця 4 – Експериментальні і розрахункові дані глибини заробки насіння

Номер дослідів	Уі експер.		Уі розр.		Δу		Δу ²	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	58,06	64,12	58,40	62,5	0,34	1,62	0,1156	2,62
2	69,20	75,23	68,86	76,36	0,34	-1,13	0,16	1,27
3	34,23	54,36	36,15	59,4	-1,92	-5,04	3,67	25,4
4	49,75	57,58	51,84	52,86	-2,09	4,72	4,36	22,27
5	45,53	86,47	46,14	86,82	-0,62	-0,35	0,37	0,12
6	96,44	112,56	99,82	111,87	-3,38	0,69	11,42	0,47
7	49,89	58,45	45,95	61,24	3,94	-2,79	15,5	7,78
8	54,33	75,56	52,28	78,21	2,05	-2,65	4,2	7,02

Джерело: розроблено автором на підставі [4], [9]

Графічні залежності глибини сівби від рівномірності розподілу пожнивних решток за шириною захвату жатки зернозбирального комбайна від відносної вологості ґрунту та довжини частинок подрібненої незернової частини на рис. 2. і рис.3.

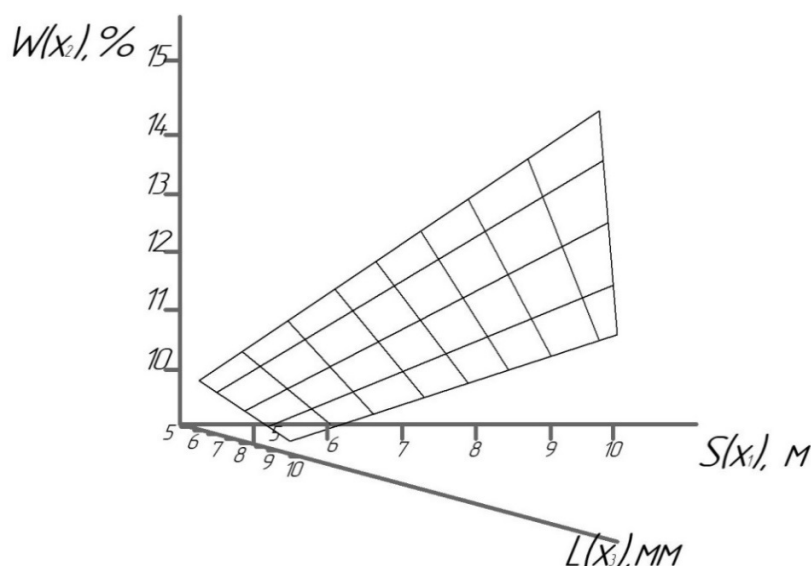


Рисунок 2 – Залежність глибини заробки насіння від розподілу пожнивних решток на полі (John Deer S760 (машина 1))

Джерело: розроблено автором

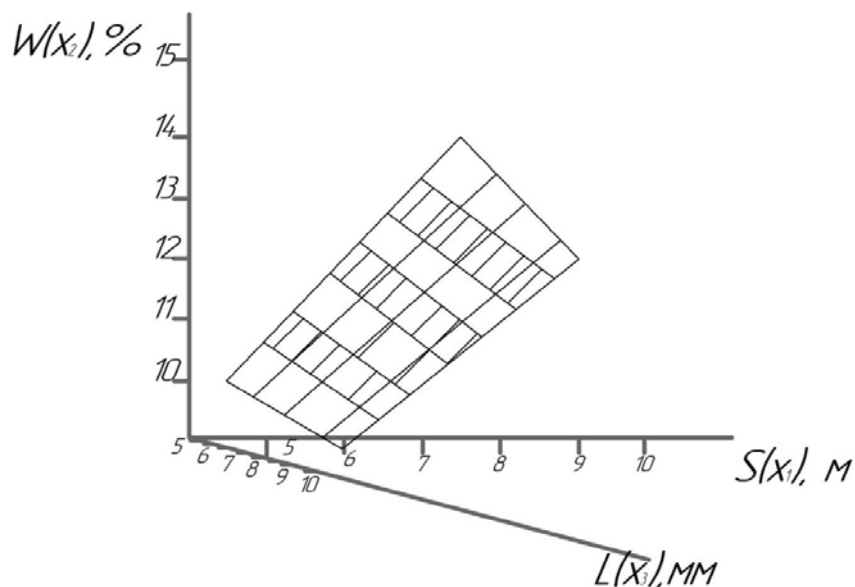


Рисунок 3 – Залежність глибини заробки насіння від розподілу пожнивних решток на полі (Палесьє GS12 (машина 2))

Джерело: розроблено автором

Провівши аналіз отриманих графічних залежностей, можна зробити наступні висновки.

Зі зростанням довжини фракції подрібнення стеблової частини нерівномірність розподілу зростає по ширині захвату жатки комбайна, як для 1-ї машини з розподільником соломи, так і для 2-ї машини без розподільника.

Глибину сівби можна зменшувати $h = 26..38$ мм після збирання першою машиною зі зростанням ширини розкидання, для другої машини – глибину закладання насіння необхідно збільшувати до $h = 36..42$ мм, у зв'язку із нерівномірним розподілом пожнивних решток та зменшення вологості ґрунту.

Сівбу проводили комплексом для підґрунторозкидного способу сівби “Партнер - 7,5” у порівнянні і звичайним рядковим висівом (рис. 4, 5.). Що в свою чергу також дозволяє зменшити глибину заробки насіння за рахунок більш рівномірного розподілу рослин по полю та зменшити випаровування води.



Рисунок 4 – Сходи рослин після сівби рядковим і розкидним способом

Джерело: розроблено автором



Рисунок 5 – Посівний комплекс Партнер - 7,5

Джерело: розроблено автором

Висновки. При проведенні експерименту по визначенню рівномірності розподілу поживних решток та вплив на збереження вологи в ґрунті, використовували два зернозбиральні комбайни John Deer S760 та Палесье GS12 з розкидачами подрібненої маси по ширині захвату жатки комбайну. Встановлено та визначено три найбільш значимі фактори, які впливають на зміну глибини сівби сільськогосподарських культур – x_1 ширина розподілу подрібненої соломи за комбайном, $S=9,54...10,86$ м; x_2 – відносна вологість ґрунту, $W=12..14\%$; x_3 - довжина частинки подрібненої соломи, $L= 8,5...10,25$ мм.

Зі зростанням довжини фракції подрібнення стеблової частини нерівномірність розподілу зростає по ширині захвату жатки комбайна, як для 1-ї машини з розподільником соломи, так і для 2-ї машини без розподільника.

Глибину сівби можна зменшувати $h= 26..38$ мм після збирання першою машиною зі зростанням ширини розкидання, для другої машини – глибину закладання насіння необхідно збільшувати до $h= 36..42$ мм, у зв'язку із нерівномірним розподілом поживних решток та зменшення вологості ґрунту.

Список літератури

1. Коряковский А. В., Бакіров Ф. Г. Саморозпушення ґрунту під впливом солом'яної мульчі. *Агрономія та лісове господарство*. 2011. Вип. 22. С. 21-23.
2. Nielsen K, et al. Sustained oscillations in glycolysis: an experimental and theoretical study of chaotic and complex periodic behavior and of quenching of simple oscillations. *Biophys Chem* (1998). 72 (1-2). P. 49-62.
3. Заєць М. Л. Обґрунтування оптимальної величини ексцентриситету установки розподільника сошника для розкидного способу сівби сільськогосподарських культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин*. 2008. Вип. 38. С. 87–91.
4. Заєць М. Л. Не ігноруймо експериментальні сошники з комбінованим розподільником посівного матеріалу. *Зерно і хліб*. 2013. № 2 (70). С. 36-39.
5. Технологічні основи проектування і виготовлення посівних машин: монографія / Б.М. Гевко та ін. Тернопіль: Вид. ТНТУ імені Івана Пулюя, 2013. 238 с.
6. Бахмутов В. А. Влияние равномерности размещения растений по площади на урожайность. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1981. №5. С. 9-11.
7. Власенко В.М. Екологічні вимоги до ґрунтообробного знаряддя і посівних машин. *Трактори і сільськогосподарські машини*. 1993. №9. С. 14-17.
8. Спосіб визначення якості розподілу сипких матеріалів вздовж рядка: пат. 34019 Україна : МПК А01С 7/00. № у 2008 02025 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 25.07.20008, Бюл. № 14.

9. Доспехов Б.А. Планирование полевого опыта и статистическая обработка его данных. М.: Колос, 1972. 207с.

References

1. Koriakovskiy, A.V. & Bakirov, F.H. (2011). Samorozpushennia gruntu pid vplyvom solomianoï mulchi [Self-loosening of the soil under the influence of straw mulch]. *Ahronomiia ta lisove hospodarstvo - Agronomy and forestry*, Vol. 22, 21-23. [in Ukrainian].
2. Nielsen, K et al. (1998). Sustained oscillations in glycolysis: an experimental and theoretical study of chaotic and complex periodic behavior and of quenching of simple oscillations. *Biophys Chem.*, 72(1-2), 49-62. [in Belgium].
3. Zayets, M.L. (2008). Obgruntuvannia optymalnoi velychyny ekstsentrysytetu ustanovky rozpodilnyka soshnyka dlia rozkydnoho sposobu sivby silskohospodarskykh kultur [Substantiation of the optimal value of the eccentricity of the coult distributor installation for the spreading method of sowing crops]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s.-h. mashyn – Design, production and operation of agricultural machines*, Vol. 38, 87–91. [in Ukrainian].
4. Zayets, M. L. (2013). Ne ihnoruimo eksperymentalni soshnyky z kombinovanyim rozpodiliuvachem posivnoho material [Do not ignore the experimental coulters with a combined seed distributor]. *Zerno i khlib – Grain and bread*, 2 (70), 36-39. [in Ukrainian].
5. Hevko, B.M., Liashchuk, O.L., Pavelchuk, Yu.F. et al. (2013). *Tekhnolohichni osnovy proektuvannia ta vyhotovlennia posivnykh mashyn [Technological bases of designing and manufacturing of seeding machines]*. Ternopil: TNTU imeni Ivana Puluia [in Ukrainian].
6. Bakhmutov, V.A. (1981). Vliyanye ravnomernosti razmeshcheniya rastenyi po ploshchady na urozhainost [Influence of uniformity of placement of plants on the area on productivity]. *Mekhanizatsiia y elektrifikatsiia selskoho khoziaistva – Mechanization and electrification of agriculture*, 5, 9-11. [in Ukrainian].
7. Vlasenko, V.M. (1993). Ekolohichni vymohy do gruntoobrobnoho znariaddia i posivnykh mashyn [Environmental requirements for tillage implements and sowing machines]. *Traktory i silskohospodarski mashyny – Tractors and agricultural machinery*, 9, 14-17. [in Ukrainian].
8. Sysolin, P.V., Osypov, I.M. & Sysolina, I.P. (2008). Ukraine Patent No. 34019. Kyiv.
9. Dospikhov, V. A. (1972). *Planyrovanye polevoho opyta y statystycheskaia obrabotka ego dannykh [Planning of field experience and statistical processing of its data]*. Moscow: Kolos [in Russian].

Maksym Zayets, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Polesie National University, Zhitomir, Ukraine

Results of the Study of the Influence of the Uniformity of the Distribution of Crop Residues on the Sowing Depth and Productivity of Industrial Crops

The purpose of this article is to raise such an important issue as soil moisture retention during agricultural production. Also investigate the influence of methods and means of implementation of works that reduce the loss of precious moisture and the influence of these factors on the dynamics of future harvests, by varying the technological parameters of sowing field crops, such as seed depth, row spacing or sowing method.

It is established that improving the quality of distribution of crop residues by combine harvesters with straw shredders over the field area significantly affects the parameters of regulation and ensuring the sowing depth of field crops and their yield. Mathematical models and graphical dependences are obtained to determine the dynamics of the harvest, and as a result of adjusting the technological parameters of the sowing process of field crops, from the uneven distribution of straw residues. The main indicators of grain harvesters operation and conditions in which they are used, and the influence of relevant factors on the technological indicators of laying the future harvest. The results of practical research have been experimentally confirmed in the field. The three most significant factors influencing the change of sowing depth of agricultural crops are determined - x1 width of distribution of crushed straw by combine, $S = 9.54 \dots 10.86$ m; x2 - relative soil moisture, $W = 12..14\%$; x3 - the length of the particle of chopped straw, $L = 8.5 \dots 10.25$ mm.

The sowing depth can be reduced $h = 26..38$ mm after harvesting by the first machine with increasing spreading width, for the second machine - the depth of seed placement should be increased to $h = 36..42$ mm, due to the uneven distribution of crop residues and reduced humidity soil.

sowing, straw distribution, earning depth, unevenness, mathematical model

Одержано (Received) 04.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 09.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 631.354.2.028

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.46-53>**В.А. Головльов, інж., О.М. Леженкін, проф., д-р техн. наук***Таврійський державний агротехнологічний університет ім. Дмитра Моторного, Мелітополь, Україна**e-mail: viktor.holovlov@tsatu.edu.ua, lan2810@ukr.net*

Експериментальні дослідження робочого процесу пневмотранспортера обчісаного вороху

У статі наводяться переваги збирання зернових культур методом обчісування на корені з подальшою доробкою обчісаного вороху на стаціонарному пункті в порівнянні з комбайновим збиранням. Збирання цією технологією виконується причіпною збиральною машиною, яка складається з обчісуючого пристрою, ходової частини, транспортуючої системи. Параметри пневмотранспортера збиральної машини є недостатньо обґрунтовані, тому подальшому наводяться результати експериментальних досліджень технологічного процесу пневмотранспортера для транспортування обчісаного вороху зернових у причіп – візок, а саме дальність польоту обчісаного вороху в залежності від частоти обертання валу відцентрового вентилятору, питомої подачі вихідного матеріалу та кута нахилу рухомої заслінки.

обчісаний ворох, обчісування рослин, фактори, збиральна машина, пневмотранспортер, експеримент, експериментальні дослідження

Постановка проблеми. Як доказано багаторічними дослідженнями професора Шабанова П.А [1] збирання зернових культур методом обчісування рослин на корені має багато переваг перед традиційним комбайновим збиранням шляхом зрізування рослин та обмолотом їх у молотарці комбайну. Найбільш доцільно це використовувати цей метод у стаціонарному варіанті, тобто обчісувати рослини в полі з доробкою обчісаного вороху на стаціонарному пункті [2].

Для реалізації цієї технології необхідно мати причіпну збиральну машину з обчісуючими робочими органами, колісний трактор для її агрегування причіп – візок для збору обчісаного вороху та стаціонарний агрегат для доробки обчісаного вороху.

Якщо розглянути збиральну машину, то вона містить обчісуючий пристрій, шнековий транспортер, шнековий транспортер, та ходову систему [3,4].

Що стосується обчісуючого пристрою то він обґрунтований в достатній мірі в роботі [5].

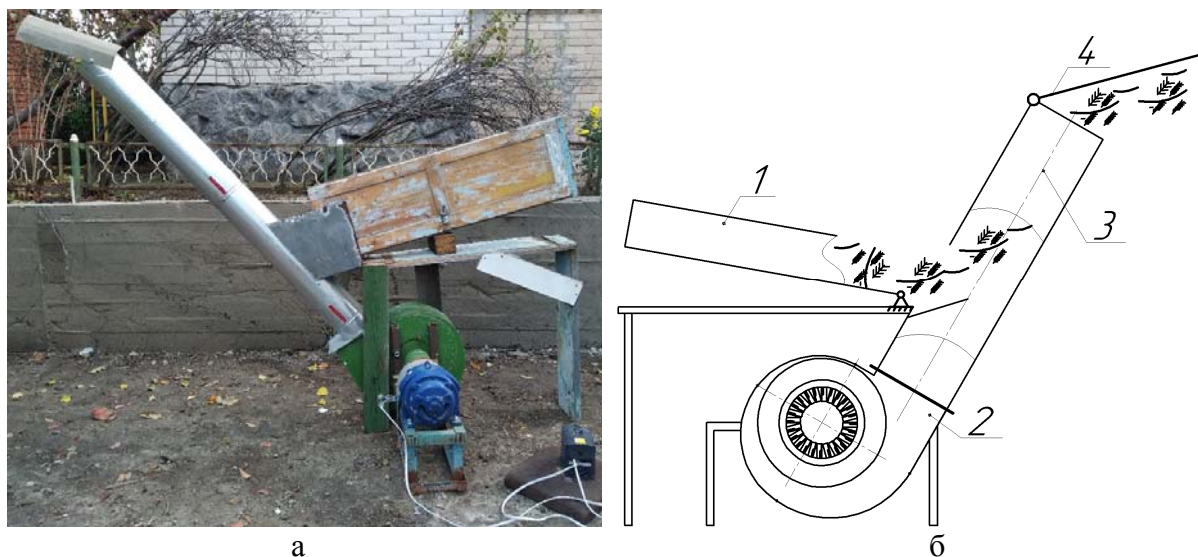
Але ж пневмотранспортер потребує обґрунтування його конструктивних, кінематичних та технологічних параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні основи функціонування пневмотранспортерів викладені в роботі [6]. Практичні рекомендації щодо роботи пневмотранспортерів в галузі сільськогосподарського виробництва наведені в роботах [7,8]. Але ж в цих роботах розглянуто питання транспортування зерна. В збиральній машині пневмотранспортер виконує функцію транспортування обчісаного вороху в причіп. Обчісаний ворох по своїм аеродинамічним властивостям суттєво відрізняється від зерна, тому що є чотирьох компонентною сумішшю (вільне зерно, солома, обірвані колоски, полова), тому виникає задача обґрунтування саме пневмотранспортеру обчісаного вороху.

Постановка завдання. Експериментально дослідити роботу пневмотранспортеру з метою побудування регресійної моделі, яка в подальшому може дозволити визначити раціональні параметри та режими функціонування пневмотранспортеру.

Виклад основного матеріалу. Для проведення досліджень було виготовлено експериментальну лабораторну установку технологічну схему якої наведено на рис. 1 б, загальний вид рис. 1 а. Технологічний процес пневмотранспортеру відбувається наступним чином. Обчісаний ворох за допомогою гравітаційного транспортеру 1 дозовано подається до каналу пневмотранспортеру 3, де повітряний потік, який створюється відцентровим вентилятором 2 підхоплює обчісаний ворох і подає його до виходу. Траєкторія руху та дальність польоту вороху залежить від положення рухомої заслінки 4.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням математичної теорії планування експерименту. Після проведення аналізу переваг та недоліків різноманітних планів [9,10,11] був обраний некомпозиційний трьохрівневий план другого порядку Бокса – Бенкіна [12].



1 – гравітаційний транспортер; 2 – відцентровий вентилятор; 3 – пневмотранспортер; 4 – рухома заслінка

Рисунок 1 – Лабораторна установка пневмотранспортеру причіпного збирального модулю:
а – загальний вигляд; б – технологічна схема

Джерело: розроблено авторами

Рівняння регресії для даного плану має вид [9]:

$$y = b_0 + \sum_{l < x < k} b_l x_l + \sum_i b_{il} x_i + \sum_{l < x < k} b_{il} x_i^2, \quad (1)$$

де y – вибіркова оцінка функції відгуку;

b_0, b_l, b_{il}, b_{il} – коефіцієнти регресії, які є оцінками теоретичних коефіцієнтів;

x_i – незалежні змінні (фактори).

Для оцінки ефективності функціонування пневмотранспортеру була використана функція відгуку, яка характеризує дальність польоту вороху. Така функція відгуку була обрана у зв'язку з необхідністю повноцінного завантаження причепа – візка для збирання обчісаного вороху.

Аналіз факторів дозволив обрати найбільш вагомі показники, а саме частоту обертання відцентрового вентилятора, питому подачу вихідного матеріалу, та кут нахилу рухомої заслінки [13].

Таким чином виконувався повнофакторний експеримент на трьох рівнях, для трьох факторів, який оцінювався однією функцією відгуку.

В загальному вигляді математична моделі має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (2)$$

де y – функція відгуку, характеризуюча дальність польоту обчисаного вороху;

x_1 – частота обертання валу відцентрового вентилятора;

x_2 – питома подача вихідного матеріалу;

x_3 – кут нахилу рухомої заслінки;

$b_0, b_1, b_2, b_3, \dots$ – коефіцієнти регресії.

Використовуючи результати теоретичних досліджень, моделювання та аналізу літературних джерел [14, 15] були визначені границі значень факторів, які приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторами

Рівень і інтервал варіювання факторами	Фактори		
	частота роботи електродвигуна, Гц (частота обертання валу вентилятора, ω рад/с)	подача вихідного матеріалу, q кг/с;	кут нахилу рухомої заслінки, α град.
	x_1	x_2	x_3
Верхній рівень (+)	40 (128)	0,4	20
Основний рівень (0)	35 (107)	0,3	10
Нижній рівень (-)	30 (90)	0,2	0
Інтервал варіювання	5	0,1	10

Джерело: [13]

Для проведення експерименту була складена матриця планування експерименту, у якій нижній рівень позначався (-), верхній (+), основний (0), яка приведена в таблиці 2.

Таблиця 2 – Матриця некомпозиційного трьохрівневого плану другого порядку для трьох факторів

Номер досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0
2	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0
3	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0
4	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0

Продовження таблиці 2

5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+
7	+	+	0	–	0	–	0	+	0	+
8	+	–	0	+	0	–	0	+	0	+
9	+	–	0	–	0	+	0	+	0	+
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+
12	+	0	+	–	0	0	–	0	+	+
13	+	0	–	+	0	0	–	0	+	+
14	+	0	–	–	0	0	+	0	+	+
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Джерело: розроблено авторами

Для проведення розрахунку коефіцієнтів регресії були використані наступні формули [13]:

$$\begin{cases} b_0 = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^N Y_{0n}; \\ b_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{15} x_{0j} y_j; \\ b_{il} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} x_{lj} y_j; \\ b_{il} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} y_j - \frac{1}{16} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum Y_0. \end{cases}$$

Після підстановки в формули (3) числових значень функції відгуку були визначені коефіцієнти рівняння регресії :

$$b_0 = 3,5;$$

$$b_1 = 0,94;$$

$$b_2 = -0,34;$$

$$b_3 = 0,73;$$

$$b_{12} = 0,05;$$

$$b_{13} = -0,025;$$

$$b_{23} = 0,025;$$

$$b_{11} = -0,475;$$

$$b_{22} = 0,125;$$

$$b_{33} = 0,05;$$

Перевірка значущості коефіцієнтів проводилася за критеріями Стюдента, для чого спочатку була визначена дисперсія відтворюваності $S^2\{y\}$:

$$S^2\{y\} = \frac{S_E}{n_0 - 1} \quad (4)$$

де S_E – дисперсія, яка характеризує помилку досліду;

n_0 – кількість дослідів у центрі плану

Дисперсія, яка характеризує помилку дослідів визначили за формулою

$$S_E = \sum (Y_{0n} - \bar{Y}_{0n})^2 \quad (5)$$

Для визначення дисперсії помилок при визначенні коефіцієнтів регресії були використані наступні формули [11]:

$$\begin{aligned} S^2 \{b_0\} &= \frac{1}{3} S^2 \{y\}; \\ S^2 \{b_i\} &= \frac{1}{8} S^2 \{y\}; \\ S^2 \{b_{il}\} &= \frac{1}{4} S^2 \{y\}; \\ S^2 \{b_{ii}\} &= \frac{13}{48} S^2 \{y\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Довірчі інтервали були визначені за формулою [11]:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm t_T S^2 \{b_0\}; \\ \Delta b_i &= \pm t_T S^2 \{b_i\}; \\ \Delta b_{il} &= \pm t_T S^2 \{b_{il}\}; \\ \Delta b_{ii} &= \pm t_T S^2 \{b_{ii}\}. \end{aligned} \quad (7)$$

де t_T – критерій Стюдента.

Критерій Стюдента визначається за допомогою таблиць. У даному випадку $t_T = 4,3$ [11].

Після розрахунків за формулами (6) та (7) були отримані значення довірчих інтервалів:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,01419; \\ \Delta b_i &= \pm 0,05375; \\ \Delta b_{il} &= \pm 0,01075; \\ \Delta b_{ii} &= \pm 0,01161. \end{aligned}$$

Отримані в результаті розрахунків довірчі інтервали коефіцієнтів b_0, b_i, b_{il}, b_{ii} , порівнюються з числовими значеннями коефіцієнтів регресії. У випадку якщо числове значення коефіцієнта регресії перевищує довірчий інтервал приймається рішення про значущість коефіцієнтів регресії.

У нашому випадку всі коефіцієнти регресії значущі. Тому можемо записати рівняння регресії:

$$\begin{aligned} y = & 3,5 + 0,94x_1 + 0,34x_2 + 0,73x_3 + 0,05x_1x_2 - 0,025x_{13} + 0,025x_{23} - \\ & - 0,475x_{11}^2 + 0,125x_{22}^2 + 0,05x_{33}^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Наступним етапом статистичного аналізу була перевірка адекватності отриманої моделі. Адекватність моделі перевірялась за критерієм Фішера. Сутність даної перевірки полягала у тому, що визначалось розрахункове значення F_p , яке порівнювалось з табличним F_T .

Для отриманої моделі розрахункове значення критерія Фішера $F_p = 4,7967$, а табличне $F_T = 19,3$ [11]. Тому можна зробити висновок про адекватність регресійної моделі.

Висновки. У якості факторів були обрані: частота роботи електродвигуна (частота обертання валу вентилятора), подача вихідного матеріалу, кут нахилу рухомої заслінки. Використовуючи результати теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання в середовищі SolidWorks, та аналізу літературних джерел були визначені границі значень факторів. Для проведення експериментальних досліджень була виготовлена експериментальна установка, яка дозволила варіювати значеннями змінних факторів, і тим самим отримувати різноманітні дані дальності польоту обчисаного вороху пшениці в залежності від значень змінних факторів.

Встановлено, що найбільш доцільно використовувати некомпозиційний трьохрівневий план Бокса – Бенкіна для трьох факторів, який дає можливість за даними проведених експериментів отримати математичну модель.

Отримано математичну модель, яка в подальшому дасть можливість встановити раціональні параметри та режими функціонування пневмотранспортеру обчисаного вороху.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії по критерію Стюдента вказала на те, що всі коефіцієнти значущі.

Перевірка адекватності моделі по критерію Фішера показала, що модель адекватна.

Список літератури

1. Шабанов П.А. Механико-технологические основы обмолота зерновых культур на корню: дис.... д-ра. техн. наук / П.А. Шабанов. Мелитополь. 1988. 336 с.
2. Леженкин А.Н. Методология формирования энерго- и ресурсосберегающей технологии уборки зерновых культур в условиях фермерских хозяйств (на примере Украины): автореф. дис... д-ра. техн. наук : 05.20.01. Москва, 2008. 35 с.
3. Леженкин А. Машина с очесывающим устройством. *Сел. механизатор*. 2004. № 12. С. 2.
4. Причіпна збиральна машина: пат. 98161 Україна: МПК A01D41/08 (2006. 01). № u 2014 08537; заявл. 28.07.2014; опубл. 27.04.015. Бюл. № 8.
5. Голубев И.К. Обоснование основных параметров и режимов работы двухбарабанного устройства для очеса риса на корню: дис... канд. техн. наук / И.К. Голубев. Москва, 1989. 201 с.
6. Калинушкин М. П. Вентиляторные установки. М.: Высшая школа, 1962, 294 с.
7. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин: в 4-х т. ; ред. М. И. Клецкин. Т. 2. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1967. 830 с.
8. Проектування сільськогосподарських машин: навч. посіб. ; за ред. І.М. Бендери. Кам'янець-Подільський, 2010. 640 с.
9. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рошин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов . Л.: Колос, 1980. 165 с.
10. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике ; под ред. Б. П Креденцер. К.: Техніка, 1984. 200 с.
11. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 60 с.
12. Box G. E. P., Behnken D. W. Home New. The Level for the Study ob Quantitative Variables . *Technometrics*. 1960. V. 2. №4. P. 127-132.

13. Головльов В.А., Леженкін О.М. Методика проведення експерименту робочого процесу пневмотранспортеру обчисаного вороху . *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ. 2020. Вип.20., Т.3. С. 74-79.
14. Математична модель руху часточки обчисаного вороху зернових у повітряному потоці / О.М. Леженкін, В.А. Головльов, О.Ю. Михайленко, М.О. Рубцов . *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ. 2019. Вип.19., Т.3. С. 14-21. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-14-21
15. Головльов В.А., Леженкін О.М. Методика аналітичного визначення швидкості руху часточки обчисаного вороху . *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ. 2019. Вип.19., Т.3. С. 22-28. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-22-28

References

1. Shabanov, P.A. (1988). Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy obmolota zernovykh kultur na kornyu [Mechanical and technological fundamentals of threshing grain crops on the root]. *Doctor's thesis*. Melitopol [in Russian].
2. Lezhenkin, A.N. (2008). Metodologiya formirovaniya energo– i resursosberegayushhej tekhnologii uborki zernovykh kultur v usloviyakh fermerskikh khozyajstv (na primere Ukrainy) [Methodology for the formation of energy- and resource-saving technologies for harvesting grain crops in the conditions of farms (on the example of Ukraine)]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Moscow [in Russian].
3. Lezhenkin, A. (2004). Mashina s ochesyvayushhim ustroystvom [Stripper machine]. *Selskii mekhanizator*, no. 4, pp. 27. [in Russian].
4. Pat. 98161 Ukraine, MPK A01D41/08. Prychipna zbyral'na mashyna [Trailed harvester]. No. u 2014 08537; stated. July 28, 2014; has been published April 27, 2015, Bul. No. 23. [in Ukrainian].
5. Golubev, I.K. (1989). Obosnovanie osnovnykh parametrov i rezhimov raboty dvukhbarabannogo ustrojstva dlya ochesa risa na kornyu [Substantiation of the main parameters and operating modes of a two-drum device for harvesting by stripping the rice]. *PhD thesis*. Moscow [in Russian].
6. Kalinushkin, M. P. (1962). *Ventilyatornye ustanovki* [Fan units]. Moscow: Vysshaya shkola [in Russian].
7. Spravochnik konstruktora sel'skokhozyajstvennykh mashyn [Reference for agricultural machinery mechanic]. Ed. M. I. Kletskin. Moscow: Mashinostroenie, Vol. 2 (2nd ed.), 1967. 830 p. [In Russian].
8. Proektuvannya sil'skogospodars'kykh mashyn. Navchal'nyj posibnyk Bendery I.M. [Design of agricultural machinery. Tutorial]. Ed. I.M. Bendery. Kamianets-Podilskyi, 2010. 640 p. [in Ukrainian].
9. Melnikov, S.V., Aleshkin, V.R. & Roshchin, P.M. (1980). *Planirovanie eksperimenta v issledovaniyakh sel'skokhozyajstvennykh protsessov* [Experiment planning in agricultural process research]. Leningrad: Kolos [in Russian].
10. Barabashchuk, V. I., Kredentser, B. P. & Miroshnichenko, V. I. (1984). *Planirovanie eksperimenta v tekhnike* [Planning an experiment in technics]. Kyiv: Tehnika [in Russian].
11. Spiridonov, A.A. (1981). *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the research of technological processes]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
12. Box G. E. P., Behnken D. W. (1960). Home new. The level for the study ob quantitative variables. *Technometrics*, Vol. 2, 4, 127-132.
13. Holovlov, V.A., Lezhenkin, O.M. (2020). Metodika provedennya eksperimentu robochogo procesu pnevmotransporteru obchi'sanogo vorokhu [Method of conducting the experiment of the working process of the pneumatic conveyor of the combed heap]. *Praci Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Proceedings of the Tavria State agrotechnological university, Vol.20, 3, 74-79*. [in Ukrainian].
14. Holovlov, V.A., Lezhenkin, O.M., Mikhailenko, O.Y. & Rubtsov, M.O. (2019). Matematichna model' rukhu chastochki obchisanogo vorokhu zernovykh u povitryanomu potoczi [Mathematical model of the movement of the combed grain heap after stripper harvesting module in the air flow]. *Praci Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Proceedings of the Tavria State agrotechnological university, Vol.19, 3, 14-21*. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-14-21 [in Ukrainian].
15. Holovlov, V.A., Lezhenkin, O.M., Vershkov, O.O. & Rubtsov, M.O. (2019). Metodyka analitychnogo vyznachennja shvydkosti ruhu chastochky obchisanogo vorokhu [Mathematical model of the movement of the combed grain heap after stripper harvesting module in the air flow]. *Praci Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Proceedings of the Tavria State agrotechnological university, Vol.19, 3, 22-28*. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-22-28 [in Ukrainian].

Viktor Holovlov, Design Engineer, **Oleksandr Lezenkin**, Prof., DSc.

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, Ukraine

Experimental Research of the Working Process of the Pneumatic Conveyor of the Combed Heap

The article presents the advantages of harvesting grain ears by the method of combing at the root use stripper harvesting module technology with subsequent processing in comparison with combining. Harvesting with this technology is performed by a trailed harvesting machine with stripper working bodies. The implementation of this technology is constrained by namely the lack of scientific substantiation of the operating modes of the pneumatic conveyor of the combed heap. In this regard, there is a problem of researching the pneumatic conveyor, for its solution a method of experimental research was developed, which will determine the optimal parameters and performance of the pneumatic conveyor combed heap. The results of experimental researches of technological process of the pneumotransporter for transportation of the combed heap of grain in the trailer - the cart, namely range of flight of the combed heap depending on frequency of rotation dampers.

The parameters of the factors and the geometric dimensions of the experimental setup were determined by computer simulation in SolidWorks. During the simulation, a full-fledged computer model was developed in real size, where the parameters were obtained by changing the speed of the impeller and changing the geometry of the loading window and the pneumatic line. Using the results of theoretical research, modeling and analysis of literature sources, the limits of the values of the factors were determined, which are given in the table. To conduct experimental research, an experimental setup was made, which allowed to vary the values of variable factors, and thus obtain a variety of data on the range of the combed pile of wheat depending on the values of variable factors.

It is established that it is most expedient to use a noncomposite three - level Box - Benkin plan for three factors, which makes it possible to obtain a mathematical model according to the conducted experiments. The mathematical model is obtained, which in the future will make it possible to establish rational parameters and modes of operation of the compressed heap pneumatic conveyor. Checking the significance of the coefficients. The significance of the regression coefficients indicated that all the coefficients are significant. Checking the adequacy of the model showed that the model is adequate.

stripper harvesting, combed heap, pneumatic conveyor, technique, experiment, research, factors, experimental research

Одержано (Received) 11.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 17.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31 DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.54-60>

Ю.О. Ковальчук, доц., канд. техн. наук, **І.О. Лісовий**, доц., канд. техн. наук
Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна
e-mail: temp14053@gmail.com

Лазерно-плазмове зміцнення попередньо термооброблених деталей автомобільного транспорту в АПК

Наведено результати лазерно-плазмового впливу на структуру та мікротвердість поверхонь звичайної та після термічної обробки гартуванням з низьким та високим відпуском конструкційної сталі 40ХН з різною структурою. В результаті виявлено, що лазерно-плазмове обробка дозволяє проводити зміцнення поверхні даної сталі до високої твердості 9–11 ГПа на глибину близько 0,2 мм. Застосування лазерно-плазмової обробки для зміцнення поверхні можливе на різних етапах технологічного процесу виготовлення або ремонту деталей автомобільного транспорту в АПК.

лазерна плазма, оптичний пульсуючий розряд, гартування, мікротвердість, деталі автомобільного транспорту в АПК

Постановка проблеми. Нині лазерні технології широко використовуються у різних сферах життя людини. Наприклад, їх ефективно застосовують у розвідці [1].

Використання можливостей впливу лазерного випромінювання є актуальним також і в галузі сільського господарства, зокрема для зміцнення різних деталей автомобільного транспорту.

Одним із найбільш ефективних методів зміцнення деталей різних машин є лазерно-плазмове обробка (ЛПО).

Виготовлення та ремонт деталей автомобільного транспорту в АПК із застосуванням лазерно-плазмового зміцнення, як і для лазерного гартування, передбачає застосування високоенергетичного впливу на поверхню сталевих виробів на різних етапах технологічного процесу: при зміцненні поверхні нормалізованої або відпаленої сталі безпосередньо після механічної обробки, а також після об'ємної термічної обробки з різними видами відпуску на різну твердість, що визначається призначенням оброблюваних деталей.

У зв'язку з цим актуальним є вивчення впливу вихідної структури оброблюваної сталі на результат лазерно-плазмової обробки, зокрема на мікротвердість за глибиною зміцнених зразків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вирішення задач, пов'язаних з визначенням властивостей залізобетонних сплавів, що зазнають впливу лазерного випромінювання, привертало увагу багатьох науковців та вчених в їх працях [2–8].

Питанням лазерно-плазмової обробки металевих зразків вчені почали займатись ще за радянських часів, зокрема Н.Н. Рикалін та А.А. Углов. Вперше термохімічна дія плазми пробою була продемонстрована ними у відповідній роботі [9].

Так само подібна технологія із застосуванням різних типів лазерів (XeCl, KrF, Nd:YAG) з низькою частотою проходження імпульсів (≤ 100 Гц) описана в роботах [10, 11].

Застосування імпульсно-періодичного CO₂-лазера виявляється доцільним внаслідок низької межі пробою газу і можливості забезпечення високої продуктивності процесу обробки за рахунок високої частоти повторення імпульсів (до 120 кГц).

В останні роки формується та удосконалюється високопродуктивний лазерно-плазмовий метод зміцнення поверхні сталей та сплавів [12–14], він суттєво перевершує традиційні методи лазерного гартування безперервним та імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням.

Цей метод зараз є найбільш перспективним для зміцнення металевих виробів та потребує подальшого дослідження.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення лазерно-плазмового впливу на структуру та мікротвердість поверхонь звичайної та після термічної обробки гартуванням з низьким та високим відпуском конструкційної сталі 40ХН з різною структурою, аналіз процесу формування мікроструктури у розглядуваних зразках, дослідження можливості застосування лазерно-плазмової обробки для зміцнення поверхні на різних етапах технологічного процесу виготовлення або ремонту деталей автомобільного транспорту в АПК.

Виклад основного матеріалу. Лазерно-плазмовий метод заснований на застосуванні плазми оптичного пульсуючого розряду. Розряд запалюється повторюваними з високою частотою проходження (десятки кГц) імпульсами CO_2 -лазера, сфокусованими на оброблюваній поверхні в потоці легуючого газу. Потік плазмоутворюючого газу (азоту, вуглекислоти, повітря) створюється в обробній головці співвісно лазерному випромінюванню (рис. 1).

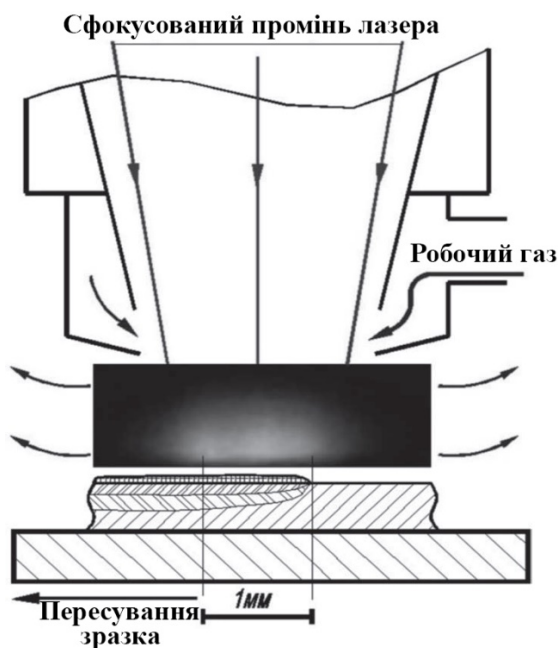


Рисунок 1 – Схема обробки матеріалів на лазерно-плазмовій технологічній установці із зображенням приповерхневої лазерної плазми

Джерело: [12]

Для проведення лазерно-плазмової обробки використовувалась лазерно-плазмова технологічна установка [14]. Основою установки, що визначає її технологічні можливості, є імпульсно-періодична CO_2 -лазерна система генератор-підсилювач середньою потужністю до 2 кВт та імпульсною потужністю сотні кВт з можливістю керування частотою (до 120 кГц) та тривалістю лазерних імпульсів.

Залежно від частоти лазерних імпульсів, розміру плями опромінення та відносної швидкості переміщення променя та деталі цикл обробки включає десятки/сотні впливів лазерної плазми на поверхню. Ефективний обмін енергією високої концентрації між лазерною плазмою і металом забезпечує швидкість локального нагріву, що сягає 10^5 – 10^7 градусів в секунду, при цьому продуктивність лазерно-плазмової обробки в 7–10 разів вища порівняно з традиційним лазерним гартуванням [12].

Було вибрано наступні режими лазерно-плазмового впливу: енергія лазерного імпульсу становила близько 15 МДж при частоті імпульсів 60 кГц. Випромінювання фокусувалося в пляму діаметром 0,8 мм, тривалість піку лазерних імпульсів на піввисоті становила 0,2 мкс, таким чином пікова інтенсивність імпульсу сягала 14 МВт/см^2 .

У якості робочого газу використовувався азот, тиск якого у форкамері складав 2 атм. Швидкість лінійного переміщення зразків становила 20 мм/с. Обробка здійснювалась зі скануванням фокусу лазерного випромінювання у напрямку, перпендикулярному лінійному переміщенню зразків, частота та амплітуда сканування становили 300 Гц та 3 мм відповідно.

Матеріалом дослідження слугувала низьколегована якісна конструкційна сталь 40ХН у звичайному стані та після термічної обробки гартуванням з низьким та високим відпуском.

Для дослідження твердості за глибиною зони лазерно-плазмового впливу використовувався мікротвердомір ПМТ-3 при навантаженні на індентор 20 г.

В результаті ЛПО отримано зміцнені лазером смужки на сталях з вихідною мікроструктурою, характерною для різних етапів технологічного процесу виготовлення та ремонту деталей машин.

Структурні перетворення в сталі при ЛПО визначаються градієнтом температур. Глибина загартованих шарів та структура зон термічного лазерно-плазмового впливу залежать від вихідної структури та параметрів лазерно-плазмової обробки, але при цьому мають місце загальні закономірності.

Розглянемо спочатку особливості мікроструктури та твердості сталі з *ферито-перлітною* структурою при лазерно-плазмовій обробці [14].

Найбільш висока температура, що викликає плавлення та випаровування матеріалу, при лазерній обробці виникає на поверхні оброблюваних виробів. При подальшому охолодженні за рахунок інтенсивного тепловідведення в холодну серцевину металу в зоні плавлення відбувається загартування з рідкого стану та утворення мартенситу з мікротвердістю 11–13 ГПа. До цих ділянок прилягає зона мартенситу з твердістю 6–7 ГПа, отриманого загартуванням при охолодженні з твердого аустенітного стану.

У зоні, в якій при нагріванні відбувається неповне фазове перетворення, утворення мартенситу починається за межами перлітних ділянок.

Розподіл структурних складових за перерізом зони лазерно-плазмового впливу та їх твердість наведено на рис. 2. Загальна глибина зміцненого шару становить 0,2 мм [8].

Далі було розглянуто вплив лазерно-плазмової обробки на особливості мікроструктури та твердості сталі зі структурою *сорбіту відпуску* [14].

У процесі структурних перетворень завдяки однорідності вихідної структури сорбіту відпуску зона фазових перетворень визначається головним чином температурою нагрівання. Внаслідок цього між загартованою мартенситною зоною та зоною термічного впливу спостерігається чітка межа.

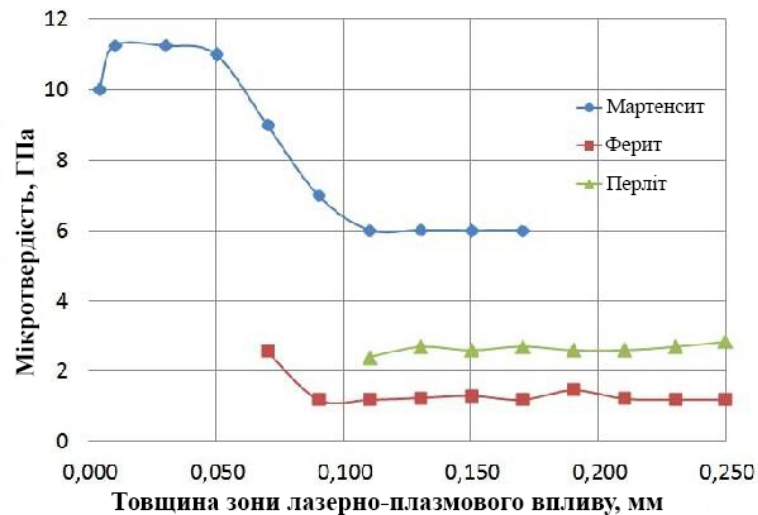


Рисунок 2 – Розподіл мікротвердості структурних складових за глибиною зони лазерно-плазмового впливу у сталі з вихідною ферито-перлітною структурою

Джерело: [14]

Дослідження мікроструктури та мікротвердості в загартованих зонах показали, що на їх будову вихідна структура помітного впливу не надає. У зоні лазерно-плазмового впливу, нагрітій при обробці до температур нижче фазового перетворення, відбувається коагуляція та укрупнення карбідів. При цьому дещо, у межах похибки вимірів, знижується мікротвердість (рис. 3).

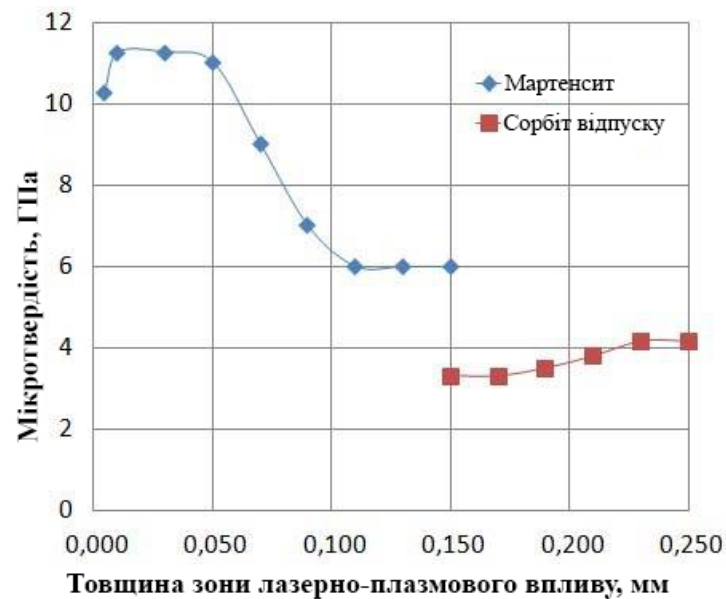


Рисунок 3 – Розподіл мікротвердості структурних складових за глибиною зони лазерно-плазмового впливу у сталі з вихідною структурою сорбіту відпуску

Джерело: [14]

Нарешті було розглянуто особливості мікроструктури та твердості сталі зі структурою *мартенситу* при лазерно-плазмовій обробці [14].

Вихідною структурою зразків, зміцнених попередньою обробкою гартуванням з низьким відпуском, є мартенсит. При лазерній обробці поверхня сталі оплавляється і при подальшому охолодженні загартовується мартенсит. У всіх досліджених зразках при будь-якому стані вихідної структури поверхня отримує зміцнення трохи менше, ніж

нижчі шари. Це викликано, очевидно, частковим вигорянням вуглецю під час розплавлення сталі. До зони, загартованої з рідкого стану, примикає шар, що нагрівся під впливом лазерного променя до температур аустенітизації, тобто загартований із твердого стану.

Як і в описаних вище випадках, твердість загартованих шарів при лазерно-плазмовому впливі перевищує твердість, що досягається при інших видах гартування. В даному випадку отримано мікротвердість H_{50} , що сягає до 11,09 ГПа. Високу твердість має як шар, загартований з рідкого стану, так і шар, нагрітий при лазерно-плазмовому впливі до аустенітного стану з H_{50} , що сягає до 8,1 ГПа (рис. 4).

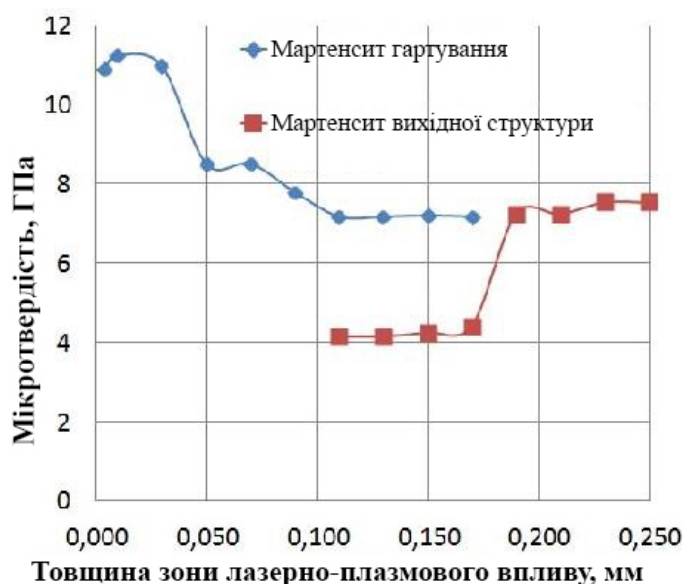


Рисунок 4 – Розподіл мікротвердості структурних складових за глибиною зони лазерно-плазмового впливу у сталі з вихідною структурою мартенситу

Джерело: [14]

Шар із мартенситною структурою межує з ділянками, в яких при лазерному нагріванні пройшла неповна фазова перекристалізація. При нагріванні аустенітне перетворення починається від меж відповідних зон. При подальшому охолодженні ці ділянки зазнають мартенситного перетворення. Ділянки, що не зазнали аустенітного перетворення в результаті термічного циклу при лазерно-плазмовому впливі, отримують короткочасний відпуск. Твердість цих ділянок у результаті відпуску знижується до 4,3 ГПа.

Висновки. Лазерно-плазмова обробка може застосовуватись з високою ефективністю для зміцнення конструкційних сталей. Вона дозволяє здійснювати зміцнення поверхні конструкційної сталі до високої твердості 9–11 ГПа на глибину близько 0,2 мм. При цьому ефект зміцнення отриманий на сталях із різною структурою, характерною для різних етапів технологічного процесу. Отже, застосування лазерно-плазмової обробки для зміцнення поверхні можливе на різних етапах технологічного процесу виготовлення чи ремонту деталей автомобільного транспорту в АПК.

Список літератури

1. Заболотный В.И., Ковальчук Ю.А. Модель отражающей поверхности лазерного канала разведки информации. *Прикладная радиоэлектроника*. 2007. Т. 6, № 3. С. 432–434.
2. Огин П.А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2 (32-2). С. 130–135.

3. Завойко О.С. Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15. № 4. С. 846–855.
4. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О. Дослідження структури та мікротвердості обробленої лазером поверхні чавунів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 48. С. 54–61.
5. Rutkowski, D., Ambroziak, A. Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2014. № 5, 49–57.
6. Огин П.А. Повышение эксплуатационных характеристик деталей из чугунов с применением закалки оптоволоконным лазером. Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. Серия «Технические науки». 2015. № 12 (55). С. 55–58.
7. Ковальчук Ю.О., Кравченко В.В., Оляднічук Р.В. Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2017. Вип. 5. С. 92–99.
8. Laser-plasma treatment of structural steel / A. Tokarev et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 58–62.
9. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Лазерно-плазменная обработка металлов при высоких давлениях газов. *Квантовая электроника*. 1981. Т. 8. № 6. С. 1193–1201.
10. Schaaf P. Laser nitriding of metals. *Progress in Materials Science*. 2002. Vol. 47. P. 1–161.
11. Microstructure of TiN coatings synthesized by direct pulsed Nd:YAG laser nitriding of titanium: Development of grain size, microstrain, and grain orientation / D. Hoche et al. *Applied Physics A*. 2008. Vol. 91. P. 305–314.
12. Применение метода лазерно-плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двигателей внутреннего сгорания / Багаев С.Н. и др. *Обработка металлов*. 2014. № 1 (62). С. 14–23.
13. Модификация поверхности серого чугуна методом лазерно-плазменной обработки / Багаев С.Н. и др. *Актуальные проблемы в машиностроении: материалы первой междунар. науч.-практ. конф.* (Новосибирск, 26 марта 2014). Новосибирск, 2014. № 1. С. 229–235.
14. Влияние предварительной термообработки конструкционной стали на эффект упрочнения при лазерно-плазменном воздействии / Багаев С.Н. и др. *Актуальные проблемы в машиностроении: материалы третьей междунар. науч.-практ. конф.* (Новосибирск, 30 марта 2016). Новосибирск, 2016. № 3. С. 389–397.

References

1. Zabolotnyi, V.I. & Kovalchuk, Yu.A. (2007). Model otrazhayushchey poverkhnosti lazernogo kanala razvedki informatsii [Model of the reflective surface of the laser intelligence channel]. *Prikladnaya radioelektronika – Applied radio electronics*, Vol. 6, 3, 432–434 [in Russian].
2. Ogin, P.A. (2015). Struktura i svojstva zon perekrytija pri lazernoj zakalke stalej i chugunov [The structure and properties of overlap zones in laser hardening of steels and cast irons]. *Vektor nauki Tol'jattinskogo gosudarstvennogo universiteta – Science vector of Togliatti State University*, 2 (32-2), 130-135 [in Russian].
3. Zavoiko, O.S. (2014). Doslidzhennia lazernoho zmitsnennia kolinchatykh valiv ta mekhaniko-termichnoi obrobky pry ruinuванні na vtomu ta znos [Investigation of laser hardening of crankshafts and mechanical-thermal treatment in case of fatigue and wear destruction]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Physics and Chemistry of the Solid State*, Vol. 15, 4, 846-855 [in Ukrainian].
4. Kovalchuk, Yu.O. & Lisoviy I.O. (2018). Doslidzhennia struktury ta mikrotverdosti obroblenoyi lazerom poverkhni chavuniv [Investigation of the structure and microhardness of a laser-treated cast iron surface]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn: Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhichniy zbirnyk – Design, manufacture and operation of agricultural machinery: National interagency scientific and technical collection*, issue 48, 54–61 [in Ukrainian].
5. Rutkowski, D. & Ambroziak, A. (2014). Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 49–57 [in English].
6. Ogin, P.A. (2015). Povyshenie jekspluatatsionnykh harakteristik detalej iz chugunov s primeneniem zakalki optovolokonnyim lazerom [Improving the performance of parts made of cast iron using hardening with a fiber-optic laser]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-jekonomicheskogo instituta. Seriya «Tehnicheskie nauki» – Bulletin of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute. Series «Technical Sciences»*, 12 (55), 55-58 [in Russian].
7. Kovalchuk, Yu.O., Kravchenko, V.V. & Olyadnichuk, R.V. (2017). Lazerna obrobka detaley silskohospodarskoyi tekhniki z chavunu [Laser processing of parts of agricultural machinery from cast iron]. *Visnyk Ukrayinskoho viddilennya Mizhnarodnoyi akademiyi ahrarnoyi osvity – Bulletin of*

- the Ukrainian branch of the International Academy of Agrarian Education, issue 5, 92–99 [in Ukrainian].
8. Tokarev, A., Bataeva, Z., Grachev, G., Smirnov, A., Khomyakov, M. & Gerber, A. (2015). Laser-plasma treatment of structural steel. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 788, 58–62 [in English].
 9. Rykalin, N.N. & Uglov, A.A. (1981). Lazerno-plazmennaya obrabotka metallov pri vysokikh davleniyakh gazov [Laser-plasma processing of metals at high gas pressures]. *Kvantovaya elektronika – Quantum electronics*, Vol. 8, 6, 1193–1201 [in Russian].
 10. Schaaf, P. (2002). Laser nitriding of metals. *Progress in Materials Science*, Vol. 47, 1–161 [in English].
 11. Hoche, D., Schikora, H., Zutz, H., Queitsch, R., Emmel, A. & Schaaf, P. (2008). Microstructure of TiN coatings synthesized by direct pulsed Nd:YAG laser nitriding of titanium: Development of grain size, microstrain, and grain orientation. *Applied Physics A*, Vol. 91, 305–314 [in English].
 12. Bagaev, S.N., Grachev, G.N., Smirnov, A.L., Khomyakov, M.N., Tokarev, A.O. & Smirnov, P.Yu. (2014). Primeneniye metoda lazerno-plazmennoy modifikatsii poverkhnosti metallov dlya uluchsheniya tribotekhnicheskikh kharakteristik tsilindrov dvigateley vnutrennego sgoraniya [Application of the method of laser-plasma modification of the surface of metals to improve the tribotechnical characteristics of cylinders of internal combustion engines]. *Obrabotka metallov – Metal processing*, 1 (62), 14–23 [in Russian].
 13. Bagaev, S.N., Grachev, G.N., Smirnov, A.L., Khomyakov, M.N. & Tokarev, A.O. (2014). Modifikatsiya poverkhnosti serogo chuguna metodom lazerno-plazmennoy obrabotki [Modification of the surface of gray cast iron by laser-plasma treatment]. *Aktualnye problemy v mashinostroyenii: materialy pervoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (26 marta 2014 goda) – Actual problems in mechanical engineering: materials of the first international scientific and practical conference*, 1. (pp. 229–235). Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU [in Russian].
 14. Bagaev, S.N., Grachev, G.N., Smirnov, A.L., Khomyakov, M.N., Tokarev, A.O., Bataeva Z.B. et al. (2016). Vliyaniye predvaritelnoy termoobrabotki konstruktsionnoy stali na effekt uprochneniya pri lazerno-plazmennom vozdeystvii [Influence of preliminary heat treatment of structural steel on the hardening effect under laser-plasma action]. *Aktualnye problemy v mashinostroyenii: materialy tretyey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (30 marta 2016 goda) – Actual problems in mechanical engineering: materials of the third international scientific and practical conference*, 3. (pp. 389–397). Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU [in Russian].

Yuriy Kovalchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisovyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Laser-plasma Strengthening of Pre-heat-treated Road Transport Details in the Agro-industrial Complex

The aim of the work is to determine the laser-plasma effect on the structure and microhardness of surfaces of ordinary and after heat treatment by hardening with low and high tempering steel 40HN with different structure, to study the possibility of laser-plasma treatment to strengthen the surface at different stages of manufacturing or repair transport details in the agro-industrial complex.

The article presents the results of laser-plasma exposure to the structure and microhardness of surfaces of ordinary and after heat treatment by hardening with low and high tempering steel 40HN with different structure: normalized or annealed steel immediately after machining, and after volumetric heat treatment with different types tempering for different hardness, determined by the purpose of the workpieces. First, the features of the microstructure and hardness of steel with a ferritic-pearlitic structure during laser-plasma treatment were studied. The highest temperature, which causes melting and evaporation of the material, during laser treatment occurs on the surface of the processed products. During further cooling due to intensive heat dissipation into the cold core of the metal in the melting zone is hardening from the liquid state and the formation of martensite. Adjacent to these areas is the zone of martensite obtained by quenching during cooling from the solid austenitic state. Then the influence of laser-plasma treatment on the features of the microstructure and hardness of steel with the structure of tempering sorbitol and with the structure of martensite was considered.

Laser-plasma treatment can be used with high efficiency to strengthen structural steels. It allows to strengthen the surface of structural steel to a high hardness of 9–11 GPa to a depth of about 0.2 mm. The hardening effect is obtained on steels with different structure, characteristic for different stages of the technological process. Therefore, the use of laser-plasma treatment to strengthen the surface is possible at different stages of the technological process of manufacturing or repairing parts of road transport in agriculture.

laser plasma, optical pulsating discharge, hardening, microhardness, road transport details in the agro-industrial complex

Одержано (Received) 12.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 17.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 633.522

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.61-69>**В.О. Шейченко**, проф., д-р техн. наук, **І.А. Дудніков**, доц., канд. техн. наук*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: vsheychenko@ukr.net***В.В. Шевчук**, доц., канд. техн. наук*Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна**e-mail: shevchuk16111@ukr.net***В.Г. Шевчук**, викладач-методист, вища категорія*Уманський фаховий коледж технологій та бізнесу Уманського національного університету садівництва, м. Умань, Україна*

Дослідження умов різання стебел із ковзанням

В статті досліджено підвищення ефективності функціонування ріжучих апаратів сільськогосподарських машин завдяки удосконаленню режимів різання стебел із ковзанням. Завдяки цьому уможливаються умови різання із меншими значеннями нормального тиску, ніж за умов різання без ковзання. За стандартних значень показників жниварки з ріжучим апаратом та якісному різанні стебел рослин із ковзанням збільшення продуктивності складає до 17 %.

різання із ковзанням, коефіцієнт ковзання, умови різання із ковзанням

Постановка проблеми. Для збирання багатьох сільськогосподарських культур застосовуються машини, забезпечені різальними апаратами. Дослідженням роботи різальних апаратів збиральних машин, машин для приготування кормів, а також сегментних ріжучих апаратів зворотно-поступального руху присвячено роботи багатьох вчених. Ними досліджено проблему механізації різання та подрібнення рослинних матеріалів [1-5]. Проте поза увагою залишилися фундаментальні питання пошуку шляхів удосконалення режимів різання стебел із ковзанням. Відмічені режими відбуваються за значно менших значень нормального тиску, ніж за умов різання без ковзання. Відповідно механізми, які реалізують принципи різання із ковзанням представляють значний науково-практичний інтерес. Цим питанням присвячено дану роботу.

Аналіз основних досліджень і публікацій. В основному відомі дослідження присвячено аналізу побудованих графічно діаграм руху сегментів відносно стеблостою та процесу різання і розрахунку ріжучих апаратів. В загальному вигляді процес різання стебла ріжучим апаратом – це поперечний відгин стебла сегментом до моменту виникнення протидіючого підпору і наступного зрізування. Поперечний відгин досягає максимального значення в залежності від швидкості різання, фронтального переміщення ріжучого апарату і його конструкційних параметрів [6].

Для ріжучих апаратів жниварок важливою є товщина стебла по висоті зрізування, а кормові культури відповідно розділяють на товстостеблеві, тонкостеблеві і трав'янисті [5].

Ріжучий апарат включає робочі деталі: пальці з вкладишами і сегменти. По співвідношенню параметрів (ходу сегмента, віддалі між осями двох сусідніх сегментів) розділяють ріжучі апарати на нормального, середнього і низького різання та з подвійним перебігом сегментів [6].

У [7] наведено результати досліджень виявлення змін механічних властивостей стебла проса при динамічному різанні за різних швидкостях різання та нахилі леза. Відмічено, що енергія розрізу епідермальної тканини стебла була більшою, ніж у внутрішньої тканини. Експериментальними дослідженнями встановлено, що швидкість різання та кут нахилу леза мали значний вплив на механічні властивості різання. Проте поза увагою авторів залишилися питання теоретичного обґрунтування умов різання із ковзанням, співвідношення кута різання та кута тертя.

Авторами досліджень [8] встановлено закономірності змінення середньої енергії різання стебел рису на різних рівнях різання. Ними відмічено, що для верхнього рівня різання цей показник є найвищими. Було виявлено, що пікова сила різання на одиницю площі стрижня зменшувалася із збільшенням кута різання леза. Експерименти на рисових стеблах у відміченому дослідженні показали, що оптимізація ковзного кута різання та рівня стебла мають значний вплив на економію енергії.

Дослідженнями [9] підтверджено, що ефективне різання може покращити використання стебла і привести до енергозбереження. Авторами досліджено механічні властивості різання стебел проса на різних ділянках стебла, вміст вологи та кут нахилу леза. Відмічено, що напруга різання зменшувалася від нижньої області стебла до верхньої, а сила і енергія різання були значно вищими в нижній області, ніж в інших областях через параметри поперечного перерізу. Збирання стебел проса за умов високого або низького вмісту вологи може призвести до економії енергії. Напруга при різанні зменшувалася із збільшенням кута нахилу леза. Однак питома енергія різання спочатку зменшувалася, а потім поступово збільшувалася зі збільшенням кута нахилу леза. Проте теоретичного обґрунтування умов різання рослинних матеріалів із ковзанням автори не наводять.

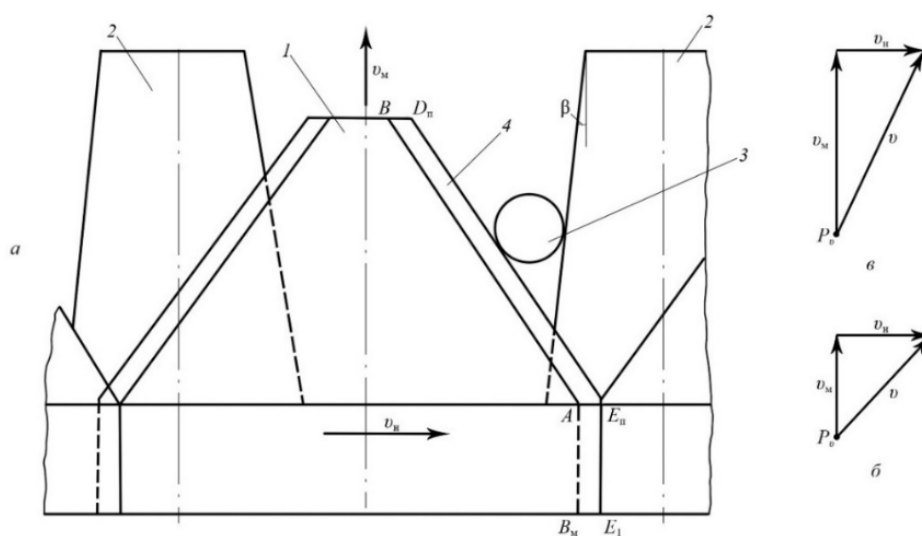
Через відсутність спеціальних ріжучих лез для існуючих комбайнів для збирання конопель, замість них доводиться використовувати ріжучі леза комбайнів для збирання рису та пшениці. Проте ці ріжучі леза мають проблеми, пов'язані з великим опором різання, високим споживанням енергії та низькою якістю різання. Саме тому авторами дослідження [10] було використано принципи біоніки для розроблення нового типу зубців леза. В основу біонічного ріжучого леза покладено криву профілю ріжучих зубів верхньої щелепи жука-довгорога. За результатами порівняльних досліджень встановлено, що у порівнянні зі звичайним лезом, біонічне лезо досягло зниження середньої максимальної сили різання та споживання енергії різання на 7,4% та 8,0% відповідно. Це показало, що біонічне лезо має кращі показники зниження опору та споживання, ніж звичайне лезо [10].

Ріжучий апарат є однією з ключових частин комбайнів та жниварок, а продуктивність різання леза безпосередньо визначає продуктивність машини. Велика кількість ножів, їх нахил установки та частота взаємодії зі стеблами рослин веде до підвищення енерговитрат обладнання, що є недоліком жниварки з ріжучим апаратом. Саме тому актуальною проблемою є теоретичне обґрунтування умов різання із ковзанням, встановлення за таких умов співвідношення між кутом між напрямком швидкості різання і перпендикуляром до леза різання та кутом тертя.

Постановка завдання. Метою досліджень є підвищення ефективності функціонування ріжучих апаратів сільськогосподарських машин завдяки удосконаленню режимів різання стебел із ковзанням. Завдяки цьому уможливлються умови різання із меншими значеннями нормального тиску, ніж за умов різання без ковзання. За стандартних значень показників жниварки з ріжучим апаратом та якісному різанні стебел рослин із ковзанням збільшення продуктивності складає до 17 %.

Виклад основного матеріалу. Проаналізуємо роботу ріжучої пари, що складається із сегмента ножа з правим і лівим лезами і протиріжучою пластиною, яка є опорою стеблам під час різання. Основну роботу при цьому виконують леза, наприклад, леза $D_n E_n$ (рис. 1) і $D_l E_l$ (рис. 2), що представляють у перерізі кожне вершину двогранного кута, утвореного гранями DA і DB (рис. 3), які називаються фасками. За умов тривалої роботи різальної пари лезо D (рис. 3, а) затуплюється до деякого стану $D_1 D_2$ (рис. 3, б) і процес різання лезом трансформується у різання клином $AD_1 D_2 B$ (рис. 3, б). За таких умов на матеріал впливають робочі грані (фаски), тоді як лезо відіграє допоміжну роль. Затупленість леза усувається його заточуванням.

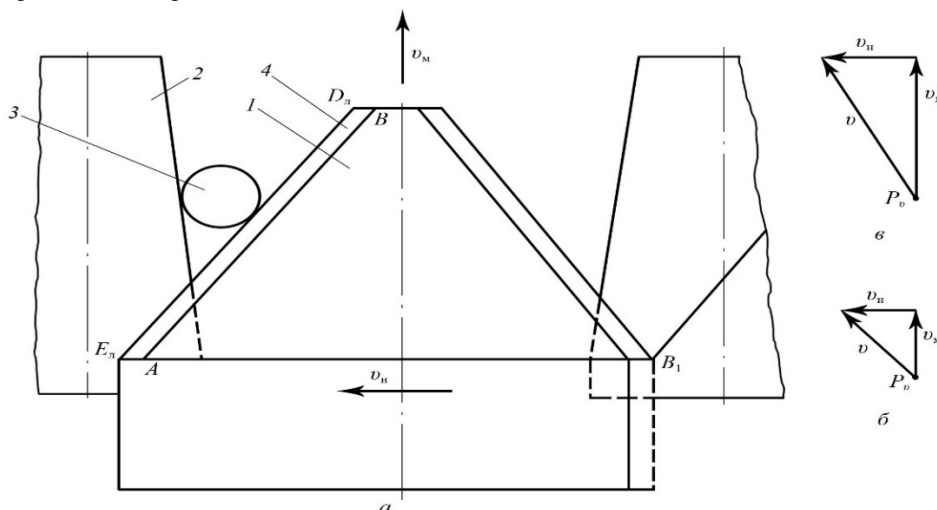
Отже, різання є процесом, у якому можуть брати участь і лезо, і робочі грані (фаски). Розглянемо докладніше процес різання горизонтально розташованим лезом.



1 – сегмент ножа, 2 – протиріжуча пластина, 3 – стебло, 4 – лезо сегмента

Рисунок 1 – Схема взаємодії сегмента ножа за умов його руху праворуч з протиріжучою пластиною і стеблом, що підводиться для його різання (а), а також плани швидкостей руху машини (б) і (в)

Джерело: розроблено автором



1 – сегмент ножа, 2 – протиріжуча пластина, 3 – стебло, 4 – лезо сегмента

Рисунок 2 – Схема взаємодії сегмента ножа за умов його руху ліворуч з протиріжучою пластиною і стеблом, що підводиться для його різання (а), а також плани швидкостей руху машини (б) і (в)

Джерело: розроблено автором

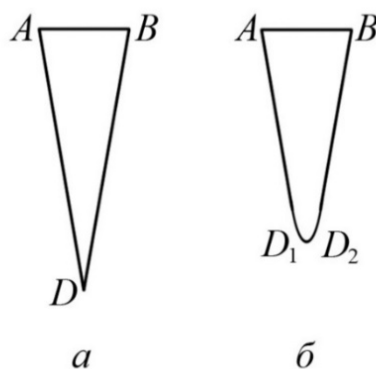


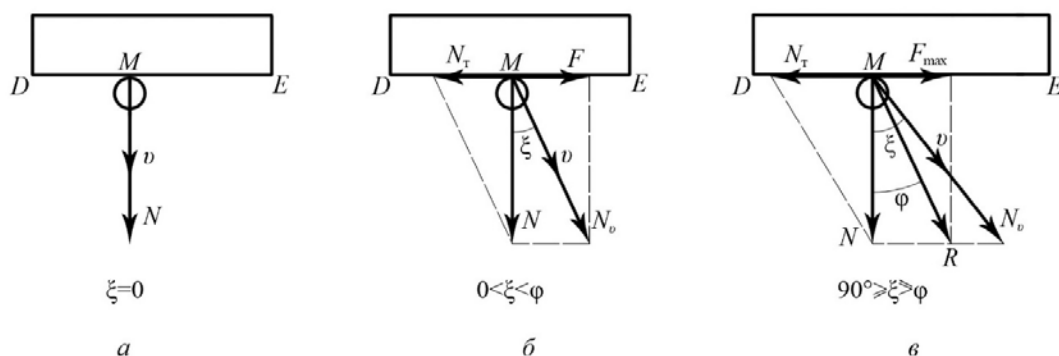
Рисунок3 – Види перерізу леза ножа: а – гостре, б – затуплене

Джерело: розроблено автором

У відповідності до теорії різання матеріалів, викладеної у [11, 12], існують три види різання лезом матеріалів: різання, що рубає, різання з поздовжнім переміщенням без ковзання і різання із ковзанням. Застосуємо цю теорію для різання стебел. Схеми, що ілюструють ці види різання для випадку, коли стебло горизонтальне і розташоване перпендикулярно лезу, що рухається вниз і вправо, наводяться на рис. 4 (площина леза в цих схемах вертикальна, кут ξ – це кут між напрямком швидкості v різання і перпендикуляром до леза, φ – кут тертя леза про стебло, M – точка леза, що впливає на стебло, N – сила, що діє з боку леза на стебло):

- а) різання, що рубає ($\xi = 0$);
- б) різання з поздовжнім переміщенням леза без ковзання ($0 < \xi < \varphi$);
- в) різання із ковзанням леза щодо стебла ($\varphi < \xi$).

Як видно з представлених даних, різання, що рубає, має місце, коли лезо ріже горизонтальне стебло, рухаючись зверху вниз зі швидкістю v , а нормальна сила N тисне на лезо теж вниз (рис. 4, а).

а – різання, що рубає; б – різання з поздовжнім переміщенням без ковзання; в – різання із ковзанням
Рисунок4 – Схеми режимів різання стебел лезом

Джерело: розроблено автором

За умов різання з поздовжнім переміщенням без ковзання швидкості точок леза DE відхилені від нормалі на кут ξ , що менший за кут φ тертя леза по стеблу (рис. 4, б). Розкладемо за таких умов силу N нормального тиску на складові N_b за швидкістю v і N_m відносно леза. Сила $N_m = N \tan \xi$ менша за максимальну силу тертя $F_{max} = N \tan \varphi$, оскільки $\xi < \varphi$. В результаті дії складової N_m частка M стебла повинна була б рухатися в напрямку складової N_m щодо леза, але цього не відбувається, оскільки виникає сила тертя F , рівна

N_m і протилежно спрямована. Ці сили N_m і F взаємно врівноважуються, і частка M , що перерізається, буде рухатися в напрямку складової N_b і швидкості v .

Випадок, коли $\xi = \varphi$, аналогічний випадку $0 < \xi < \varphi$. Різниця полягає лише в тому, що сила тертя F досягла максимального значення. Зважаючи на це, можна прийняти, що варіант на рис. 4, б справедливий і для випадку, коли $0 < \xi \leq \varphi$.

Різання із ковзанням характеризується великим кутом ξ . За таких умов сила тертя досягає свого максимального значення, але не врівноважує складову N_m (рис. 4, в). Сила N розкладається на складові N_b і N_m . Додаючи сили N і F_{max} , отримуємо рівнодіючу R , яка відхилена від нормалі на кут тертя φ . Частка M , що відрізається, буде рухатися в напрямку сили R , а точка леза буде рухатися в напрямку швидкості v і складової N_b .

Таким чином, за умов різання із ковзанням горизонтально розташованого стебла горизонтальним ножом, його лезо повинно тиснути на стебло перпендикулярно йому і рухатися під кутом ξ до нормалі, який більше кута тертя φ .

У зв'язку з тим, що кут ξ за даними згаданих вище джерел літератури, не обмежений за величиною (до 90°), необхідно цей варіант різання проаналізувати і визначити межі значень кута ξ , за якого доцільно використовувати такий пристрій для різання стебел із ковзанням.

На рис. 5 наведено графіки, аналогічні рис. 4, в. Проте у більшому масштабі і за більшого значення кута ξ . Швидкості різання однакові на обох графіках (а і б). На рис. 5 б наведено переріз стебла, на який зверху діє лезо ножа донизу і праворуч. На цьому рисунку швидкість різання v розкладено на дві складові v_{ck} і v_y . Складова v_{ck} представляє собою горизонтальну швидкість ковзання леза по стеблу, а швидкість v_y представляє собою швидкість заглиблення леза у стебло. Ці складові швидкості визначаються згідно:

$$\left. \begin{aligned} v_{ck} &= v \sin \xi; \\ v_y &= v \cos \xi; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Аналізуючи наведені залежності відмітимо, що збільшення кута ξ призводить до відповідного зростання швидкості v_{ck} . За таких умов швидкість v_y заглиблення леза зменшується. За $\xi = 90^\circ$, $v_{ck} = v$, а $v_y = 0$, тобто різання стебла з заглибленням у нього не відбувається. Зважаючи на це, для забезпечення різання стебла із ковзанням і з метою одночасного та раціонального скорочення часу на це ковзання леза по стеблу, доцільно операцію різання стебла проводити за значень кута ξ менше 90° .

У світлі викладеного вважаємо, що кут ξ_p , за якого слід проводити різання стебла із ковзанням, повинен перебувати в межах:

$$\varphi + \Delta\varphi \leq \xi_p \leq 90^\circ - \Delta\xi, \quad (2)$$

де φ – кут тертя леза по стеблу (градуси);

$\Delta\varphi$ – невеликий кут ($\sim 5^\circ$), спрямований у бік збільшення кута φ (рис. 5, а);

$\Delta\xi$ – невеликий кут ($\sim 20^\circ$), що відраховується у бік опускання лінії MM_1 (рис. 5, а).

Як видно із залежності (2), кут ξ_p – це кут, що відповідає зоні бажаної дії вектора швидкості точки леза для забезпечення різання стебел із ковзанням. Із (2) випливає, що кут ξ_p повинен дорівнювати або більше $\varphi + \Delta\varphi$ і менше або дорівнювати $90^\circ - \Delta\xi$. Ці кути $\Delta\varphi$ і $\Delta\xi$ наведено на рис. 5 та 6. На цих рисунках також вказано і кут ξ_p .

Згідно даних [13, 14] відомо, що кут тертя – це кут між нормаллю до поверхні тіла та рівнодіючої сил нормального тиску та тертя.

У стебел пшениці, жита, рису, кукурудзи, вівса, соняшнику коефіцієнти тертя спокою по сталі становлять 0,36-0,58, а кут тертя спокою становить 20°-30°. Відповідно для стебел льону і конопель коефіцієнти тертя спокою по сталі складають 0,31-0,38, а кути тертя по зазначеному матеріалу складають відповідно 18°-21°.

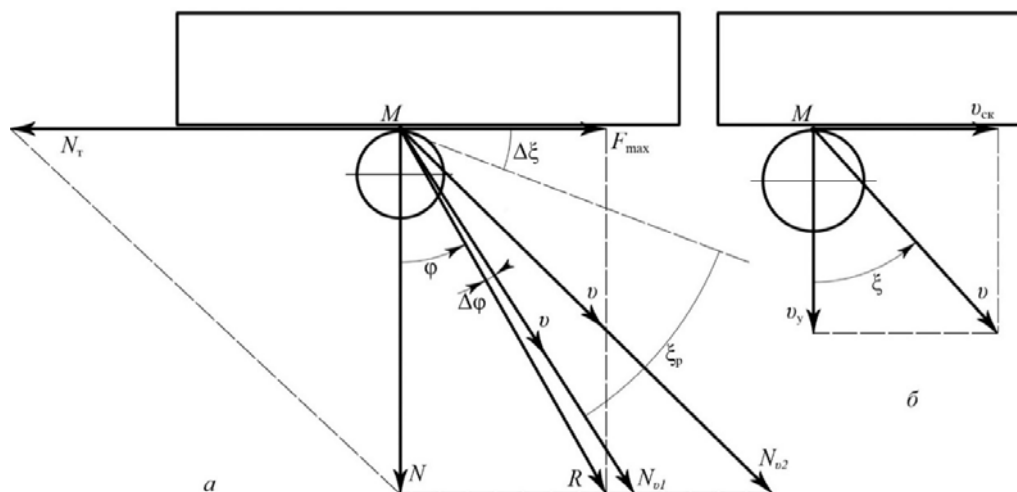


Рисунок 5 – Варіант режиму різання стебла із ковзанням (а) та схема розкладання швидкості у різання на складові $v_{СК}$ і v_v (б)

Джерело: розроблено автором

На рис. 6 наведено три варіанти залежності швидкості v різання стебла із ковзанням від глибини занурення леза у стебло, сили N і кута ξ , що коливається в межах 40° , 50° , 60° . Аналізуючи наведені графічні залежності відмітимо, що чим більший кут ξ , тим більше часу витрачається на різання стебла із ковзанням. Це також потрібно враховувати.

Встановлено, що за умов різання матеріалів із ковзанням необхідна менша сила N у порівнянні з різанням без ковзання.

Для визначення міри ковзання розглянемо процес переміщення леза під час різання. Нехай ніж, рухаючись у напрямку швидкості v (рис. 7), перемістився з положення I у положення II. За таких відрізана частка M , що стикається з точкою A леза, перемістилася під дією сили R і виявилася біля відрізаної точки A_1 леза в положенні M_1 , а точка A , рухаючись у напрямку швидкості v , зайняла положення A_1' . Тоді A_1A_1' є шлях, пройдений відрізаною частинкою M ковзанням по лезу, а AA_1 є абсолютне переміщення частинки. Позначимо відношення $\frac{A_1'A_1}{AA_1}$ через κ_c і назовемо його коефіцієнтом ковзання, що є мірою ковзання. Використовуючи теорему синусів та схему на рис. 7, отримуємо:

$$\frac{A_1' A_1}{\sin(\xi - \varphi)} = \frac{A A_1}{\sin(\frac{\pi}{2} - \xi)},$$

ЗВІДКИ

$$\kappa_c = \frac{A'_1 A_1}{A A_1} = \frac{\sin(\xi - \varphi)}{\cos \xi}. \quad (3)$$

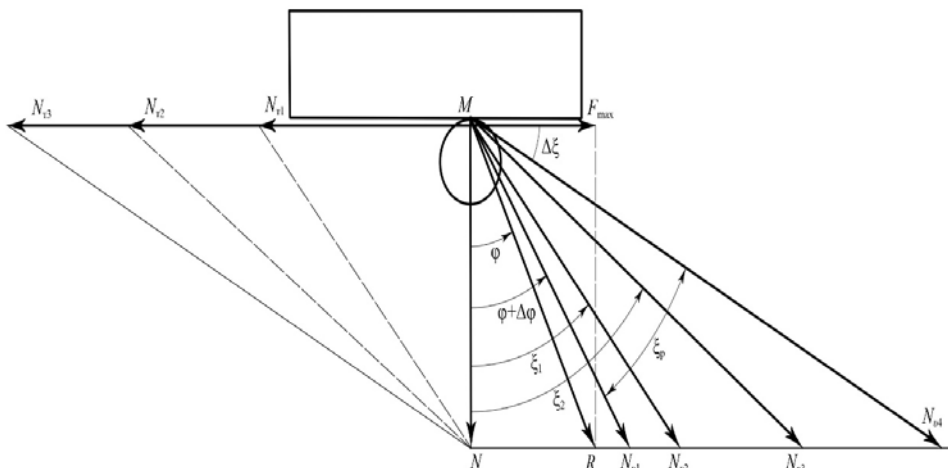


Рисунок 6 – Варіант графіків різання стебла із ковзанням за різних значень кута $\xi_1 : \xi_1 \approx 40^\circ ; \xi_1 \approx 50^\circ ; \xi_1 \approx 30^\circ$

Джерело: розроблено автором

З рівності (3) видно, що за $\xi = \varphi$ коефіцієнт $\kappa_c = 0$, а за $\xi = \pi/2 \cdot \kappa_c$ прагне нескінченності, тобто збільшується із зростанням ξ .

Для забезпечення різання необхідно, щоб тиск від різання створював у матеріалі напруги зминання, що дорівнюють межі його міцності.

Як свідчать результати експериментальних досліджень, за різання із ковзанням необхідна менша сила N , тобто менший нормальний тиск, ніж за різанням без ковзання. Зі збільшенням кута ξ ця сила N зменшується.

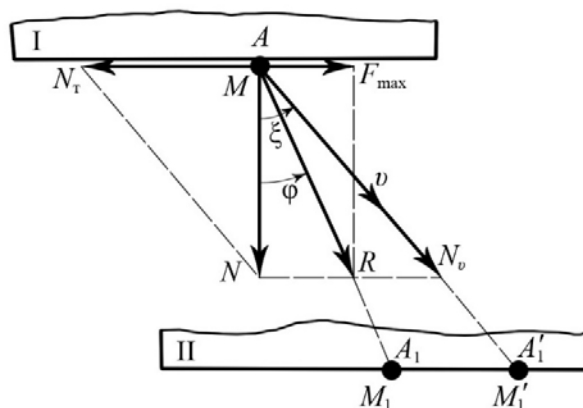


Рисунок 7 – Схема переміщення зрізаної частини стебла за умов його різання із ковзання

Джерело: розроблено автором

Викладені закономірності наводяться для випадку, коли лезом є нижня сторона вертикальної площини ножа, а стебло горизонтальне (рис. 4, 5 і 6). У існуючих різальних апаратах лезо знаходиться в площині, близькій до горизонтальної, а положення стебел вертикальне, або близьке до вертикального положення. Такі випадки наводяться на рис. 1 і 2. Ця різниця у конструкції не змінює суті справи. В обох випадках може бути різання стебла із ковзанням.

Висновки:

1. Встановлено умови різання із ковзанням горизонтально розташованого стебла ножом, згідно яких, лезо повинно тиснути на стебло перпендикулярно йому і рухатися під кутом ξ до нормалі, який більше кута тертя φ . Проаналізовано і визначено межі

значень кута ξ , за якого доцільно використовувати такий пристрій для різання стебел із ковзанням.

2. Відмічено, що для забезпечення різання стебла із ковзанням і з метою одночасного та раціонального скорочення часу на це ковзання леза по стеблу, доцільно операцію різання стебел проводити за значень кута ξ менше 90° .

3. Встановлено, що за умов різання стебел із ковзанням необхідна менша сила N у порівнянні з різанням без ковзання.

4. Встановлено теоретичну залежність для визначення коефіцієнта ковзання, що є мірою ковзання.

Список літератури

1. Желиговский В.А. Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии сельскохозяйственных материалов. Тбилиси, Изд. ГСХИ, 1960. 146 с.
2. Босой Е.С. Режущие аппараты уборочных машин. Москва. Машиностроение, 1967. 167 с.
3. Заика П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. II. Машини для заготівлі кормів. Харків. ОКО, 2003. 345 с.
4. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. Москва. Машиностроение, 1975. 303 с.
5. Ивашко А.А. Вопросы теории резания органических материалов лезвием. *Тракторы и сельхозмашины*. 1958. № 2. С. 34-37.
6. Василенко И.Ф. Теория режущих аппаратов жатвенных машин. *Труды ВИСХОМ*. Сб. 5. Москва, 1937. С. 7-114.
7. Zhang, Y., Cui, Q., Li, H., Zhang, Z., He, Y., Sun, D. Simulation and test of cutting mechanical characteristics of millet stalk based on ANSYS/LS-DYNA. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2020. 61 (2). Pp. 143-150. DOI: 10.35633/inmateh-61-16
8. Zhang, C.L., Chen, L.Q., Xia, J.F., Zhang, J.M. Effects of blade sliding cutting angle and stem level on cutting energy of rice stems. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2019 12 (6). Pp. 75-81. DOI: 10.25165/ijabe.20191206.4604.
9. Zhang, Y., Cui, Q., Li, H., Sun, D., Hou, H. Effects of stem region, moisture content and blade oblique angle on mechanical cutting of millet stems. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2018. 55 (2). Pp. 105-112. ISSN20684215
10. Tian, K., Li, X., Shen, C., Zhang, B., Huang, J., Wang, J., Zhou, Y. Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle. *Nongye Gongcheng Xuebao. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2017. 33 (5). Pp. 56-61. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.008
11. Кленин Н.И., Сакун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. Москва: Колос, 1980. С. 72-78.
12. Летошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины. Москва. Л. Гос. изд. с.-х. литературы, 1955.
13. Особов В.И. Механическая технология кормов. Москва. Колос, 2009. 339 с.
14. Хайлис Г.А. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин. Киев, Изд-во УСХА, 1992. 235 с.

Referencis

1. Zheligovskij, V.A. (1960). *Jelementy teorii pochvoobratyvajushhih mashin i mehanicheskoy tehnologii sel'skhozajstvennyh materialov* [Elements of the theory of tillage machines and mechanical technology of agricultural materials] Tbilisi, Izd. GSHI 1201 [in Russian].
2. Bosoij, E.S. (1967). *Rezhushhie apparaty uborochnyh mashin* [Cutting devices of harvesting machines]. Moscow. Mashinostroenie [in Russian].
3. Zaika, P.M. *Teorijasil'skogospodars'kih mashin. Mashini dlja zagotivlikormiv* [Theory of agricultural machinery. Machines for forage harvesting]. V.II. Kharkiv: OKO [in Russian].
4. Reznik, N.E. (1975). *Teorija rezanija lezviem i osnovy rascheta rezhushhih apparatov* [The theory of cutting with a blade and the basics of calculating cutting devices]. Moscow. Mashinostroenie [in Russian].

5. Ivashko, A.A. (1958). Voprosy teorii rezanija organicheskikh materialov lezviem [Questions of the theory of cutting organic materials with a blade]. *Traktory i sel'hozmashiny – Tractors and Agricultural Machines*, 2, 34-37 [in Russian].
6. Vasilenko, I.F. (1937). Teoriya rezhushhih apparatov zhatvennykh mashin [Theory of cutting devices of reaping machines]. *Trudy VISHOM – - Proceedings of VISHOM*. Ser. 5. Moskva [in Russian]. 1201 [in Russian].
7. Zhang, Y., Cui, Q., Li, H., Zhang, Z., He, Y. & Sun, D. (2020). Simulation and test of cutting mechanical characteristics of millet stalk based on ANSYS/LS-DYNA. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 61 (2), pp. 143-150. DOI: 10.35633/inmateh-61-16 [in English].
8. Zhang, C.L., Chen, L.Q., Xia, J.F. & Zhang, J.M. (2019). Effects of blade sliding cutting angle and stem level on cutting energy of rice stems. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12 (6), pp. 75-81. DOI: 10.25165/ijabe.20191206.4604. [in English].
9. Zhang, Y., Cui, Q., Li, H., Sun, D., Hou, H. (2018). Effects of stem region, moisture content and blade oblique angle on mechanical cutting of millet stems. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 55 (2), pp. 105-112. ISSN20684215 [in English].
10. Tian, K., Li, X., Shen, C., Zhang, B., Huang, J., Wang, J., Zhou, Y. (2017). Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle. *Nongye Gongcheng Xuebao. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33 (5), pp. 56-61. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.05.008 [in English].
11. Klenin, N.I. & Sakun, V.A. (1980). *Sel'skhozjajstvennye i meliorativnye mashiny [Agricultural and reclamation machines]*. Moscow [in Russian].
12. Letoshnev, M.N. (1955). *Sel'skhozjajstvennye mashiny [Agricultural machines]* Moscow. L. Gos. izd. s.-h. literatury [in Russian].
13. Osobov V.I. (2009). *Mehanicheskaja tehnologija kormov [Mechanical feed technology]*. Moscow. Kolos [in Russian].
14. Hajlis, G.A. (1992). *Osnovy teorii i rascheta sel'skhozjajstvennykh mashin [Fundamentals of the theory and calculation of agricultural machines]*. Kiev, Izd-vo USHA, 1992. 235 s. 1201 [in Russian].

Viktor Sheichenko, Prof., DSc., **Igor Dudnikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Vitaliy Shevchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Viktor Shevchuk, Lecturer-Methodologist, Highest Category

Uman Vocational College of Technology and Business, Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Research of Conditions of Cutting of Stalks with Sliding

Features of cutting of a stalk by a blade with sliding are analytically investigated. The conditions of cutting with sliding of a horizontally located stalk with a knife are substantiated, according to which the blade must press on the stalk perpendicular to it and move at an angle ζ to the normal. The marked angle must be greater than the friction angle φ .

The limits of change of values of the angle ζ at which cutting of stalks with sliding is possible are analyzed and defined. It is noted that to ensure cutting of the stem with sliding, as well as to simultaneously and rationally reduce the sliding time of the blade on the stem, it is advisable to perform the operation of cutting stems at an angle ζ less than 90° .

The dependence determined by the conditions of observance by the angle ζ_p of the zone of the desired action of the velocity point of the blade point to ensure cutting of the stems with sliding is established.

The theoretical dependence for determining the sliding coefficient is established, which allows to numerically estimate the degree of sliding.

It is noted that cutting with sliding requires less force N , less normal pressure than non-slip cutting. Under such conditions, an increase in the angle ζ leads to a corresponding decrease in the force N .

The implementation of the results of the study in the cutting machines of harvesters, forage machines, as well as segmental cutters of reciprocating movement of harvesters, will allow due to the quality of the technological process of cutting plant stems with sliding increase in productivity up to 17%.

sliding cutting, sliding coefficient, sliding cutting conditions

Одержано (Received) 24.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 08.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 631.352

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.70-77>**В.М. Сало**, проф., д-р техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук,**Д.В. Богатирьов**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна**e-mail: serafsgm@ukr.net*

Вплив параметрів барабана для подрібнення рослинних решток на надійність протікання технологічного процесу

В роботі проводиться оцінка параметрів барабана для подрібнення рослинних решток на надійність протікання технологічного процесу. Проаналізовано існуючі конструкції котків-подрібнювачів рослинних решток та обґрунтовано взаємозв'язок окремих конструктивних та технологічних параметрів подрібнювачів на якісні показники їх роботи і можливість забивання міжножового простору. Проведені експериментальні дослідження по оцінці впливу кута розхилу між сусідніми ножами та робочої швидкості агрегату на ймовірність забивання міжножового простору. Доведено, що підвищення швидкості руху подрібнювачів та збільшення кута розхилу між ножами сприяють зменшенню забивання міжножового простору рослинно-грунтовою масою навіть при підвищеній вологості.

подрібнювачі рослинних решток, коток-подрібнювач, міжножовий простір, перекачування барабана, забивання міжножового простору, рослинно-грунтова маса, кут розхилу ножів, робоча швидкість агрегату

Постановка проблеми. Актуальною задачею аграрного виробництва України є максимально ефективного використання новітніх технологій рослинництва на кожному із етапів технологічних процесів, серед яких сьогодні окремо можна виділити технології мінімального обробітку ґрунту, прямої сівби, збирання врожаю із залишенням стеблостою і інших рослинних решток на поверхні поля тощо. Тенденція зниження кількості органічних добрив, які вносяться на поля під час вирощування продукції рослинництва є загрозовою і прослідковується майже у кожному фермерському господарстві, що пов'язане насамперед із занепадом тваринницької галузі та намаганням фермерів скоротити поточні витрати на вирощування сільськогосподарської продукції, а логічним результатом цього явища – є стрімка втрата гумусу та загальної родючості ґрунтів в цілому.

Досвід провідних аграрних держав доводить, що ефективного використання рослинних решток, які залишаються на поверхні поля після вирощування культури-попередника, із своєчасною і ефективною підготовкою цих решток, дозволяє значно поліпшити фізико-механічний стан ґрунту, частково вирішити проблему недостатності органічної речовини в ґрунтовому середовищі, забезпечує зниження втрат гумусу та дозволяє сповільнювати прояви вітрової та водної ерозій. Крім того, своєчасна підготовка і подрібнення рослинних решток культури попередника на поверхні поля може слугувати основною ґрунтозахисною землеробства та не вимагає значних витрат і використання складної і енергонасиченої техніки.

Виходячи із чого, питання впровадження у виробництво операцій підготовки рослинних решток, які залишаються на поверхні поля після збирання культури попередника та вдосконалення машин і знарядь для роботи із рослинними рештками на полях, дозволить започаткувати у господарстві систему ґрунтозбереження.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Незважаючи на той факт, що використання рослинних решток рослин-попередників, під час вирощування продукції рослинництва є доцільним і доведеним, наступні етапи технологій, серед яких мінімальний обробіток ґрунту, прямий посів та деякі інші операції, доводиться проводити в екстремальних умовах. Це пояснюється тим, що значна кількість рослинних решток, ускладнює перебіг технологічних операцій, призводить до забивань та погіршення стабільного заглиблення і руху, зокрема ґрунтообробних знарядь, сошників тощо, що в кінцевому варіанті сприяє погіршенню загальної якості технологічних операцій, які починають проводитися із показниками, що не відповідають діючим агротехнічним вимогам. Досить тривалий період часу, для подрібнення рослинних решток використовували дискові знаряддя, здебільшого важкі та середні дискові борони, дискатори [1, 2]. Втім відомо, що сферичні диски є одними із найбільш ерозійно небезпечних знарядь, та й якість подрібнення рослинних решток, зокрема високостебельних, таких як соняшник, кукурудза залишається заниженою, а тому для означених цілей такі агрегати використовувати не рекомендується [3, 4]. Явною альтернативою дисковим знаряддям є подрібнювачі рослинних решток [5, 6], що в залежності від конструкцій і призначення можуть використовуватися для ефективного подрібнення стерні і бур'яну, валків соломи, стебел кукурудзи і соняшнику на частинки довжиною до 20 см із наступним їх рівномірним розподіленням по поверхні поля [7].

Зважаючи на технічне забезпечення подрібнення рослинних решток як в нашій державі так і за кордоном, серед подрібнювачів на особливу увагу заслуговують безприводні машини, основним робочим органом яких є коток із яскраво вираженими ножами [8, 9, 10]. Такі котки-подрібнювачі відрізняються порівняно простою конструкцією, можуть забезпечувати високу продуктивність роботи та забезпечують якісний перебіг процесу подрібнення рослинних решток при швидкостях роботи до 25 км/год. Проведені численні дослідження [11, 12, 13] доводять, що саме такі високі швидкісні режими роботи котків-подрібнювачів є достатньою запорукою якісного виконання процесу подрібнення, але поряд із цим відмічається і суттєвий їх недолік – забивання міжножового простору котків рослинно-ґрунтовою масою, що значно загострюється із збільшенням вологості як ґрунту так і крупних рослинних решток. В зв'язку з чим виникає необхідність встановлення шляхів вирішення означеної проблеми, для того, щоб забезпечити ефективне використання котків-подрібнювачів при подрібненні рослинних решток після збирання високостебельних сільськогосподарських культур, наприклад соняшнику чи кукурудзи [14, 15].

Постановка завдання. Отже, метою даної роботи є обґрунтування конструкції та експериментальне встановлення раціональних параметрів котків-подрібнювачів рослинних решток виходячи із умови недопущення забивання міжножового простору рослинно-ґрунтовою масою.

Виклад основного матеріалу. Технологічний процес подрібнення рослинних решток котками-подрібнювачами полягає в тому, що під час перекочування котка по поверхні поля, плоскі ножі, які зафіксовані на поверхні котка, притискають рослини до ґрунту, перерізаючи їх при цьому лезами і залишаючи на поверхні поля. Варто відмітити, що забезпечити надійне і якісне виконання наведеного вище процесу подрібнення не завжди вдається. За сформованими в ННЦ ІМЕСГ вимогами до роботи подрібнювачів рослинних решток [14], такі машини повинні подрібнювати будь-які

рослинні рештки, що залишилися на поверхні поля до розмірів менших за 20 см, адже за таких умов, подрібнені рослинні рештки можуть легко зароблюватися в ґрунт при наступних ґрунтообробних операціях або ж не заважати проведенню наступних посівних робіт. Для забезпечення даних показників роботи подрібнювачів рослинних решток варто забезпечити виконання двох умов. Перша умова полягає в тому, що відстань між ножами, які закріплені на поверхні циліндричного барабану подрібнювача, повинна відповідати заданій довжині частинок стебел, фактично 20 см. Друга умова пов'язана із масою котка-подрібнювача, чи масою, що припадає на ніж, якої має бути достатньо для перерізання чи перебивання найбільш міцних стебел кукурудзи, соняшнику, бур'яну, та інших рослин. При більш ретельному аналізі видно, що наведені умови виявляються тісно пов'язаними між собою. Для того, щоб ніж перерізував рослинні рештки, він має бути певної висоти. Слід мати на увазі, що цієї висоти ножа має бути достатньо для того, щоб тиснути на стебло рослин і притискати його до поверхні ґрунту, а інколи, і вдавлювати це стебло в м'який ґрунт на деяку глибину, до виникнення зусилля підпорного різання, що здатне зруйнувати стебло. [15]

Стандартна висота ножів серійних виробників подібних машин дорівнює 12...15 см. Під час подрібнення рослинних решток із пористими стеблами, що легко руйнуються при контакті із ножами, в якості основи циліндричного барабана найчастіше використовуються труби діаметром 200...250 мм. З врахуванням цього, для забезпечення потрібної відстані між лезами ножів на циліндричній поверхні барабана із такою основою можна закріпити не більше 7...8 ножів (рис. 1, а). Кут розхилу між робочими площинами таких ножів складає близько 50° . За такої конструкції, навіть при частковому проникненні ножів циліндричного барабана в ґрунт, одночасно із ґрунтом та рослинними рештками повноцінно буде контактувати тільки один ніж, а наступний – почне послідовно виконувати свої функції вже в момент відриву попереднього ножа від поверхні поля. За таких умов роботи рослинно-ґрунтова маса не може бути затиснута між сусідніми ножами, а процес забивання є малоімовірним. Однак, котки-подрібнювачі рослинних решток малого діаметра, через свою малу вагу, погано працюють на полях із великою кількістю рослинності та не в змозі якісно перерізати високостебельні рослинні рештки. [12]

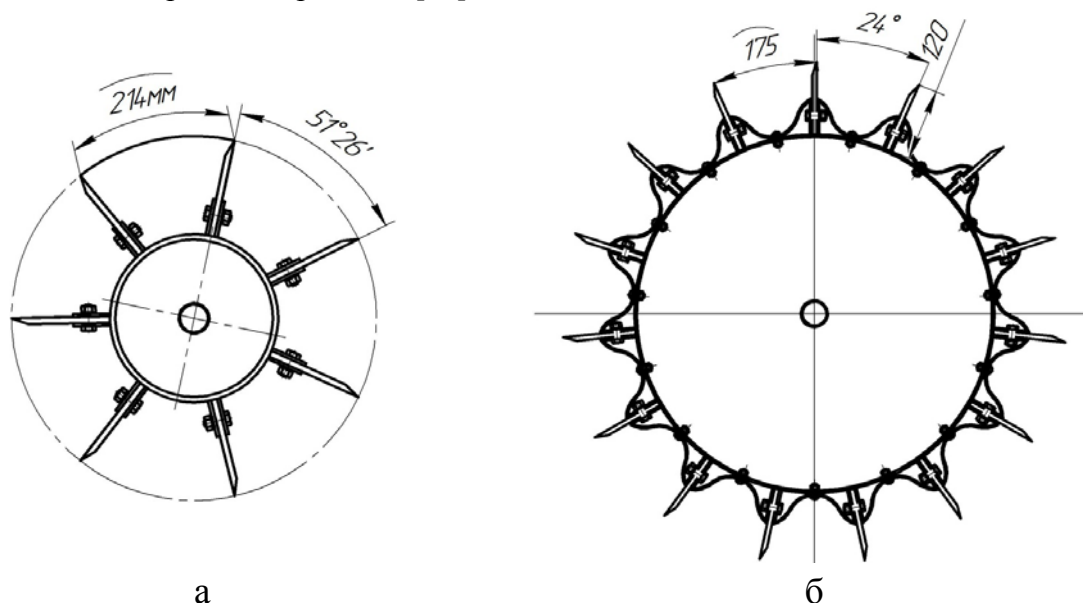


Рисунок 1 – Розташування ножів на поверхні циліндра котків-подрібнювачів рослинних решток:

а – коток малого діаметра; б – коток великого діаметра

Джерело: розроблено авторами з використанням [12, 13]

Для роботи на полях із великою кількістю рослинних решток та для подрібнення високостебельних культур варто використовувати котки-подрібнювачі із великою масою, вага яких часто доходить до однієї тони [8, 9]. Наведені робочі органи працюють зовсім з іншими умовами роботи, а такої маси виробники досягають шляхом значного збільшення робочого діаметра циліндра та забезпечення можливості додаткового заповнення цього циліндра водою або ж іншими матеріалами. За таких умов роботи, виходячи із умови подрібнення рослинних решток до довжини не більше 20 см, заданої відстані між лезами ножів і великому діаметрі циліндра, кількість ножів на барабані значно збільшується, що відразу ж приводить до суттєвого зменшення кута розхилу між ними (рис. 1, б). Саме така конструкція котка-подрібнювача забезпечує одночасний повноцінний контакт із ґрунтом двох, а подекуди і трьох ножів, що під час роботи котка, разом із перерізанням стебел, супроводжується їх затисканням із частками ґрунту між сусідніми ножами. Ймовірність такого забивання ножів рослинно-ґрунтовою масою різко підвищується із зростанням вологості матеріалу. В наслідок цього, в результаті накопичення певної критичної кількості рослинно-ґрунтової маси між ножами котка-подрібнювача, виконання технологічного процесу призупиняється.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми є обґрунтування раціональних конструктивних параметрів ножових барабанів великих діаметрів, але для цього необхідно мати інформацію про ряд, принаймні, основних впливових факторів на представлений процес та характер впливу цих факторів на показник забивання міжножового простору рослинно-ґрунтовою масою.

За результати попередніх досліджень [14, 15] встановлено, що серед найбільш впливових факторів на імовірність P забивання міжножового простору мають: серед конструктивних параметрів – кут розхилу між сусідніми ножами α , а серед технологічних параметрів – робоча швидкість агрегату V .

Інформація про взаємний зв'язок між наведеними параметрами дозволяє вирішити дану задачу шляхом вибору раціональних конструктивно-технологічних параметрів ножового барабана подрібнювача. Для цього, за стандартною методикою планування багатофакторного експерименту, були проведені експериментальні дослідження, в ході яких вивчали вплив на параметр оптимізації Y_1 , яким є імовірність забивання міжножового простору рослинно-ґрунтовою масою, кута розхилу ножів x_1 та робочої швидкості агрегату x_2 (табл. 1) [16]. В ході проведених досліджень проводили оцінку кількості виявлених випадків забивання з двадцяти залікових ділянок довжиною в 50 погонних метрів.

Таблиця 1 – Фактори та рівні їх варіювання для експериментальних досліджень роботи котка-подрібнювача

№ п.п.	Фактори		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
	Найменування	Позначення	Верхній (+)	Нижній (-)	
1	Кут розхилу ножів (α , град)	x_1	25	45	10
2	Робоча швидкість агрегату (V , м/с)	x_2	1,4	7,0	2,8

Джерело: розроблено авторами з використанням [16]

Під час проведення експериментальних досліджень в якості засобу агрегування використовувався трактор МТЗ-130, а в якості експериментального

котка-подрібнювача використовувався серійний подрібнювач рослинних решток ПК-4,5, що виробляється на ПП «Савицький М.І.» (рис. 2). Експериментальні дослідження проводилися на полях агрофірми «Злагода», Маловисківського району, Кіровоградської обл.



Рисунок 2 – Загальний вигляд експериментального котка-подрібнювача рослинних решток ПК-4,5

Джерело: розроблено авторами з використанням [8, 12, 13]

При проведенні польових експериментів поле попередньо розділялося за довжиною на 20 залікових ділянок довжиною по 50 м. кожна. Якщо під час роботи котка-подрібнювача хоча б в одному місці міжножовий простір барабана забивався рослинними рештками з ґрунтом при проходженні агрегатом одної з двадцяти залікових ділянок, то вважалося, що імовірність забивання в такому випадку становить 5%. Крім того, якщо забивання міжножового простору повторювалося на всіх двадцяти залікових ділянках то імовірність в такому випадку вважалася 100%.

Значення кута розхилу ножів на барабані подрібнювача змінювали за рахунок зміни кількості встановлених ножів на поверхні циліндра. Така процедура зміни кількості ножів під час експериментів спрощувалася за рахунок того, що конструктивно на серійній машині ножі закріплювалися на барабані подрібнювача в три ряди із певним зміщенням. Наведена конструктивна особливість подрібнювача дозволила суттєво знизити кількість залікових заїздів при дослідженнях, оскільки на одному котку-подрібнювачі одночасно можна встановлювати три різних кути розхилу ножів. (рис. 2).

Результати проведених досліджень заносили до журналу. В стаціонарних умовах підраховувалося значення показника імовірності забивання у відсотках, яке було враховане при подальшому статистичному аналізі процесу.

За стандартною методикою в системі прикладних програм STATISTICA 10 після реалізації експерименту отримано рівняння регресії, що дозволяє оцінити вплив факторів на критерій оптимізації, яке має вигляд:

$$Y(P) = 280,7264 - 9,6474x_1 - 9,1932x_2 + 0,0829x_1^2 + 0,1612x_1x_2 - 0,1345x_2^2.$$

Отримане рівняння дозволяє відмітити, що максимальний вплив на імовірність забивання міжножового простору рослинно-ґрунтовою масою мають як кут розхилу між сусідніми ножами так і робоча швидкість агрегату, крім того, суттєво впливає попарна взаємодія обох факторів і квадратичне значення робочої швидкості агрегату. Графічна інтерпретація експериментальних досліджень у вигляді поверхні відгуку та ліній рівних зрізів (рис. 3), дозволяє відмітити, що як збільшення робочої швидкості

агрегату V так і зростання кута розхилу між сусідніми ножами α сприяє зменшенню ймовірності забивання міжножового простору рослинно-грунтовою масою. При роботі котка-подрібнювача подібної конструкції до ПК-4,5 рекомендована швидкість руху знаходиться в діапазоні $V = 7 \dots 8$ м/с за умов кута розхилу між сусідніми ножами $\alpha = 42 \dots 46^\circ$. Саме за таких конструктивно-технологічних параметрів ймовірність забивання міжножового простору P не перевищує 8%.

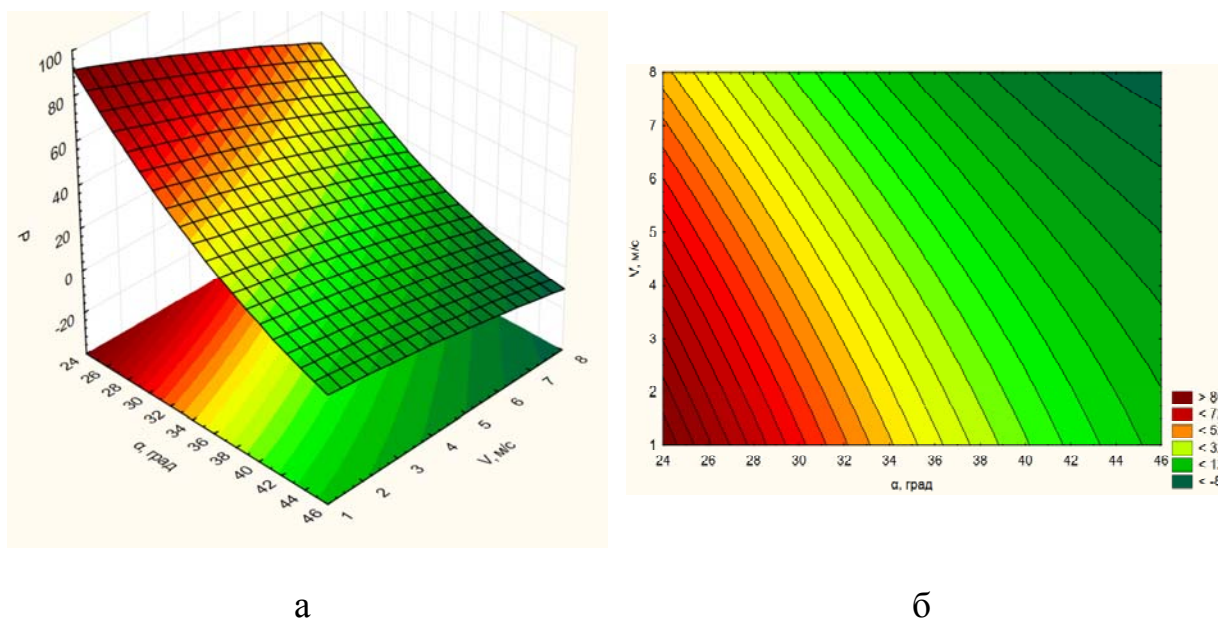


Рисунок 3 – Залежність ймовірності забивання міжножового простору рослинно-грунтовою масою (P , %) від кута розхилу між ножами подрібнювача (α , град) та робочої швидкості агрегату (V , м/с):
а – поверхня відгуку; б – лінії рівних зрізів

Джерело: розроблено авторами

Висновки:

1. Впровадження у виробництво продукції рослинництва технологічних процесів ефективної підготовки рослинних решток дозволить започаткувати у господарстві систему ґрунтозбереження.
2. Проводити подрібнення рослинних решток найбільш доцільно безприводними котками-подрібнювачами, основними робочими органами яких є коток із закріпленими на циліндрі ножами, причому в залежності від призначення, кількості і типу рослинних решток, практично застосовуються котки із великим та малим діаметром.
3. При подрібненні високостебельних рослинних решток рекомендується використовувати котки-подрібнювачі великого діаметру із наступними параметрами: швидкість руху агрегату $V = 7 \dots 8$ м/с, кут розхилу між сусідніми ножами $\alpha = 42 \dots 46^\circ$. Наведені параметри котка-подрібнювача рослинних решток зменшують ймовірність забивання міжножового простору до 8%.

Список літератури

1. Гапоненко В.С., Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини. 6-е вид., перероб. і допов. К.: Урожай, 1992. 448 с.
2. Сало В.М., Сисолін П.В., Місків В.З. Экологические проблемы присущие традиционным приемам обработки почв и отдельные пути их решения. *Prezent si viitor in domeniul mecanizarii si electrificarii agrikulturii*. Chisinau, 2000. Z.121-124.
3. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив: навч. посіб. / Сало В.М. та ін. Харків, 2015. 244с.

4. Bauer, P.J., Reeves, D.W. A comparison of winter cereal species and planting dates as residue cover for cotton grown with conservation tillage. *Crop Sci.* 1999. Vol.39. P.1824–1830.
5. Creamer N.G., Dabney S.M. Killing cover crops mechanically: Review of recent literature and assessment of new research results. *American Journal of Alternative Agriculture* , Vol. 17 . Issue 1 , March 2002. Pp. 32 – 40 DOI: <https://doi.org/10.1079/AJAA20014>
6. Лінник М.К., Лукаш М.І. Технологічні аспекти використання соломи для удобрення ґрунту. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2010. Вип. 94. С. 76-84.
7. Ashford D.L., Reeves D.W. Use of a mechanical roller-crimper as an alternative kill method for cover crop. *American Journal of Alternative Agriculture*. 2003. Vol. 18(1). P.37-45.
8. Korneski T.S., Prior S.A. Equipment Development to Manage Cover Crops for Small and Urban No-till Farming Systems. *Chemical Engineering Transactions*. July 2017. Vol. 58. P. 181-186.
9. Korniecki T.S., A.J. Price Performance of Different Roller Designs in terminating rye cover crop and reducing vibration. *Applied Eng. Agric – Alabama, USA*. Vol. 22(5). P.633-641.
10. Говоров О.Ф., Гуков Я.С., Мойсеєнко В.К. Машини для скошування і подрібнення рослин або їх решток і розподілення частинок по поверхні ґрунту. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2010, Вип. 94, С. 29-48.
11. Тагаєв Х. К определению сопротивления воды на лобовую поверхность катка-фрезы. *Сборник научных трудов. Ташкентский ИИМСХ*, 1985, С.115-120.
12. Коток-подрібнювач рослинних решок: пат. 83199 Україна. / Сало В.М., Лузан П.Г. Богатирьов Д.В., Мачок Ю.В., Лузан О.Р.; заявник і патентотримач Сало В.М. №u2013 03722; заявл. 26.03.2013; опубл. 27.08.2013, Бюл. №16.1.
13. Подрібнювач рослинних залишків DAL-BO Maxicut 600. URL: http://selhozpostavka.com.ua/pic/catalog/catalog_info_3_520.jpg (дата звернення: 12.10.2021)
14. Сало В.М., Богатирьов Д.В., Лещенко С.М., Савицький М.І. Вітчизняне технічне забезпечення сучасних процесів у рослинництві. *Техніка і технології АПК*. 2014. №10. С. 16-19.
15. Influence of equal-area projection of the cylinder drum's cross-section height on the description accuracy of its overcoming the air resistance force / Bohatyrov D.V. et al. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 52, No. 2, P. 45-56. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57195529074> (Last accessed: 14.10.21)
16. Підручник дослідника: навч. посіб./ Васильковський О.М., Лещенко С.М., Васильковська К.В., Петренко Д.І. Х.: Мачулін, 2016. 204 с.

Referencis

1. Haponenko, V.S. & Voitiuk, D.H. (1992). *Agricultural machines. A textbook for students of agricultural specialties*. (6th ed.) Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
2. Salo, V.M., Sysolin, P.V. & Miskiv, V.Z. (2000). *Ekologhycheskye problemu prysushhye tradyconnum pryemam obrabotky pochv y otdelnye puty ykh resheniya* [Environmental problems inherent in traditional methods of tillage and some ways to solve them] . Prezent si viitor in domeniul mecanizarii si elektrificarii agrikulturii. Chisinau [in Ukrainian].
3. Salo, V.M., Leshhenko, S.M., Luzan, P.G., Machok, Yu.V. & Bohatyrov, D.V. (2016). *Mashyny dlia obrobittu ґрунту ta vnesennia dobyrv. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv ahrotekhnichnykh spetsialnostei* [Tillage and fertilizer machines. A textbook for students of agricultural specialties]. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].
4. Bauer, P.J. & Reeves, D.W. (1999). A comparison of winter cereal species and planting dates as residue cover for cotton grown with conservation tillage. *Crop Sci.* Vol.39, 1824–1830 [in English].
5. Creamer, N.G. & Dabney, S.M. (2002). Killing cover crops mechanically: Review of recent literature and assessment of new research results. *American Journal of Alternative Agriculture*, Vol. 17, issue 1, March 2002, 32 – 40 [in English].
6. Linnyk, M.K. & Lukash, M.I. (2010). Tekhnolohichni aspekty vykorystannia solomy dlia udobrennia ґрунту. [Technological aspects of using straw for soil fertilization] *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, Vol. 94, 76-84 [in Ukrainian]
7. Ashford, D.L. & Reeves, D.W. (2003). Use of a mechanical roller-crimper as an alternative kill method for cover crop. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1), 37-45 [in English].
8. Korneski, T.S. & Prior, S.A. (2017). Equipment Development to Manage Cover Crops for Small and Urban No-till Farming Systems. *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 58, 181-186 [in English].
9. Korniecki, T.S. & Price, A.J. (2017). Performance of Different Roller Designs in terminating rye cover crop and reducing vibration. *Applied Eng. Agric – Alabama, USA*, Vol. 22(5), 633-641 [in English].

10. Hovorov, O.F., Hukov, Ya.S. & Moiseienko, V.K. (2010). Mashyny dlia skoshuvannia i podribnennia roslyn abo yikh reshtok i rozpodilennia chastynok po poverkhni gruntu. [Technological aspects of using straw for soil fertilization]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture, Vol. 94*, 29-48 [in Ukrainian].
11. Tahaev, Kh. (1985). K opredeleniyu soprotivleniya vodu na lobovuiu poverkhnost katka-frezu. [To determine the water resistance on the front surface of the roller cutter]. *Sbornyk nauchnykh trudov. Tashkentskiy YIMSKh – Collection of scientific papers. Tashkent Institute of Agriculture*, 115-120 [in Russian].
12. Patent na korusnu model 83199. *Kotok-podribniuvach roslynnykh reshok [crimp-roller]* / Salo V.M., Luzan P.H., Bohatyrov D.V., Machok Yu.V., Luzan O.R.; zaiavnyk i patentotrymach Salo V.M. – №u2013 03722; zaiavl. 26.03.2013; opubl. 27.08.2013, Biul. №16.1. [in Ukrainian].
13. Crimp-roller DAL-BO Maxicut 600. *selhozpostavka.com.ua*. Retrieved from http://selhozpostavka.com.ua/pic/catalog/catalog_info_3_520.jpg
14. Salo, V.M., Bohatyrov, D.V., Leshchenko, S.M. & Savytskyi, M.I. (2014). Vitchyzniane tekhnichne zabezpechennia suchasnykh protsesiv u roslynnytstvi. [Domestic technical support of modern processes in crop production]. *Tekhnika i tekhnolohii APK – Machinery and technology of AIC*, 10, 16-19. [in Ukrainian]
15. Bohatyrov, D.V., Salo, V.M., Kyslun, O.A., Skrynnik, I.O. & Kisilov, R.V. (2017). Influence of equal-area projection of the cylinder drum's cross-section height on the description accuracy of its overcoming the air resistance force. *INMATEH - Agricultural Engineering. Vol. 52. No. 2*. P. 45-56 [in English].
16. Vasylykovskiy, O.M., Leshchenko, S.M., Vasylykovska, K.V. & Petrenko, D.I. (2016). *Pidruchnyk doslidnyka. [Researcher's textbook. A textbook for students of agricultural specialties]*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].

Vasyl Salo, Prof., DSc., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Bohatyrov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Influence of the Parameters of a Chopping Rotor for Plant Residues on the Reliability of the Technological Process

The paper presents the assessment of the parameters of a chopping rotor for shredding plant residues for the reliability of the technological process. The general objective of the work is to substantiate the design and experimental identification of rational parameters of crimp-rollers of plant residues based on the condition of preventing clogging of the inter-knife space with plant-soil mass.

The existing designs of crimp-rollers of plant residues are analyzed and the interrelation of certain constructive and technological parameters of shredders on qualitative indicators of their operation and possibility of clogging of inter-knife space is substantiated. The design of a large diameter crimp-roller provides simultaneous full contact with soil of two and sometimes three knives, which during the operation of the roller, together with cutting stems, provides them clamping with soil particles between adjacent knives. The probability of clogging between knives with plant and soil mass increases sharply with the humidity level of the material. Experimental studies have been conducted to assess the effect of the angle of inclination between adjacent knives and the operating velocity of the unit on the probability of clogging the inter-knife space. It is proved that increasing the speed of the shredders and increasing the decay angle between the knives help to reduce clogging of the inter-knife space with plant-soil mass, even at high humidity.

The introduction of technological processes of effective preparation of plant residues in the production of crop products will allow starting the system of soil conservation at a farm. It is most expedient to grind plant residues with driveless roller shredders, the main operating parts of which are rollers with knives mounted on the cylinder, and depending on the purpose, quantity and type of plant residues, rollers with large and small diameters are practically used. When shredding high-stem plant residues, it is recommended to use crimp-rollers of large diameter with the following parameters: speed of the unit is 7...8 m/s, the decay angle between adjacent knives is 42... 46°. These parameters of the crimp-roller of plant residues reduce the probability of clogging the inter-knife space to 8%.

crop residue shredders, crimp-roller, inter-knife space, rotor rolling, clogging of the inter-knife space, plant-soil mass, knife decay angle, unit operating speed

Одержано (Received) 28.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 633.522

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.78-88>**В.О. Шейченко**, проф., д-р техн. наук*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: vsheychenko@ukr.net***М.І. Черновол**, проф., академік НААН України, д-р техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***В.А. Вольський**, ст. досл., канд. техн. наук, **Р.В. Коцюбанський**, асп.*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт. Глеваха, Україна*

Дослідження впливу схеми розташування ножів котка-подрібнювача на показники якості подрібнення стебел соняшнику

Роботу присвячено удосконаленню технологічного процесу подрібнення стебел соняшнику завдяки дослідженню впливу схеми розташування ножів котка-подрібнювача на показники якості подрібнення. Розроблено та виготовлено дослідний зразок котка-подрібнювача, ріжучі ножі у якого розміщено по всій ширині захвату у шаховому порядку з можливістю змінювати кут нахилу до осі обертання барабана в діапазоні 5...20°. Досліджено вплив розташування ріжучої кромки подрібнюючого ножа котка на показники якості виконання операцій подрібнення і загортання стебел соняшнику **подрібнення стебел соняшнику, рослинні рештки, коток-подрібнювач, показники якості подрібнення**

Постановка проблеми. Подрібнення і зароблення у ґрунт грубостеблових культур надзвичайно важлива у мінливих умовах сьогодення технологічна операція. Своєчасне її виконання сприяє збереженню і накопиченню вологи у ґрунті, створює живильне середовище для природного протікання біологічних процесів. Виконання відмічених операцій подрібнення і зароблення стебел кукурудзи, соняшнику, ріпаку, сидератів та низки інших культур покладено на спеціальні машини. Серед них найбільшого поширення отримали комбіновані агрегати, що містять дискову борону та коток-подрібнювач. Така комбінація знарядь крім відмічених вище переваг покращує агрономічні показники рівномірності перемішування подрібнених часток стебел із ґрунтом, створює сприятливі умови для посівів.

Якість подрібнення стебел грубостеблових культур є складним функціоналом, серед визначальних чинників якого відмітимо вдалі конструкційні рішення на етапах проектування та розроблення машини, науково обґрунтуванні параметри і режими її функціонування, визначені і враховані залежності показників якості від техніко-технологічних параметрів конструкції машини. Тобто це певне узгодження агротехнічних вимог виробництва сільськогосподарської культури з техніко-технологічним варіантом їх реалізації..

В Україні та в багатьох інших державах Європи, США та Канади проведено низку важливих науково-дослідних робіт та конструкційних розробок з удосконалення котків-подрібнювачів. Проте загальна методологія обґрунтування раціональних технологічних параметрів відсутня. Це актуально як для комбінованих машин, до

складу яких віднесено комбінацію дискового ротаційного знаряддя та котка-подрібнювача, так і котків-подрібнювачів у вигляді моно знарядь. Без вирішення відмічених протиріч не уникнути серйозних прорахунків у майбутньому за умов проектування нових машин.

Сліпо копіювати чужі розробки з не обґрунтованими рішеннями – це шлях до подальшого загострення і накопичення проблем.

Природно, що умови експлуатації котків-подрібнювачів здійснюють визначальний вплив на показники якості виконання технологічного процесу. Іноді цей вплив настільки відчутний, що виникає потреба розроблення модельного ряду знарядь не тільки для окремої ґрунтово-кліматичної зони, а й для окремого поля господарства.

Коливання у широкому діапазоні механіко-технологічних властивостей рослинного середовища відносять до основного чинника, що визначає якість роботи засобів для подрібнення.

Саме тому актуальним є розроблення спеціальних машин, які містять котки-подрібнювачі, що уможливають застосовувати їх для швидкого виконання поверхневого обробітку ґрунту з інтенсивним його перемішуванням, лушення стерні, обробітку кукурудзяних, сояшникових, ріпаківих полів із великою кількістю рослинних решток, передпосівного обробітку ґрунту та загортання органічних добрив.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Розроблення систем обробітку ґрунту здійснюється на підставі аналізу біологічних особливостей культур, стану полів, агрофізичних властивостей ґрунтів, кліматичних, організаційних, техніко-технологічних та виробничих можливостей господарства [1].

До правильної системи обробітку ґрунту відносять основний обробіток з попереднім лушенням стерні та відповідними заходами передпосівної і післяпосівної підготовки ґрунту [2].

Агротехнічні вимоги до лушення стерні включають такі основні операції: розпушування верхнього шару ґрунту для збереження наявних запасів вологи, повне підрізання і механічне знищення багаторічних та однорічних бур'янів, неглибоке загортання насіння бур'янів у ґрунт, подрібнення кореневищ пирію та коренів осотів, механічне знищення збудників хвороб, а також шкідників [3].

Лушення стерні проводять вслід за збиранням попередника, щоб зберегти “тіньову” вологість ґрунту. Це дає можливість виорати (обробити) поле якісно, без брил [4].

За таких умов відмітимо відсутність у вище наведених публікаціях кількісного оцінювання показників якості виконання операцій подрібнення грубостеблових культур у всьому діапазоні розмірів рослинних решток.

У статті [5] наведено результати досліджень машинно-тракторного агрегату, який одночасно виконує технологічні операції подрібнення і загортання ґрунтом рослинних залишків (сояшникова стерня). Першу операцію здійснюють завдяки подрібнювача рослинних залишків, встановленого спереду. Плуг, встановлений позаду здійснює операцію загортання. Проте питання визначення впливу на якість подрібнення рослинних решток швидкості руху агрегату залишилися поза увагою авторів.

Розроблена авторами статті [6] машина поєднала функції очищення стерні та відкриття борозни. За результатами статистичного аналізу зроблено висновок, що швидкість обертання лопаті, що руйнує стерню, не впливала на опір обробітку ґрунту. Проте поза увагою авторів залишилися питання визначення впливу розташування ріжучої кромки ножа на показники якості подрібнення стебел сояшнику.

За результатами експериментальних досліджень двокаткового культиватора відмічено високу якість його роботи на подрібненні стебел кукурудзи [7]. Показник

рівня подрібнення стебел досягав 90%. Проте автори не наводять конкретні значення ступеня подрібнення стебел кукурудзи у діапазонах 0-50мм, 50-100мм, 100-150мм, 150-200мм, понад 200мм.

Авторами статті [8] на підставі розробленої математичної моделі проаналізовано умови взаємодії стебла із сошником. Запропоновано два види можливих варіантів розташування ножів, що створює передумови проектування нового типу вузько смугових роторних культиваторів та подрібнювачів рослинних решток. Проте поза увагою авторів залишилося експериментальне дослідження запропонованої конструкції.

Відмітимо актуальність розроблення спеціальних машин, які містять катки-подрібнювачі. Завдяки їм уможлиблюється швидке виконання поверхневого обробітку ґрунту з інтенсивним його перемішуванням, лущення стерні, обробіток полів із великою кількістю решток грубостеблових культур, передпосівний обробіток ґрунту та загортання органічних добрив.

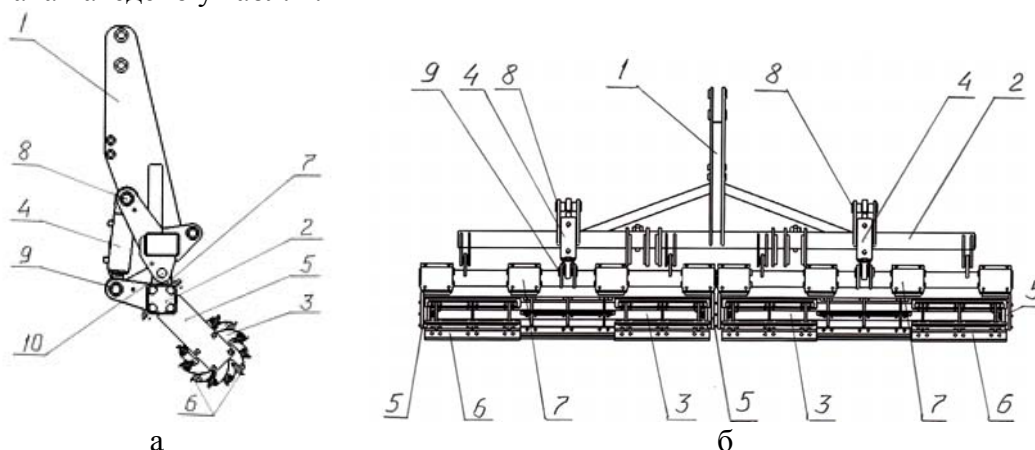
Постановка завдання. Метою досліджень є підвищення якості та зменшення енергетичних витрат операцій подрібнення і загортання рослинних решток котком-подрібнювачем завдяки встановленню впливу схеми розташування його ножів на показники якості подрібнення.

Задачі досліджень:

- розробити та виготовити коток-подрібнювач із змінними до осі обертання кутами нахилу ріжучих ножів;
- дослідити вплив розташування ріжучої кромки подрібнюючого ножа котка на показники якості виконання операцій подрібнення і загортання стебел соняшнику.

Виклад основного матеріалу.

Розроблення та виготовлення котка-подрібнювача із змінними до осі обертання кутами нахилу ріжучих ножів. Розроблено та виготовлено коток-подрібнювач, що містить раму (рис. 1), на якій шарнірно через пальці закріплено підрамник, де встановлено за допомогою кронштейнів два барабани з ріжучими ножами, що розміщено по всій ширині захвату у шаховому порядку. Відмічені ножі здатні змінювати кут нахилу до осі обертання барабана в діапазоні $5...20^\circ$, причому і підрамник разом з барабанами може опускатися і підніматися у вертикальній площині завдяки двом гідроциліндрів, які закріплено шарнірно. Технічну характеристику котка-подрібнювача наведено у табл. 1.



а – вид збоку; б – вид зверху

1 – рама; 2 – підрамник; 3 – барабани; 4 – гідроциліндри; 5 – кронштейни; 6 – ріжучі ножі;
7 – фланці; 8, 9, 10 – пальці

Рисунок 1 – Схема котка-подрібнювача рослинних решток

Джерело: розроблено авторами

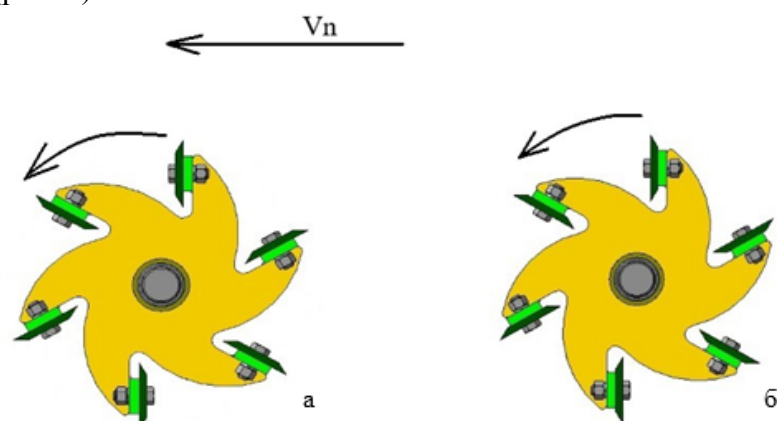
Таблиця 1 – Загальна технічна характеристика експериментального зразка котка-подрібнювача

№ п/п	Показник	Значення
1	Діаметр барабана котка	330 мм
2	Довжина барабана котка	2000 мм
3	Ширина експериментального зразка	4200 мм
4	Маса експериментального зразка	1200 кг
5	Кількість барабанів	2 шт.
6	Кількість рядів ножів на барабані	6 шт.
7	Відстань між лезами ножів	165 мм
8	Розмір ножа (довжина, ширина, товщина)	505 мм/76 мм/8 мм
9	Кількість ножів у ряді барабана	4 шт.
10	Кут заточки ножа	30°
11	Кут нахилу ножа до осі барабана	10°

Джерело: розроблено авторами

Коток-подрібнювач рослинних решток може працювати як у складі причіпного комбінованого агрегату для подрібнення і зароблення рослинних решток, так і автономно, як начіпна машина, що агрегується з трактором.

Конструкційне виконання ножів котка-подрібнювача уможлиблює їх встановлення із зовнішнім (правим), або орієнтуванням ріжучої кромки ножа всередину барабану (лівим) (рис. 2).



а – лівого; б – правого

Рисунок 2 – Схема розміщення ножів на барабанах котка-подрібнювача

Джерело: розроблено авторами

Цю конструкційну особливість було використано з метою встановлення впливу варіанту орієнтації ріжучої кромки ножа (варіант встановлення ножа) на показники якості подрібнення і зароблення рослинних решток.

Результати досліджень з визначення впливу розташування ріжучої кромки ножа на показники якості подрібнення стебел соняшнику. У таблицях 2, 3 наведено результати розподілення фракцій решток соняшнику за умов різного розташування ножа у котку-подрібнювачу: з розвернутою всередину до барабану ріжучою кромкою (ліве, табл. 3) і обернутого на 180° ножа (праве, табл. 2). Вертикальне довантаження котка складало 7,8 кН (маса 800кг) на усю ширину захвату за швидкості руху 7,45км/год.

Аналізуючи отримані результати (табл. 2, 3) відмітимо, що за умов лівого розміщення ножа барабану котка на всіх інтервалах, що досліджувалися, спостерігається збільшення відсотку подрібнених фракцій. Так у діапазоні 0-50мм середнє значення відсотку подрібнених фракцій за лівого розташування ножа складало 12,46% проти 10,52% у правого, у інтервалі 51-100мм відповідно 34,7% у лівого і 30,2% правого, у інтервалі 101-150 ці показники склали 62,4% і 52,9% відповідно. Перевищення обсягу подрібнених частинок за умов лівого розташування ножа у порівнянні з правим у інтервалі 0-150мм склало близько 18%.

Встановлено, що відсоток подрібнених на фракції стебел соняшнику за лівого розміщення ножа на усіх інтервалах, що досліджувалися, перевищувало на 4% значення за правого розміщення (вертикальне довантаження котка у дослідах складало 7,8 кН (маса 800кг), а швидкість руху 7,45км/год). Це обумовлено тим, що фізичні процеси різання (подрібнення) односторонньо заточеними ножами у розглянутих варіантах різного їх розміщення будуть суттєво відрізняються. Розвертання ножа зміщує площину різання на товщину ножа.

Відомо, що у сільськогосподарському виробництві для багатьох стаціонарних випадкових процесів (до яких віднесемо і якість подрібнення рослинних решток) характерним є те, що одна реалізація достатньої тривалості цілком представляє всю функцію. Такі процеси називаються ергодичними, а цю властивість – ергодичною. У ергодичних процесах середні значення характеристик в будь якій реалізації однакові. Тому характеристики такої випадкової функції можна визначити по одній достатньо довгій реалізації.

Таблиця 2 – Узагальнені результати досліджень розподілення фракцій решток соняшнику котком-подрібнювачем із довантаженням 800 кг

Фракція	7,45 км/год	10,08 км/год	13,6 км/год	18,6 км/год	22 км/год
	відсоток	відсоток	відсоток	відсоток	відсоток
З правим розташуванням ножів					
Менше 50	12,5	13,1	5,9	20,2	14,8
51–100	34,7	37,7	23,96	53,6	41
101–150	79,4	57,4	49,3	72,6	62,3
151–200	84,1	80,3	77,6	83,3	82
Понад 201	97	96,7	95,5	97,6	96,7
З лівим розташуванням ножів					
Менше 50	12,4	11	13	10,5	15,9
51–100	36,5	26	37	32,9	41,3
101–150	60,6	37	60	52,6	63,5
151–200	84,1	63	85	76,3	85,7
Понад 201	97,3	89	-	96,1	98,4

Джерело: розроблено авторами

У стаціонарних процесах адекватною моделлю закону розподілення випадкової величини є розподіл Вейбулла [9]. Для дослідження і порівняння значень довжини показників якості подрібнення стебел соняшнику котком-подрібнювачем за різних значень швидкості руху використано методи теорії ймовірності та описової статистики, а також набір функцій програми Microsoft Excel.

Розподіл часток подрібнених стебел соняшнику визначено за умов проходження котком-подрібнювачем з правим розташуванням ножів ділянки поля зі швидкістю 7,45км/год, 800кг довантаженням.

Таблиця 3 – Узагальнені результати досліджень розподілення фракцій решток соняшнику котком-подрібнювачем із довантаженням 600кг

Фракція	7,45 км/год	10,08 км/год	13,6 км/год	18,6 км/год	22 км/год
	відсоток	відсоток	відсоток	відсоток	відсоток
З правим розташуванням ножів					
Менше 50	12,9	18,6	12,7	16,4	12,6
51–100	38,7	50,4	37,2	43	38,6
101–150	51,6	72,6	60,8	67,0	62,2
151–200	74,2	88,5	83,3	86,0	85,0
Понад 201	93,5	98,2	98,0	97,5	99,2
З лівим розташуванням ножів					
Менше 50	14,5	21	18,8	20,6	31,6
51–100	30,3	50	50,6	53,2	43,0
101–150	56,6	69	75,3	72,3	67,1
151–200	81,6	88	90,6	89,4	88,0
Понад 201	96,1	98	98,8	-	98,7

Джерело: розроблено авторами

Математичним опрацюванням 67 даних відмічених часток стебел соняшнику встановлено, що він описується законом розподілу Вейбулла з оцінкою математичного сподівання $\bar{M}[X_1^{np}] = 96,779$, середнім квадратичним відхиленням $\sigma_{X_1^{np}} = 58,009$, коефіцієнта варіації $n_{X_1^{np}} = 0,684$. Функція густини цього розподілу описується рівнянням (1):

$$f(X_1^{np}) = \frac{1,48}{93,796} \cdot \left(\frac{X_1^{np} - 12}{93,796} \right)^{(1,48-1)} \exp \left[- \left(\frac{X_1^{np} - 12}{93,796} \right) \right]^{(1,48-1)}. \quad (1)$$

Розподіл часток подрібнених стебел соняшнику за умов проходження котком-подрібнювачем з правим розташуванням ножів ділянки поля зі швидкістю 10,08 км/год, 800кг довантаженням встановлено завдяки математичному опрацюванню 64 даних відмічених часток стебел. Встановлено, що він описується законом розподілу Вейбулла з оцінкою математичного сподівання $\bar{M}[X_2^{np}] = 109,141$, середнього квадратичного відхилення $\sigma_{X_2^{np}} = 64,157$, коефіцієнта варіації $n_{X_2^{np}} = 0,667$. Функція густини цього розподілу описується рівнянням (2):

$$f(X_2^{np}) = \frac{1,519}{106,703} \cdot \left(\frac{X_2^{np} - 13}{106,703} \right)^{(1,519-1)} \exp \left[- \left(\frac{X_2^{np} - 13}{106,703} \right) \right]^{1,519}. \quad (2)$$

Математичним опрацюванням 73 даних подрібнених часток стебел соняшнику за умов проходження котком-подрібнювачем з правим розташуванням ножів ділянки поля зі швидкістю 13,6 км/год, 800 кг довантаженням встановлено розподіл часток подрібнених стебел. Цей розподіл описується законом Вейбулла з оцінкою математичного сподівання $\bar{M}[X_3^{np}] = 118,916$, середнього квадратичного відхилення $\sigma_{X_3^{np}} = 57,217$, коефіцієнта варіації $n_{X_3^{np}} = 0,674$. Функція густини цього розподілу описується рівнянням (3):

$$f(X_3^{np}) = \frac{1,504}{94,134} \cdot \left(\frac{X_3^{np} - 13}{94,134} \right)^{(1,504-1)} \exp \left[- \left(\frac{X_3^{np} - 13}{94,134} \right) \right]^{1,504}. \quad (3)$$

Математичним опрацюванням 96 даних подрібнених часток стебел соняшнику за умов проходження котком-подрібнювачем з правим розташуванням ножів ділянки поля зі швидкістю 18,6 км/год, 800 кг довантаженням встановлено розподіл часток подрібнених стебел. Цей розподіл описується законом Вейбулла з оцінкою математичного сподівання $\bar{M}[X_4^{np}] = 84,583$, середнього квадратичного відхилення $\sigma_{X_4^{np}} = 54,026$, коефіцієнта варіації $n_{X_4^{np}} = 0,822$. Функція густини цього розподілу описується рівнянням (4):

$$f(X_4^{np}) = \frac{1,233}{74,408} \cdot \left(\frac{X_4^{np} - 14}{75,408} \right)^{(1,233-1)} \exp \left[- \left(\frac{X_4^{np} - 14}{75,408} \right)^{1,233} \right]. \quad (4)$$

Математичним опрацюванням 69 даних подрібнених часток стебел соняшнику за умов проходження котком-подрібнювачем з правим розташуванням ножів ділянки поля зі швидкістю 22 км/год, 800 кг довантаженням встановлено розподіл часток подрібнених стебел. Цей розподіл описується законом Вейбулла з оцінкою математичного сподівання $\bar{M}[X_5^{np}] = 101,427$, середнього квадратичного відхилення $\sigma_{X_5^{np}} = 61,723$, коефіцієнта варіації $n_{X_5^{np}} = 0,723$. Функція густини цього розподілу описується рівнянням (5):

$$f(X_5^{np}) = \frac{1,401}{93,748} \cdot \left(\frac{X_5^{np} - 16}{93,748} \right)^{(1,401-1)} \exp \left[- \left(\frac{X_5^{np} - 16}{93,748} \right)^{1,401} \right]. \quad (5)$$

Аналізуючи значення математичних сподівань розподілів подрібнених часток стебел за умов 800 кг довантаженням котка з правим розташуванням ножів-подрібнювачів відмітимо, що найменше $\bar{M}[X_4^{np}] = 84,583$ встановлено за швидкості руху 18,6 км/год. Це значення на 14% менше за швидкості 7,45 км/год, на 30% менше за швидкості 10,08 км/год, на 40% менше ніж за швидкості 13,6 км/год, на 20% менше ніж за швидкості 22 км/год.

Програмою досліджень передбачалося встановлення впливу схеми розташування ножів котка-подрібнювача на показники якості виконання операцій подрібнення і зароблення рослинних часток.

Відповідно за лівого розташування ножів було проведено аналогічну з правим однаковою кількістю дослідів.

За умов довантаження 800 кг, опрацювання 26 даних за швидкості 10,08 км/год, 67 за швидкості 13,6, 78 швидкості 18,6 км/год, 66 за швидкості 22 км/год., встановлено, що для перших двох значень швидкості (10,08 та 13,6 км/год) розподіл часток подрібнених стебел описувався нормальним законом. За таких умов, оцінка математичного сподівання ($\bar{M}[X_2^a] = 150,929$, $\bar{M}[X_3^a] = 101,841$), середнього квадратичного відхилення ($\sigma_{X_2^a} = 62,897$, $\sigma_{X_3^a} = 52,757$), коефіцієнта варіації ($n_{X_2^a} = 0,557$, $n_{X_3^a} = 0,594$,) характеризується, відповідно, такими значеннями. Функції густини цих розподілів описуються рівняннями (6), (7):

$$f(X_2^a) = \frac{1}{62,897 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp \cdot \left[- \frac{(X_2^a - 150,929)^2}{2 \cdot (62,897)^2} \right]; \quad (6)$$

$$f(X_3^a) = \frac{1}{52,757 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp \cdot \left[- \frac{(X_3^a - 101,841)^2}{2 \cdot (52,757)^2} \right]. \quad (7)$$

За інших значень швидкостей (7,45, 18,6 та 22 км/год) розподіл часток подрібнених стебел описується законом Вейбулла. Їх оцінка математичного сподівання складала $\bar{M}[X_1^{\pi}] = 109,224$, $\bar{M}[X_4^{\pi}] = 121,159$, $\bar{M}[X_5^{\pi}] = 107,146$, середнього квадратичного відхилення $\sigma_{X_1^{\pi}} = 75,056$, $\sigma_{X_4^{\pi}} = 63,792$, $\sigma_{X_5^{\pi}} = 55,153$, та коефіцієнта варіації $n_{X_1^{\pi}} = 0,78$, $n_{X_4^{\pi}} = 0,607$, $n_{X_5^{\pi}} = 0,633$, відповідно.

Функції густини розподілів за швидкостей 7,45 км/год, 18,6 та 22 км/год описуються залежностями (8), (9) та (10).

Аналізуючи результати досліджень відмітимо, що за лівої схеми розташування ножів котка-подрібнювача, довантаження 800 кг, найменше значення $\bar{M}[X_3^{\pi}] = 101,841$ оцінки математичного сподівання встановлено за швидкості 13,6 км/год.

У таблиці 4 наведено зведені дані значень математичного сподівання, середньо квадратичного відхилення, коефіцієнта варіації, функції розподілу в залежності від схеми розташування ножів та швидкості переміщення

$$f(X_1^{\pi}) = 0,012 \cdot \left(\frac{X_1^{\pi} - 13}{104,076} \right)^{0,299} \exp \cdot \left[- \left(\frac{X_1^{\pi} - 13}{104,076} \right)^{0,299} \right]; \quad (8)$$

$$f(X_4^{\pi}) = \frac{1,682}{177,799} \cdot \left(\frac{X_4^{\pi} - 16}{177,799} \right)^{(1,682-1)} \exp \cdot \left[- \left(\frac{X_4^{\pi} - 16}{177,799} \right)^{1,682} \right]; \quad (9)$$

$$f(X_5^{\pi}) = \frac{1,606}{97,271} \cdot \left(\frac{X_5^{\pi} - 20}{97,271} \right)^{(1,606-1)} \exp \cdot \left[- \left(\frac{X_5^{\pi} - 20}{97,271} \right)^{1,606} \right]. \quad (10)$$

Таблиця 7 – Зведені дані значень математичного сподівання, середньо квадратичного відхилення, коефіцієнта варіації, функції розподілу в залежності від схеми розташування ножів та швидкості переміщення котка-подрібнювача

Довантаження 800 кг					
Швидкість, км/год	Схема розташування ножів	Математичне сподівання, $\bar{M}[X_i]$	Середньо квадратичне відхилення, σ_{X_i}	Коефіцієнт варіації, n_{X_i}	Функція розподілу
7,45	правого	96,779	58,009	0,684	$f(X_1^{np})$
	лівого	109,224	75,056	0,780	$f(X_1^{\pi})$
10,08	правого	109,141	64,157	0,667	$f(X_2^{np})$
	лівого	150,929	62,897	0,557	$f(X_2^{\pi})$
13,6	правого	118,916	57,217	0,674	$f(X_3^{np})$
	лівого	101,841	52,757	0,594	$f(X_3^{\pi})$
18,6	правого	84,583	58,026	0,822	$f(X_4^{np})$
	лівого	121,159	63,792	0,607	$f(X_4^{\pi})$
22	правого	101,427	61,723	0,723	$f(X_5^{np})$
	лівого	107,146	55,153	0,633	$f(X_5^{\pi})$

Джерело: розроблено авторами

Порівнюючи результати досліджень за правої та лівої схем розташування ножів, за довантаження 800кг, відмічено перевищення значень математичних сподівань розподілів часток стебел у котка-подрібнювача з лівою схемою розташування ножів над правою на усіх швидкостях, що досліджувалися. Найменше значення $\overline{M}[X_4^{np}] = 84,583$ математичного сподівання за правої схеми розташування ножів встановлено за швидкості руху 18,6км/год, а за лівої – $\overline{M}[X_3^s] = 101,841$ за швидкості 13,6км/год. Найбільше значення $\overline{M}[X_2^s] = 150,929$ математичного сподівання розподілу часток стебел соняшнику за лівого розташування ножів встановлено за швидкості 10,08км/год, а для правої схеми – $\overline{M}[X_3^{np}] = 118,916$ за швидкості 13,6км/год. Перевищення найменшого значення математичного сподівання над найбільшим в межах однієї схеми розміщення ножів склало – за лівої 48%, за правої 41%.

Висновки. 1. За результатами проведених досліджень розроблено та виготовлено дослідний зразок котка-подрібнювача. У котка-подрібнювача ріжучі ножі розміщено по усій ширині захвату у шаховому порядку з можливістю змінювати кут нахилу до осі обертання барабана у діапазоні 5...20°.

2. Відмічено, що за умов 800кг довантаженням котка з правим розташуванням ножів-подрібнювачів найменше значення математичних сподівань розподілів подрібнених часток стебел $\overline{M}[X_4^{np}] = 84,583$ встановлено за швидкості руху 18,6км/год. Це значення на 14%, 30%, 40% і 20% менше ніж за швидкостей, відповідно, 7,45км/год, 10,08, 13,6, 22км/год.

3. Встановлено перевищення значень математичних сподівань розподілів часток стебел у котка-подрібнювача з лівою схемою розташування ножів над правою, за довантаження 800кг, на усіх швидкостях, що досліджувалися. Найменше значення $\overline{M}[X_4^{np}] = 84,583$ математичного сподівання за правої схеми розташування ножів встановлено за швидкості руху 18,6км/год, а за лівої – $\overline{M}[X_3^s] = 101,841$ за швидкості 13,6км/год. Найбільше значення $\overline{M}[X_2^s] = 150,929$ математичного сподівання розподілу часток стебел соняшнику за лівого розташування ножів встановлено за швидкості 10,08км/год, а для правої схеми – $\overline{M}[X_3^{np}] = 118,916$ за швидкості 13,6 км/год. Перевищення найменшого значення математичного сподівання над найбільшим в межах однієї схеми розміщення ножів склало – за лівої 48%, за правої 41%.

Список літератури

1. Іващенко О.О., Найдьонов В.Г. Природні біологічні системи – ключ до успіху сучасного землеробства. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 6. С.5–11. URL: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk201607-01> (дата зверення: 09.09.2021).
2. Лінник М.К., Вольський В.А., Коцюбанський Р.В. Системний підхід до обґрунтування технологічної схеми та структури комбінованої машини для обробітку кукурудзяної стерні. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. 4(104). С. 99–105. DOI: 10.31521/2313-092X/2019-4(104)-11.
3. Присяжная С.П. Совершенствование процесса измельчения и рассеивания соевой соломы для повышения плодородия почвы. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2009. 10(60) С.95–97.
4. Сало В.М., Богатирьев Д.В., Лещенко С.М., Савицкий М.І. Вітчизняне технічне забезпечення сучасних процесів у рослинництві. *Техніка і технології АПК*. 2014. 10(61). С. 16–19.
5. Ashford, D. L., Reeves, D. W. (2003). Use of a mechanical roller-crimper as an alternative kill method for cover crop. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18 (1). P. 37–45.
6. Bulgakov, V., Aboltins, A., Beloev, H., Nadykto, V., Kyurchev, V., Adamchuk, V., Kaminskiy, V. (2021). Experimental investigation of plow-chopping unit. *Agriculture (Switzerland)*, 11 (1). P. 1–14. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/1/30>. (дата зверення: 16.09.2021).

7. Wang, R., Yang, P., Tahun, R.F., Dou, S. (2017). Design and experiment of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw. *Nongye Gongcheng Xuebao /Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33 (5), 40-47. <https://www.ingentaconnect.com/content/tcsae/tcsae/2017/00000033/00000005/art00006>. (дата звернення: 18.09.2021).
8. Li, Y., Song, J., Kang, X., Dong, X., Jiang, H., Peng, W. (2013). Experiment on twin-roller cultivator for straw returning. *Nongye Jixie Xuebao /Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 44 (6), 45-49.
9. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами, Москва: Мир, 1973. 957 с.

References

1. Ivashchenko, O.O. & Naidenov, V.G. (2016). Natural biological systems are the key to the success of modern agriculture. – *Bulletin of Agrarian Science*, № 6, 5–11 [in Ukrainian].
2. Linnyk, M.K., Volsky, V.A. & Kotsyubansky, R.V. (2019). Systemnyi pidkhid do obgruntuvannia tekhnolohichnoi skhemy ta struktury kombinovanoi mashyny dlia obrobittu kukurudzianoi sterni [System approach to substantiation of the technological scheme and structure of the combined machine for processing corn stubble]. *Visnyk ahraryoi nauky Prychornomoria – Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Region*, 4 (104), 99–105 [in Ukrainian].
3. Prsyazhnaia, S. P. (2009) Sovershenstvovanye protsessa yzmelcheniya y rasseyvaniya soevoi solomy dlia povysheniya plodorodiya pochvy [Improving the process of grinding and scattering of soybean straw to increase soil fertility]. *Vestnyk Altaiskoho gosudarstvennogo ahraryoho unyversyteta – Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 10 (60), 95–97. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-protsesssa-izmelcheniya-irasseivaniya-soevoy-solomy-dlya-povysheniya-plodorodiya-pochvy> [in Russian].
4. Salo, V. M., Bohatyrov, D. V., Leshchenko, S. M., Savytskyi, M. I. (2014). Vitchyzniane tekhnichne zabezpechennia suchasnykh protsesiv u roslynnytstvi [Domestic technical support of modern processes in crop production]. *Tekhnika i tekhnolohii APK – Machinery and technologies of AIC*, 10 (61), 16–19. Retrieved from http://www.irbisnbnv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbnv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03= FILA=&2_S21STR=Titap_k_2014_10_6 [in Ukrainian].
5. Ashford, D. L. & Reeves, D. W. (2003). Use of a mechanical roller-crimper as an alternative kill method for cover crop. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18 (1), 37–45 [in English].
6. Bulgakov, V., Aboltins, A., Beloev, H., Nadykto, V., Kyurchev, V., Adamchuk, V. & Kaminskiy, V. (2021). Experimental investigation of plow-chopping unit. *Agriculture (Switzerland)*, 11 (1), 1–14. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2077-0472/11/1/30> [in English].
7. Wang, R., Yang, P., Tahun, R.F. & Dou, S. (2017). Design and experiment of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33 (5), 40-47. Retrieved from <https://www.ingentaconnect.com/content/tcsae/tcsae/2017/00000033/00000005/art00006> [in English].
8. Li, Y., Song, J., Kang, X., Dong, X., Jiang, H. & Peng, W. (2013). Experiment on twin-roller cultivator for straw returning. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 44 (6), 45-49 [in English].
9. Himmelblau, D. (1973). Analysis of processes by statistical methods, Moscow: Mir, 957 p. [in English].
10. Khymelblau, D. (1973). *Analiz protsessov statystycheskymy metodamy [Analysis of processes by statistical methods]*. Moskva: Myr [in Russian].

Viktor Sheichenko, Prof., DSc.

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Mikhail Chernovol, Prof., Academician of the NAAS of Ukraine, DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Volodymyr Volskyi, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Rostyslav Kotsyubanskyi**, post-graduate

National Scientific Centre "Institute of Agricultural Engineering and Electrification", Glevakha, Ukraine

Research of Influence of the Scheme of an Arrangement of Knives of a Cat-shredder on Indicators of Quality of Crushing of Stalks of Sunflower

The study of the arrangement of the blades of the roller-grinder on the quality of grinding.

It is The work is devoted to the improvement of the technological process of grinding sunflower stalks due to the study of the influence of the arrangement of the blades of the roller-grinder on the quality of grinding. in the range of 5... 20 °.

It is noted that under 800 kg by loading the roller with the right location of the chopping knives, the lowest value of mathematical expectations of the distribution of crushed stem $\overline{M}[X_4^{np}] = 84,583$ particles is set at 18.6 km / h. This value is 14%, 30%, 40% and 20% less than the speed, respectively, 7.45 km/h, 10.08, 13.6, 22 km/h.

Exceedance of values of mathematical expectations of distributions of particles of stalks at a roller-shredder with the left scheme of an arrangement of knives over the right, for loading of 800 kg, at all speeds investigated is established. The lowest $\overline{M}[X_4^{np}] = 84,583$ value of mathematical expectation for the right layout of the knives was set at a speed of 18.6 km / h, and for the left - $\overline{M}[X_3^a] = 101,841$ at a speed of 13.6 km / h. The highest value $\overline{M}[X_2^a] = 150,929$ of the mathematical expectation of the distribution of parts of sunflower stalks at the left location of the knives is set at a speed of 10.08 km/h, and for the right scheme $\overline{M}[X_3^{np}] = 118,916$ - at a speed of 13.6 km/h. Exceeding the lowest value of mathematical expectation over the highest within one scheme of placement of knives was - on the left 48%, on the right 41%.

In the roller with the left location of the cutting edge of the knives, with a load of 600 kg in the range of 51–100 mm, the percentage of crushed particles of sunflower stalks exceeded the corresponding values with a load of 800 kg. At speeds of 10.08 km/h, 13.6, 18.6 and 22 km/h, this excess was 1.9 times, 1.44, 1.96 and 1.99 times, respectively.

shredding of sunflower stalks, plant remains, roller-shredder, indicators of grinding quality

Одержано (Received) 24.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 09.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 621.311.01.064.03

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.88-94>

Ф.М. Ерхан, проф., д-р хаб.т.н., Д.А. Войнеско, препод.

Государственный аграрный университет Молдовы, г. Кишинев, Молдова

e-mail: terhan@mail.ru

Оценка влияния несимметричных режимов на показатели надежности распределительных систем

Распределительные системы электрической энергии обладают большой динамикой развития. Благодаря этому явлению в системах распределения электроэнергии вероятность установки асимметричных режимов монотонно возрастает. В результате этого меняется надежность работы силового электрооборудования, установленного в электрических узлах.

Асимметричные режимы в распределительных системах электрической энергии, сопровождаются очень часто с токами короткого замыкания, которые являются функцией ряда, как определенных, так и неопределенных факторов, которые носят вероятностный характер.

Из этого следует, что исследование влияния асимметричных режимов, сопровождаемых токами короткого замыкания, на надежность распределительных системах электрической энергии, является одной из важнейших задач их развития

Токи короткого замыкания влияют на структурную и функциональную надежность установленного электрооборудования распределительных систем.

несимметричные режимы, переходные процессы, электроэнергетические системы, функциональная надежность электрооборудования и выключателей, уравнение непрерывности электрической дуги, уравнение сохранения аксиальной проекции импульса, уравнение сохранения энергии импульса

© Ф.М. Ерхан, Д.А. Войнеско, 2021

Постановка проблемы. Несимметричные режимы возникающие в распределительных системах сопровождаются переходными процессами, возникающие в электроэнергетических системах, имеют существенное влияние на функциональную надежность большинства элементов системы и особенно на распределительные устройства и выключателей.

Анализ последних исследований и публикаций. Для анализа несимметричных режимов и переходных процессов в распределительных сетях исследования проводились на сборных шинах напряжением

$U_H = 10\text{кВ}$ трансформаторной подстанции напряжением $U_H - 110/35/10\text{кВ}$. (Новые Анены) принципиальная однолинейная электрическая схема, которой приведена на рис.1.

Возникающие несимметричные режимы и переходные процессы в узлах ЭЭС являются функцией нескольких составляющих, таких как отключаемые токи, переходное останавливающееся напряжение, параметры возникающей электрической дуги и скорости их изменения во времени.

Перечисленные составляющие, переходных процессов согласно [1-3] могут быть описаны следующими дифференциальными уравнениями:

а) скорость изменения тока в электрической дуге во времени согласно [1] может быть представлено согласно уравнению (1).

$$\frac{di_D}{d\tau} = d(I_m e^{-j\omega\tau}) / d\tau, \quad (1)$$

где $di_D/d\tau$ – скорость изменения тока электрической дуги;

I_m – амплитудное значение отключаемого тока .

б) скорость изменения напряжения электрической дуге во времени согласно [3] может быть представлено согласно уравнению (2).

$$\frac{du_D}{d\tau} = Z_V \frac{n}{n-1} \frac{di_D}{d\tau}, \quad (2)$$

где $du_D/d\tau$ – скорость изменения напряжения электрической дуги.

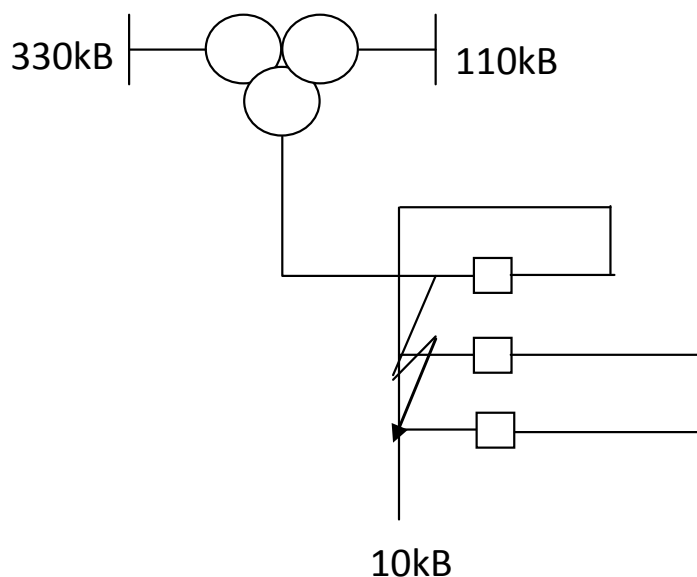


Рисунок 1 – Принципиальная схема исследуемой ТП-110/35/10 кВ

Источник: разработано автором

Электрическая дуга сопровождается выделением определенного количества тепла, значение которого аналитически может быть определена согласно уравнению (3).

$$\frac{dQ}{d\tau} = -Q_0 \left(\frac{1}{i_d^{-1}} \frac{di_d^{-1}}{d\tau} \cdot \frac{1}{U_d} \frac{dU_d}{d\tau} \right) = -Q \left[\frac{dU_d}{U_d} \cdot \left(\frac{dU_d}{i_d} \right)^{-1} \right] \frac{1}{d\tau}, \quad (3)$$

где $dQ/d\tau$ – скорость изменения выделяемого тепла в электрической дуге.

Приведенные дифференциальные уравнения описывающие соответствующие физические процессы являются нелинейными, аналитические решения, которых весьма затруднительны. Для решения уравнений типа (1-3) может быть использован метод Годунова, который согласно [4] позволяет переходить от нелинейных функций и соответствующих дифференциальных уравнениях, которые описывают переходные процессы, к эквивалентным линейным функциям и получить конкретные значения параметров, характеризующих переходные процессы и электрические дуги в распределительных устройствах и выключателях.

Переход такого типа облегчает проведения расчетов переходных процессов, возникающих в распределительных сетях.

Полученные результаты расчетов таким образом переходных процессов и описание электрической дуги в высоковольтных выключателях различного типа, при использовании метода Годунова, показывает их высокую степень точности и соответствие опыту эксплуатации. Это способствует упрощению математической модели и соответствующего описания электрической дуги по сравнению с [1-3]. Все это дает основание считать, что использование метода Годунова [5-8], облегчает проведения соответствующих расчетов и способствует повышению точности расчета параметров переходных процессов в электроэнергетических системах и более детальное и точное определение функциональной надежности установленного электрооборудования (в частности высоковольтных выключателей разного типа) при расчете переходных процессов в электроэнергетических системах. Процесс изменения составных частей эквивалентного значения восстанавливающегося переходного напряжения в точке возникновения переходного процесса приведена на рис.2.

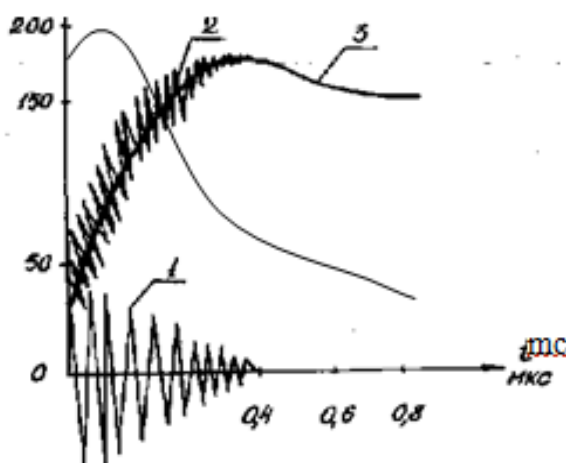


Рисунок 2 – Составные части восстанавливающегося переходного напряжения в точке возникновения переходного процесса и их изменение во времени

Источник: [3]

1. Восстанавливающийся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса со стороны электрической сети;
2. Восстанавливающийся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса со стороны источника питания;
3. Суммарное восстанавливающийся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса.

Переходные процессы, которые возникают в результате несимметричных режимов, могут иметь различные формы и продолжительность [9-12]. Они сопровождаются электрическими дугами, которые возникают при различных видов коротких замыканиях. Задачей настоящих исследований является создание математических моделей для мгновенных значений параметров электрической дуги.

Изложение основного материала. Основой для разработки математической модели для мгновенных значений параметров электрической дуги в данном случае являются уравнения непрерывности, сохранения импульса и энергии и закон Ома.

Выше перечисленные уравнения могут быть представлены следующим аналитическими выражениями:

а) уравнение непрерывности электрической дуги имеет форму(4):

$$\partial \rho / \partial t + (\rho v_z) \partial v_z / \partial z + (r \rho v_r) \partial v_z / r \partial r = 0; \quad (4)$$

б) уравнение сохранения аксиальной проекции импульса имеет форму (5):

$$\rho \partial v_z / \partial t + \rho v_z \partial v_z / \partial z + \rho v_r \partial v_z / \partial r = - \partial \rho / \partial z + \partial [(\eta + \eta_T) r \partial v_z / \partial r] / r \partial r. \quad (5)$$

С учетом вышеприведенных условий, уравнение сохранения энергии импульса имеет форму (6):

$$\rho \partial h_0 / \partial t + \rho v_z \partial h_0 / \partial z + \rho v_r \partial h_0 / \partial r = \sigma E^2 - U + \partial [(k + k_T) r \partial T / \partial r] / r \partial r. \quad (6)$$

Если соблюдаются условия, описываемые уравнениями (4-6), то закон Ома может быть представлен в виде (7):

$$I = E \int_0^{r1} 2\pi \sigma r dr = 2 \pi E \int_0^{r1} \sigma r dr, \quad (7)$$

где ρ – плотность среды;

V_z – осевая;

V_r – радиальная компоненты скорости среды;

η – вязкость среды;

η_T – турбулентная вязкость;

E – напряженность;

σ – электропроводность;

U – эффективный коэффициент излучения;

h_0 – полная энтальпия;

k – молекулярная теплопроводность;

k_T – турбулентная теплопроводность;

r – радиус дуги.

Если уравнения (4-6) интегрировать по радиусу r с учетом соблюдения соответствующих пределов $a \leq r \leq b$ то они получают форму уравнения (8).

а) уравнение непрерывности состояния

$$\partial \int_a^b 2\pi \rho v_z r dr / \partial t + \partial \int_a^b 2\pi \rho v_r r dr / \partial z + q(b) - q(a) - \lambda(b) + \lambda(a) = 0; \quad (8)$$

б) уравнение сохранения аксиальной проекции импульса примет форму (9)

$$\begin{aligned} \partial \int_a^b 2\pi\rho h_0 r dr / \partial t + \partial \int_a^b 2\pi\rho v_r^2 r dr / \partial z - \Phi(b) + \Phi(a) + q(b)v_z(b) - q(a)v_z(a) = \\ = \partial \rho \pi^2 (b^2 - a^2) / \partial z - 2\pi[bS(b) - aS(a)]. \end{aligned} \quad (9)$$

При этих условиях уравнение сохранения энергии импульса будет иметь форму уравнения (10).

$$\begin{aligned} \partial \int_a^b 2\pi\rho v_z r dr / \partial t + \partial \int_a^b 2\pi\rho v_r h_0 r dr / \partial z - \Psi(b) + \Psi(a) + q(b)h_0(b) - q(a)h_0(a) = \\ = \int_a^b 2\pi r [\sigma E^2 - U] dr - 2\pi[W(a) - W(b)]. \end{aligned} \quad (10)$$

В приведенных уравнениях используются следующие обозначения:

$q(a)$, $q(b)$ – потоки массы в радиальном направлении через границу раздела среды a и b ;

λ , Φ , Ψ – функции перемен времени, d , ρ , v_z , h_0 на этих же границах;

$S(a)$, $S(b)$ – функции характеризующие радиальный поток импульса и энергии через границу раздела среды $r = b$, которое определяется аналитическими соотношениями (11-14):

$$S(a) = [(\eta + \eta_r) \partial v_z / \partial r]_{r=a}; \quad (11)$$

$$S(b) = [(\eta + \eta_r) \partial v_z / \partial r]_{r=b}; \quad (12)$$

$$W(a) = [(k + k_r) \partial T / \partial r]_{r=a}; \quad (13)$$

$$W(b) = [(k + k_r) \partial T / \partial r]_{r=b}. \quad (14)$$

Приведенные интегральные уравнения (8-10) могут характеризовать переходной процесс, сопровождаемый электрической дугой, возникающей на контактах электрооборудования в зависимости от скорости протекания переходного процесса и месте его нахождения относительно рассматриваемого электрооборудования.

Приведенные нелинейные уравнения, используя метод Годунова, можно линеаризовать и в таком случае переходной процесс и процесс гашения электрической дуги на контактах электрооборудования можно рассматривать при помощи линейных эквивалентных уравнений, в результате чего полученные решения достаточно обоснованно описывают соответствующие явления.

Выводы. Использование метод Годунова для анализа несимметричных режимов и переходных процессов, сопровождаемых возникновением электрической дуги на контактах электрооборудования позволяет нелинейные кривые и соответствующие дифференциальные уравнения, которые могут изображать данные процессы линеаризовать по определенным участкам и переходить от дифференциально-интегральных уравнений, которые описывают данный процесс к эквивалентным линейным алгебраическим уравнениям.

Из анализа динамики возникновения несимметричных режимов следует, что наибольшее влияния на функциональную надежность электрооборудования имеет динамика изменения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях.

Динамика изменения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях зависит отряда факторов:

- скорости изменения повторно восстанавливающегося напряжения в точке короткого замыкания со стороны источника питания;
- скорости изменения повторно восстанавливающегося напряжения в точке короткого замыкания со стороны нагрузки;
- величины и скорости изменения мощности в точке короткого замыкания со стороны источника питания;
- величины и скорости изменения мощности в точке короткого замыкания со стороны нагрузки;
- значение эквивалентного сопротивления в точке короткого замыкания.

Список литературы

1. Ерхан Ф.М. Анализ несимметричных режимов и их влияние на надежность распределительных систем. Вестник ПГУ, 2013 г.
2. Frind G., Rich J. Recovery speed of axial flow gas blast interrupter dependence on pressure and di/dt in SF – *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*, 1974, vol. 93, № 5, p. 1675-1682.
3. Browne T. Practical modelling of the circuit breaker arc as a short line fault interrupter. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*, 1978, vol. 97, №3, p. 838-845.
4. Hermann W., Ragaller K. Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers – *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*, 1977, vol. 96, №5, p. 1546-1552.
5. Годунов С.К. Уравнения математической физики. М.: Наука., 1979. 388 с.
6. Erhan F., Melnic S. Short-circuit current level effect on the electric power systems reliability . *III International Symposium Short Circuit Current in a Power System*. Sulejow, Poland., 1988, т1, стр. 80-89.
7. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1989. 657 с.
8. Ерхан Ф.М. Использование метода Годунова для оценки переходных процессов в электротехнических устройствах. Энергетика. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2005. (5). С. 52-55.
9. M. Seeger, R. Smeets, J. Yan, H. Ito, M. Claessens, E. Dullni, L. Falkingham, C. Franck, F. Gentils, W. Hartmann, Y. Kieffel, S. Jia, G. Jones, J. Mantilla, S. Pawar, M. Rabie, P. Robin-Jouan, H. Schellekens, J. Spencer, T. Uchii, X. Li, and S. Yanabu. Recent trends in development of high voltage circuit breakers with SF6 alternative gas. *Plasma Physics and Technology*, 4(1):8–12, 2017. doi:10.14311/ppt.2017.1.8.
10. R. Thomas. Controlled switching of high voltage SF6 circuit breakers for fault interruption, 2004. Thesis for the degree of licentiate of engineering. URL: <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/Lic/ThomasRichardLic.pdf>. [4] International standard IEC 62271-100. High-voltage switchgear and controlgear. Part 100. Alternating current circuit-breakers, 2012.
11. T. Morita, M. Iwashita, and Y. Nitta. A theoretical analysis of dynamic arcs and test results of model synchronous air blast circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97(3):940–949, May 1978. doi:10.1109/TPAS.1978.354567.
12. A. Budin, M. Pinchuk, V. Kuznetsov, V. Leontev, and N. Kurakina. An experimental setup for investigation of arc and erosion processes in high-voltage high-current breakers. *Instruments and Experimental Techniques*, 60(6):837–842, Nov 2017. doi:10.1134/S0020441217060033.

References

1. Erhan, F.M. (2013). *Analiz nesimmetrichnyih rezhimov i ih vliyanie na nadezhnost raspredelitelnyih sistem* [Analysis of asymmetric modes and their impact on the reliability of distribution systems]. Vestnik PGU [in Russian].
2. Frind, G. & Rich, J. (1974). *Recovery speed of axial flow gas blast interrupter dependence on pressure and di/dt in SF*. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*
3. Browne, T. (1978). *Practical modelling of the circuit breaker arc as a short line fault interrupter*. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*
4. Hermann, W. & Ragaller, K. (1977). *Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers*. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*
5. Godunov, S.K. (1979). *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka [in Russian].

6. Erhan, F. & Melnic, S. (1988). *Short-circuit current level effect on the electric power systems reliability*. International Symposium Short- Circuit Current in a Power System. Sulejow, Poland.
7. Neklepaev, B.N. (1989). *Elektricheskaya chast elektrostansiy i podstantsiy [Electrical part of power plants and substations]*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian].
8. Erhan, F.M. (2005). *Ispolzovanie metoda Godunova dlya otsenki perehodnykh protsessov v elektrotehnicheskikh ustroystvakh [Using the Godunov method to assess transient processes in electrical devices]*. Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG. [in Russian].
9. Seeger, M., Smeets, R. & Yan J. et al. (2017). *Recent trends in development of high voltage circuit breakers with SF6 alternative gas*. Plasma Physics and Technology. doi:10.14311/ppt.2017.1.8.
10. Thomas, R. (2012). *Controlled switching of high voltage SF6 circuit breakers for fault interruption, 2004. Thesis for the degree of licentiate of engineering*. <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/Lic/ThomasRichardLic.pdf>. International standard IEC 62271-100. High-voltage switchgear and controlgear.
11. Morita, T., Iwashita, M. & Nitta Y. (1978). *A theoretical analysis of dynamic arcs and test results of model synchronous air blast circuit breakers*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.
12. Budin, A., Pinchuk, M. & Kuznetsov, V. et al. (2017). *An experimental setup for investigation of arc and erosion processes in high-voltage high-current breakers*. Instruments and Experimental Techniques.

Fiodor Erhan, Prof., Dr. habil. tech., **Dinu Voinesco**, Lecturer

State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Moldova

Assessing the Influence of Asymmetric Modes on the Reliability Indicators of Distribution Systems

The power electric distribution systems (PEDS) possess a great dynamics of development. Thanks to this phenomenon in the power electric distribution systems (PEDS) the probability of apparatus of asymmetrical regimes increase monotonously. As a result of this reliability of the functioning of the power electric equipment installed in the electric knots changes. The asymmetrical regimes in the power electric distribution systems (PEDS) accompanied by the short circuit current are a function of a row determinate is a vague factor of probabilistic nature.

Coming from it follows that the investigation of the influence of the asymmetrical regimes accompanied by the current of the short circuit on the reliability of the Power Electric Distribution Systems (PEDS) is one of the most important problems of the development the Power Electric Distribution Systems.

The short circuit currents influence the structural and functional reliability of distribution networks and at the reliability of electrical equipment installation. The dynamics of changes in the levels of short circuit currents in electrical networks depends on the rate of change of the re-recovering voltage at the short circuit point on the power supply side and on the load side, as well as on the magnitude and rate of power change at the short circuit point on the power source side and on the load side.

current of the short circuit, Asymmetrical regimen, Power electric distribution systems, Reliability of electrotechnical equipment

Одержано (Received) 30.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 12.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 361.363.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.95-103>

П.Г. Лузан, доц. канд. техн. наук, **Р.В. Кісільов**, доц. канд. техн. наук, **О.Р. Лузан**, канд. техн. наук, **О.А. Кислун**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: luzanpg@gmail.com*

Теоретичні аспекти розділення зерна на решеті інерційно-гравітаційного сепаратора

Виконано обґрунтування технологічної схеми решета інерційно-гравітаційного сепаратора з щілинами, що розширюються в напрямку руху оброблюваного матеріалу та встановлено вплив його основних параметрів на ефективність сепарації зернових сумішей. Встановлено закономірності руху зернової суміші по поверхні решета, коли створюються сприятливі умови для проходження крізь щілини часток, які можуть пройти крізь нього. Запропоновано методику розрахунку основних геометричних та кінематичних параметрів решета.

сепарація, решето, енергоємність сепарації, зернова суміш, інерційно-гравітаційний сепаратор

Постановка проблеми. Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва обумовлює необхідність створення і широкого використання принципово нової високопродуктивної техніки, яка б забезпечувала не тільки ріст продуктивності праці, але й суттєву економію матеріальних і енергетичних ресурсів, що в повній мірі відноситься і до техніки для сепарації різних зернових матеріалів [1, 2].

Україна у 2021 році отримала надзвичайно високий урожай зернових культур більше 70 млн. тонн, що найбільше за всі роки незалежності, а також є надія на зерновий рекорд в наступних роках – 100 млн. тонн і більше [3]. За такого великого врожаю перед агровиробниками гостро постає питання його зберігання та переробки, що передбачає очищення від домішок, які негативно впливають на ефективність зберігання.

Враховуючи різноманітні властивості насіння сільськогосподарських культур, технічне забезпечення процесів сепарації налічує десятки різновидів зерноочисних машин, які в повній мірі вирішують питання зберігання врожаю, однак зростання вартості енергетичних ресурсів, що використовуються при очищенні, суттєво підвищують собівартість виробництва зерна, і їх зниження можливе тільки при використанні зерноочисних машин з низькими показниками енергоспоживання.

В сільському господарстві та в системі переробки хлібопродуктів для сепарації зернових матеріалів найбільш широко використовуються повітряно-решітні сепаратори, в яких як правило, встановлюються плоскі решета.

Зерноочисні машини, які працюють в даний час на сільськогосподарських та переробних підприємствах з плоскими решетами, використовуються протягом багатьох років, добре вивчені і удосконалені, їх техніко-економічні показники досягли максимальних значень.

Проблема полягає в тому, що для забезпечення нормальної роботи існуючих зерноочисних машин з традиційними плоскими решетами велика кількість енергетичних витрат припадає на додаткові операції, які безпосередньо не пов'язані з проходження процесу сепарації, але без їх неможлива нормальна робота самої машини. Безпосередньо це транспортування зерна та очищення решіт від зерен, які застрягли в щілинах і погіршують якість їх роботи.

Тема роботи пов'язана з тематичним планом НДДКР Центральноукраїнського національного технічного університету та «Національною програмою виробництва технологічних комплексів машин і устаткування для сільського господарства, харчової та переробної промисловості».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження витрат енергії в технологіях очищення та зберігання зернових культур та факторів, які їх визначають дозволили авторам отримати рівняння енергетичної характеристики зерноочисних машин з урахуванням їх конструктивних особливостей, культури зерна, вологості і засміченості. Цей показник автори вважають найбільш об'єктивним критерієм економічної роботи потокової лінії очищення та зберігання зерна [4].

На основі комп'ютерного моделювання процесу сепарації виконаний аналіз роботи зерноочисних машин та виявлені недоліки, що дало можливість підвищити ефективність їх роботи [5].

Проведені дослідження хоч і дозволили підвищити ефективність роботи зерноочисних машин та застосування таких машин в поточкових лініях, але вони не торкаються принципової зміни їх роботи, а направлені тільки на удосконалення окремих вузлів та механізмів.

Запропоновано нові решета з **отворами п'ятипелюсткової епіциклоїдної форми, в яких як відмічають автори**, завдяки зменшенню площі контакту «зерно-кромка отвору» зерно швидше проходить крізь них. Такі решета не забиваються зернами, що підвищує їх активну площу «живого перетину» і збільшується просіюваність, однак їх можна використовувати тільки для зерен, що мають округлу чи близьку до неї форму [6].

Заслуговує на увагу створене сімейство вібраційних решіт, що дають можливість обчислювати кінематичні характеристики зернопотоку по плоских віброрешетах з урахуванням залежності пористості суміші та швидкості її руху [7]. В роботі [8] отримано диференціальні рівняння руху часток у віброзрідженому шарі при дії відцентрової сили і аеродинамічного тиску.

Запропоновані математичні моделі технологічного процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за його аеродинамічними властивостями, геометричними розмірами, об'ємною масою та забарвленням поверхні сім'янок [9] можуть бути використані і для інших зернових матеріалів.

В технології підготовки корисних копалин замість традиційного розділення на ситових поверхнях розроблена і запропонована теорія вібраційного переміщення і транспортування сипких матеріалів в процесі чого проходить розділення вихідних продуктів на фракції за комплексними показниками, що характеризують різні фізико-механічні властивості компонентів [10].

Проведені дослідження показують ефективність процесу вібровідцентрового сепарування сипких матеріалів, але енергетичні витрати на роботу таких машин не тільки не знижуються, а дещо і підвищуються.

Як вважають автори [11] перспективними є гравітаційні сепаратори, оскільки в них додаткова енергія не витрачається на процес сепарування, а використовується енергія піднятого на деяку висоту зернового матеріалу, на основі чого запропонований сепаратор гравітаційно-каскадного типу. Не вирішеною в таких сепараторах залишається проблема очищення щілин від зерен, які застрягають в них.

Використовуючи ідеї побудови конструкції «ідеального сепаратора» [12] створено і запропоновано методику розрахунку інерційно гравітаційного сепаратора [13]. Встановлено, що застосуванням в зерноочисних машинах решіт з щілинами, що

розширюються в напрямку руху оброблюваного матеріалу, можна досягти значного зниження енергетичних витрат на їх роботу.

Постановка завдання. Таким чином метою даної статті є обґрунтування конструкції, виведення та апробація розрахунками формул для визначення параметрів решета з щілинами, що розширюються в напрямку руху оброблюваного матеріалу.

Виклад основного матеріалу. В якості основної конструктивної схеми вибрано решето з щілинами, що розширюються в напрямку руху оброблюваного матеріалу запропоноване на кафедрі сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ [14, 15]. Решето (рис. 1) складається з поздовжніх прутків 1 і 2, які в передній частині розміщені на вісі 3 і роз'єднані між собою шайбами 4 визначеної товщини. Ті ж прутки в задній частині решета по чергово розміщені на нерухомій вісі 5 та рухомій вісі 6. Тут прутки розділені між собою шайбами 7 і 8. Рухоме решето регулюється відносно нерухомого гвинтом 9, закріпленим до корпусу 10. Регулювання відносного положення решіт забезпечується важелем 11. Робота решета відбувається таким чином. Зернова суміш падає на передню частину решета і рухаючись вздовж щілин, що розширюються в напрямку його руху розділяється на дві фракції.

Стосовно до вибраної схеми технологічного процесу теорія руху зерна по решету такої конструкції розроблена недостатньо повно. Використання в даному сепараторі решіт з щілинами, що розширюються в напрямку руху оброблюваного матеріалу ставить на першу чергу задачу встановлення закономірностей цього руху по їх поверхні.

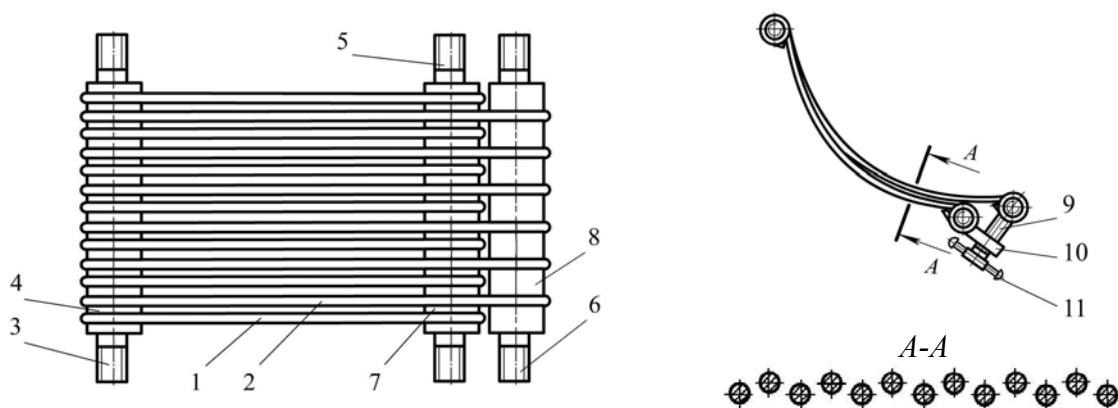


Рисунок 1 – Схема запропонованого решета

Джерело: розроблено автором

Для запропонованої схеми решета розглянемо випадок руху частки зернової суміші по решітковій поверхні, яка являє собою одну четверту дуги круга, створену прутками круглого профілю як показано на рис. 1. Рівняння руху в даному випадку матиме вигляд

$$m\ddot{S} + F_{\tau} = mg\cos(\Theta + \Theta_0), \quad (1)$$

де m – маса частки;

S – шлях пройдений часткою;

F_{τ} – проекція сили тертя на дотичну вісь;

g – прискорення вільного падіння;

Θ – кут, який визначає положення частки в даний проміжок часу;

Θ_0 – кут, що визначає початкове положення решета.

Проекцію сили тертя на вісь $\bar{\tau}$ визначимо за формулою

$$F_{\tau} = (N_1 + N_2)f + fm \frac{\dot{S}^2}{R}, \quad (2)$$

де N_1, N_2 – реакції прутків решітної поверхні;

f – коефіцієнт тертя;

R – радіус кривизни решітної поверхні.

Реакції прутків решітної поверхні

$$N_1 = mg \cos(\alpha + \beta) \sin(\Theta + \Theta_0); \quad (3)$$

$$N_2 = mg \sin(\alpha + \beta) \sin(\Theta + \Theta_0), \quad (4)$$

де α – кут, який визначає положення прутків решітної поверхні;

β – кут, що визначає положення частки зернової суміші на решітній поверхні.

Враховуючи вище приведене, рівняння (1) можна записати у вигляді

$$m\ddot{S} + fmg \sin(\Theta + \Theta_0) (\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)) + mf \frac{\dot{S}^2}{R} = mg \cos(\Theta + \Theta_0). \quad (5)$$

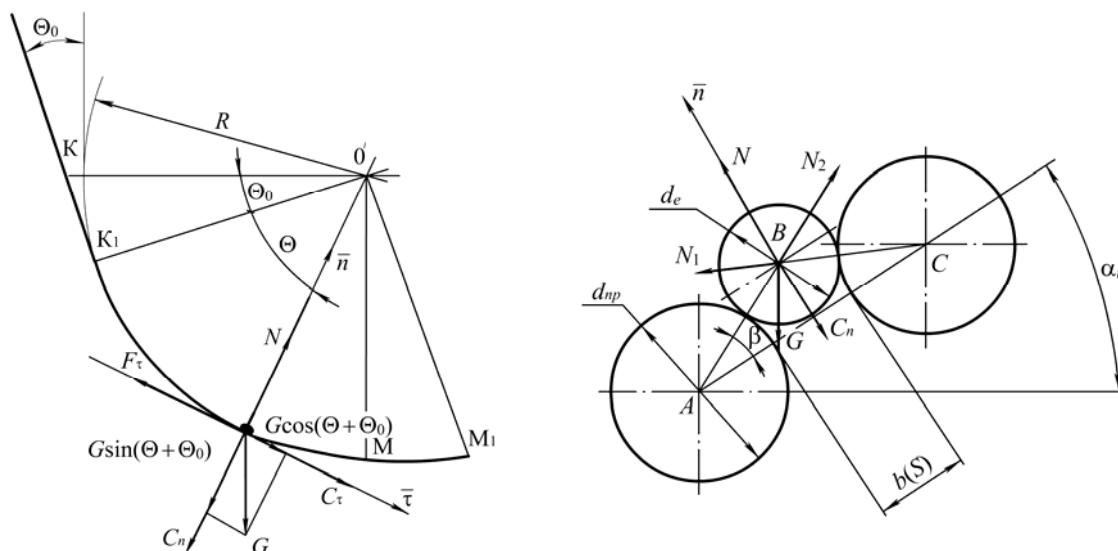


Рисунок 2 – Схема сил, які діють на частку на поверхні решета та у поперечному перерізі
Джерело: розроблено автором

З урахуванням того, що $\omega = \sqrt{\frac{g}{R}}$, а також домноживши праву і ліву частини рівняння (5) на $\frac{1}{mR}$ отримаємо

$$\frac{\ddot{S}}{R} + f\omega^2 \sin(\Theta + \Theta_0) (\cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta)) + f \frac{\dot{S}^2}{R} = \omega^2 \cos(\Theta + \Theta_0). \quad (6)$$

Введемо безрозмірний коефіцієнт ψ і покладемо $\psi = \frac{S}{R} = \Theta$. Тоді рівняння руху частки зернової суміші буде мати вигляд

$$\ddot{\psi} = \omega^2 \cos(\Theta + \Theta_0) - f\omega^2 \sin(\Theta + \Theta_0) (\cos(\alpha + \beta_0) + \sin(\alpha + \beta_0)) - f\dot{\psi}^2. \quad (7)$$

Розглянемо щілину створену двома прутками (рис. 3). Ширина щілини в будь-якому перерізі

$$l(s) = l_1 + \frac{2(l_k - l_1)}{\pi} \psi, \quad (8)$$

де l_1 – початкова ширина щілини;

l_k – кінцева ширина щілини.

Для визначення кута α розглянемо рис. 3. Звідки

$$\alpha = \frac{2\alpha_k}{\pi} \psi. \quad (9)$$

Нехай $\frac{2\alpha_k}{\pi} = \mu$, тоді

$$\alpha = \mu \psi. \quad (10)$$

Розглянемо $\triangle ABC$ (рис. 2.). Кут β створений прямими $|AB|$ і $|AC|$, які з'єднують центри прутків і частки зернової суміші. Тоді

$$\cos \beta = \frac{r + \frac{l(s)}{2}}{r_0 + r}, \quad (11)$$

де r – радіус прутка решітної поверхні;

r_0 – еквівалентний діаметр частки зернової суміші.

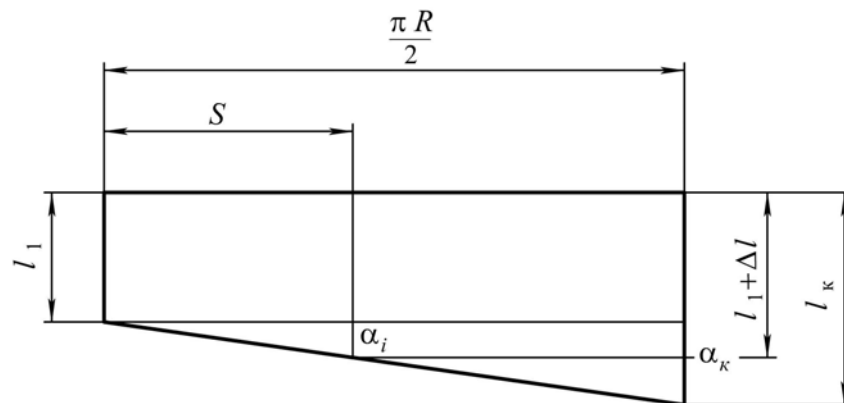


Рисунок 3 – Схема до визначення кута, який визначає положення прутків решітної поверхні
Джерело: розроблено автором

Прийmemo $\frac{r + \frac{l_1}{2}}{r_0 + r} = a$; $\frac{l_k - l_1}{\pi(r_0 - r)} = b$, тоді формулу (11) запишемо у вигляді

$$\cos \beta = a + b\psi, \text{ очевидно що } \sin \beta = \sqrt{1 - (a + b\psi)^2}.$$

Виконаємо перетворення

$$\varphi(\alpha, \beta) = \cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta) = \cos \alpha (\cos \beta + \sin \beta) + \sin \alpha (\cos \beta + \sin \alpha).$$

Враховуючи попередні зауваження

$$\varphi(\alpha, \beta) = \cos \mu \psi (a + b\psi) + \sqrt{1 - (a + b\psi)^2} + \sin \mu \psi (a + b\psi - \sqrt{1 - (a + b\psi)^2}).$$

Остаточню рівняння (7) можна записати у вигляді

$$\ddot{\psi} = \omega^2 \cos(\psi + \Theta_0) - f \omega^2 \sin(\psi + \Theta_0) [\cos \mu \psi (a + b\mu + \sqrt{1 - (a + b\psi)^2} + \sin \mu \psi (a + b\psi - \sqrt{1 - (a + b\psi)^2} - f\psi^2]. \quad (12)$$

В рівнянні (12) до коефіцієнтів μ, a, b входять всі змінні, необхідні для визначення основних параметрів решета інерційно-гравітаційного сепаратора.

Для реалізації запропонованої методики розрахунку розроблено програмне забезпечення, що вміщує дві основні частини. Перше з них дозволяє здійснювати перетворення блоків розробленої в аналітичному вигляді методики розрахунку у вигляд, що відповідає вимогам архітектури математичних моделей. Друга частина реалізує чисельні методи Рунге-Кутта та Нелдера-Міди і служить для оптимізації математичної моделі розрахунку параметрів решета інерційно-гравітаційного сепаратора у відповідності з конкретними вихідними даними.

Для виявлення впливу факторів на процес руху частки по поверхні решета був виконаний аналіз детермінованої математичної моделі (12) в пакеті Mathcad за методом Рунге Кута (рис.4-5). На початку руху частки по поверхні решета її швидкість зростає, потім при переході визначеної точки починає зменшуватися і при досягненні критичної – зупиняється та починає ковзати вниз, про що свідчать від'ємні значення швидкості (рис. 4). Найбільший практичний інтерес має відрізок шляху руху частки на відстані $0 \leq S \leq \pi R/2$, тому в подальшому аналізі необхідно розглядати тільки цю ділянку.

Виходячи із того, що проходження процесу сепарації в запропонованій конструкції можливе тільки на $1/4$ довжини кола, то значення кута Θ може змінюватися в межах $0 < \Theta \leq \pi/2$. При значеннях $\Theta > \pi/2$ проходження процесу неможливо внаслідок зменшення щілини між прутками, що приведе до заклинення зерен між ними.

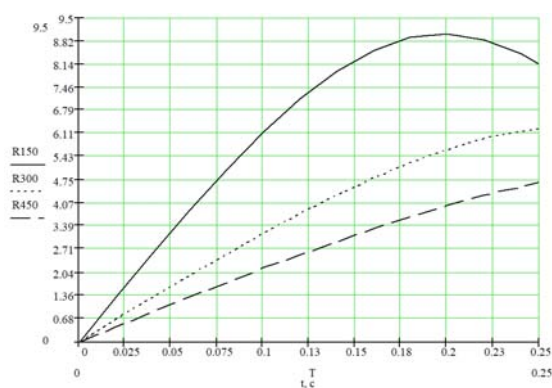


Рисунок 4 – Зміна кутової швидкості руху частки ω протягом часу при значеннях радіусу $R = 150, 300, 450$ мм: $\Theta_0 = 0$ град, $d_{np} = 1,5$ мм, $\omega_0 = 0$ с-, $f = 0,35$

Джерело: розроблено автором

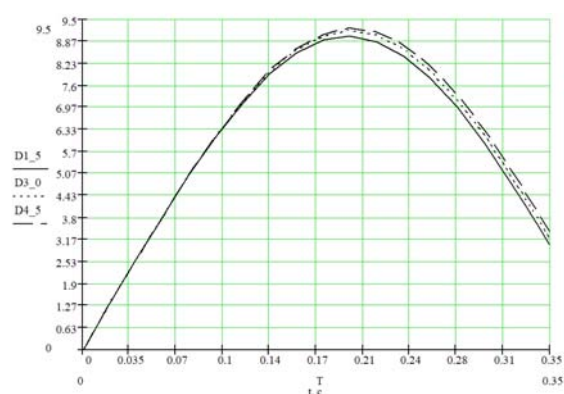


Рисунок 5 – Зміна кутової швидкості руху частки зернової суміші ω протягом часу t при різних значеннях діаметру прутків: $\Theta_0 = 0$ град., $R = 150$ мм, $\omega_0 = 0$ с-, $f = 0,35$

Джерело: розроблено автором

Значення кута Θ_0 впливає на характер проходження процесу як перед решетом, так і на ньому, та може змінюватися в межах $90^\circ - \varphi \geq \Theta_0 \geq 0$, де φ – кут тертя. Зміна кута Θ_0 в той чи інший бік впливає на початкову швидкість подачі зернової суміші на решето, а як наслідок і на його габаритні розміри. З іншого боку, зміна кута Θ_0 впливає

на нормальний тиск частки зернової суміші на розподільну поверхню. При граничних значеннях кута Θ_0 , $\Theta_0 = \varphi$, і $\Theta_0 = 0$ в першому випадку рух зерна відсутній, у другому – внаслідок того, що зернова суміш практично не торкається направляючого лотка, в результаті чого тиск на решітку на її початку мінімальний – можливе відскакування зерен від решета. Тому, найбільш доцільно встановити такий кут Θ_0 , при якому прискорення частки збільшується на всьому шляху її руху з максимальним тиском на решітну поверхню, коли забезпечуються необхідні умови для проходження процесу сепарації. Загальний характер руху частки по решету в даному випадку (рис. 5) такий, що по при збільшенні кута Θ_0 швидкість зменшується, але при цьому збільшується час її перебування на решеті.

Висновки. Аналіз рівняння руху частки зернової суміші по поверхні решета, з щілинами, що розширюються в напрямку руху оброблюваного матеріалу показує, що кінцева ширина щілини решітки l_k залежить від початкової ширини l_0 , діаметру прутків та кута їх розхилу α_k . Від величини розхилу прутків α залежить довжина робочої частини решітки. Із збільшенням кута α робоча довжина зменшується, тобто зміною кута α можна ефективно керувати процесом сепарації.

Зміна радіусу решета при однакових значеннях початкової кутової швидкості ω_0 в бік зменшення приводить до її збільшення, що позитивно впливає на процес сепарації, бо підвищується нормальний тиск частки зернової суміші на решето. Однак при цьому також зменшується час її перебування на ньому, що приводить до зниження ефективності сепарації.

Зміна діаметра прутків решета на початку руху частки зернової суміші впливає незначно, однак по мірі руху при збільшенні їх діаметра швидкість збільшується. З іншого боку збільшення діаметру приводить до зменшення корисної площі решітки та до підвищення металоємності самого решета.

При впровадженні решіт запропонованої конструкції не вирішеним залишається питання впливу на якість сепарації величини розхилу прутків в кінцевій частині та їх граничні межі для різних сільськогосподарських культур.

Випробування показали, що якість сепарації зерна пшениці на запропонованому решеті підвищується на 12-14 % порівняно з існуючими.

Список літератури

1. Сало В.М., Лузан П.Г., Богатирьов Д.В. Технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання: монографія. Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2014. 148 с.
2. Олексієнко В.О., Петриченко С.В., Радев С.Ю. Аналіз конструкцій зерноочисних машин. *Праці ТДАТУ*. 2010. Вип. 10, т. 3. С. 176-183.
3. ТОП-10 стран-производителей пшеницы в 2020/21 МГ. Главный сайт об агробизнесе: веб-сайт. URL: <https://latifundist.com/rating/top-10-stran-proizvoditelej-pshenitsy-v-202021-mg> (дата звернення 27.06.2021).
4. Постнікова М.В., Петров В.О. Дослідження енергоємності процесу очищення зерна на зерноочисних машинах. Науковий вісник ТДАТУ. 2018. Вип. 8. Т2. С. 238-245. DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-33.
5. Самчук Ю.Ю., Стельмах В.М., Тростенюк Ю.І. Дослідження можливості застосування комп'ютерного моделювання в процесі оптимізації конструкторських рішень при проектуванні зерноочисних машин. *Інженерія природокористування*. 2018. № 1(9). С. 71-78.
6. Тищенко Л., Харченко С., Василенко О. Сепарація гороху та нуту. The Ukrainian Farmer: веб-сайт. URL: <https://agrotimes.ua/article/separaciya-gorohu-ta-nutu/> (дата звернення: 29.11.2021).
7. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Виброрешетная сепарация зерновых смесей: монография. Харьков: «Міськдрук», 2011. 280 с.

8. Котов Б.І., Деревенько І.А., Степаненко С.П. Дослідження ефективності сепарації зернових матеріалів на ступінчасто-колінчастому решеті вібровідцентрових машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2 (85). С. 99-102.
9. Алієв, Е.Б.. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
10. Сергійєв А.П., Макаров А.В., Журавлев А.В. К вопросу бесситной сепарации сыпучих многокомпонентных материалов. *Фундаментальные исследования: технические науки*. 2015. № 2, ч.2. С. 4871-4875.
11. Igor Dudarev et al. Research on seed separation process on a gravity-cascade separator / Дослідження процесу сепарування насіння на сепараторі гравітаційно-каскадного типу. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 62, no.3. Pp. 173-180. DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-18>.
12. Авдеев Н.Е. Принципы построения модели идеального сепаратора. *Докл. ВАСХНИЛ*. 1978. №11. С. 38-40.
13. Лузан П.Г. Кісільов Р.В., Лузан О.Р. Обґрунтування параметрів решета з щілинами непостійного розміру. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб.*. 2019. Вип. 49. С. 147-154. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.147-154>.
14. Решето: пат. на корисну модель 23532 Україна, МПК В07В 13/07. №u200700920; Заявл. 29.01.07; Опубл. 25.05.07. Бюл. №7.
15. Решето: пат. на корисну модель 105854 Україна, МПК В07В 13/07. №u2015 08835; Заявл. 14.09.15; Опубл. 11.04.16. Бюл. №7.

Referencis

1. Salo, V.M., Luzan, P.H., & Bohatyrov D.V. (2014). *Tekhnichne zabezpechennia pidhotovky zerna do zberihannia* [Technical support for grain preparation for storage]. Kirovohrad: SPD FO Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Oleksiienko, V.O., Petrychenko, S.V., & Radiev, S.Yu. (2010). Analiz konstruksii zernoochysnykh mashyn [Analysis of grain cleaning machine designs.]. *Pratsi TDAT – Works of TSATU*, Vol. 10, 3, 176-183 [in Ukrainian].
3. TOP-10 stran-proyzyvodytelei pshenytsy v 2020/21 MH [TOP-10 wheat-producing countries in 2020/21 MY]. *Hlavnyi sait ob ahrobyznese. – The main site about achrobusiness*. Retrieved from: <https://latifundist.com/rating/top-10-stran-proizvoditelej-pshenitsy-v-202021-mg> [in Ukrainian].
4. Postnikova, M.V., & Petrov, V.O. (2018). Doslidzhennia enerhoiemnosti protsesu ochyshchennia zerna na zernoochysnykh mashynakh [Investigation of energy intensity of grain cleaning process on grain cleaning machines]. *Naukovyi visnyk TDATU – Scientific Bulletin of TSATU*, Vol. 8, 2, 238-245 [in Ukrainian].
5. Samchuk, Yu.Yu., Stelmakh, V.M., & Trosteniuk, Yu.I. (2018). Doslidzhennia mozhlyvosti zastosuvannia komp'uternoho modeliuвання v protsesi optymizatsii konstruktorskykh rishen pry proektuvanni zernoochysnykh mashyn [Research of possibility of application of computer modeling in the process of optimization of design decisions at designing of grain cleaning machines]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia - Environmental engineering*, Vol. 1(9). 71-78. [in Ukrainian].
6. Tishchenko, L., Kharchenko, S., & Vasylenko, O. Separatsiia horokhu ta nutu [Separation of peas and chickpeas] . The Ukrainian Farmer: Retrieved from: <https://agrotimes.ua/article/separaciya-gorohu-ta-nutu/> [in Ukrainian].
7. Tyshchenko, L.N., Olshansky,i V.P., & Olshanskyi, S.V. (2011). *Vybreshetnaia separatsiia zernovykh smesei*[Vibrating sieve separation of grain mixtures: monograph]. Kharkov: Miskdruk [in Ukrainian].
8. Kotov, B.I., Derevenko, I.A., & Stepanenko, S.P. (2017). Doslidzhennia efektyvnosti separatsii zernovykh materialiv na stupinchasto-kolinchastomu resheti vibrovidtsentrovnykh mashyn [Research of efficiency of separation of grain materials on a step-cranked sieve of vibrocentric machines]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in engineering and technology*, Vol. 2(85), 99-102. [in Ukrainian].
9. Aliiev, E.B. (2019). *Fizyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziinoi separatsii nasinnievoho materialu soniashnyku* [Physical and mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph.]. Zaporizhzhia: STATUS [in Ukrainian].
10. Serhyev, A.P., Makarov, A.V., & Zhuravlev, A.V. (2015). K voprosu bessytnoi separatsyy sypanykh mnohokomponentnykh materyalov [On the issue of insatiable separation of bulk multicomponent materials]. *Fundamentalnye yssledovaniya: tekhnicheskyye nauky - Basic research: technical sciences*, Vol. 2, 2, 4871-4875. [in Ukrainian].

11. Dudarev, I. et al. (2020). Research on seed separation process on a gravity-cascade separator [Doslidzhennia protsesu separuvannia nasinnia na separatori hравitatsiino-kaskadnoho typu]. *INMATEH – Agricultural Engineering, Vol. 62, 3*, 173-180. [in English].
12. Avdeev, N.E. (1978). Pryntsypy postroenyia modely ydealnoho separatora [Principles of building a model of an ideal separator]. *Dokl. VASKhNIL - Dokl. VASKHNIL, Vol. 11*, 38-40 [in Russian].
13. Luzan, P.H. Kisilov, R.V., & Luzan, O.R. (2019). Obgruntuvannia parametriv resheta z shchilnyamy nepostiinoho rozmiru [Determination of sieve parameters with non-standard size slits]. *Konstruivannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil'skohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 49*, 147-154 [in Ukrainian].
14. Shmat, S.I., e.a. Resheto [Sieve]. Patent UA, no. 23532, 2007 [in Ukrainian].
15. Luzan, P.H. e.a. Resheto [Sieve]. Patent UA, no. 105854, 2016 [in Ukrainian].

Petro Luzan, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Kisilyov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olena Luzan**, PhD tech. sci., **Oleh Kyslun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical Aspects of Grain Separation on an Inertial-gravity Separator Sieve

The aim of the article is to substantiate the design, derivation and approbation by calculations of formulas for determining the parameters of the sieve with slits that expand in the direction of movement of the processed material.

It is established that grain cleaning machines, which currently work on agricultural and processing enterprises with flat sieves, have been used for many years, are well studied and improved, their technical and economic indicators have reached maximum values. The problem is that to ensure the proper operation of existing grain cleaning machines with traditional flat sieves, a large amount of energy costs are spent on additional operations that are not directly related to the separation process, but without them the normal operation of the machine is impossible. This is directly the transportation of grain and cleaning the sieves from grains that are stuck in the cracks and degrade the quality of their work. The substantiation of the technological scheme of the inertial-gravity separator sieve with slits expanding in the direction of movement of the processed material is performed and the influence of its main parameters on the efficiency of separation of grain mixtures is established. The regularities of the movement of the grain mixture on the surface of the sieve are determined, when favorable conditions are created for the passage through the slits of particles that can pass through it. The method of calculation of the basic geometrical and kinematic parameters of a sieve is offered. To implement the proposed calculation method developed software that allows you to convert blocks developed in analytical form of the calculation method in a form that meets the requirements of the architecture of mathematical models and implements the numerical methods of Runge-Kutt and Nelder-Mead.

Tests have shown that the quality of separation of wheat grain on the proposed sieve increases by 12-14% compared to existing ones. When implementing the sieves of the proposed design, the issue of influencing the quality of separation of the magnitude of the bar deflection in the end part and their limits for different crops remains unresolved.

separation, sieve, energy separation, grain mixture, inertial gravity separator

Одержано (Received) 02.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 10.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.104-110>

О.М. Васильковський, проф., канд. техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Нестеренко**, доц., канд. техн. наук, **Д.І. Петренко**, доц., канд. техн. наук, **С.М. Якименко**, доц., канд. фіз.-мат. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: olexa74@ukr.net

Обґрунтування конструктивної схеми пневморешітного сепаратора зерна

Статтю присвячено удосконаленню конструкції відцентрового пневморешітного сепаратора для розділення компонентів зернових сумішей. Базова конструкція задовільно виконує технологічний процес, однак має відносно великі вертикальні габарити за рахунок використання замкненої системи аспірації з подвійним очищенням зернової маси повітряним потоком. В роботі наведено концепцію удосконалення системи аспірації, що дозволить суттєво зменшити висоту, а також викладено методику проектного конструкторського розрахунку параметрів удосконаленої машини.

сепаратор, зерно, обґрунтування, конструкція, розрахунок, параметри, аспірація

Постановка проблеми. Попереднє очищення зерна від домішок дозволяє не тільки підвищити його товарну цінність, а й запобігти псуванню в процесі зберігання. Зростаючі темпи виробництва зерна в Україні і світі вимагають забезпечення сільськогосподарських товаровиробників сучасною якісною, продуктивною, надійною, економічною і дешевою технікою. Останні пункти названих вимог особливо важливі для малих фермерських господарств, які виробляють близько 50% всієї сільськогосподарської продукції [1], проте, внаслідок невеликих індивідуальних об'ємів виробництва не мають достатньої кількості обігових активів для закупівлі високовартісних машин. Таким чином, забезпечення належної технологічної ефективності очищення зерна, поряд зі зменшенням вартості зерноочисних машин є актуальною задачею аграрного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день в господарствах України широко використовуються пневматичні [2–5] та пневморешітні зерноочисні машини, які оснащені коливальними решетами і системами аспірації, які об'єднані у єдину конструкцію [6–12]. Основним недоліком таких машин є низька питома ефективність решітної сепарації, обумовлена протіканням процесу розділення в полі дії лише гравітаційної сили, яка має невелику величину і не дозволяє проходовим часткам швидко просіюватись крізь отвори. Крім того, наявність гострих крайок класичних пробивних решіт в сукупності з жорсткими очисниками отворів є джерелами пошкодження зерна і підвищеного шуму на робочому місці, особливо у закритих приміщеннях, ангарах тощо.

Зазначені вище недоліки вимагають від науковців і конструкторів створення принципово нової зерноочисної техніки, яка б задовольняла сучасні потреби виробників аграрної продукції.

На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету створено оригінальну конструкцію сепаратора

зерна [13], в якій органічно поєднано систему аспірації і решітну частину завдяки використанню єдиного активного робочого органу – лопаткового ротора. Розроблений сепаратор є прямоточним, при цьому дуговидне решето оригінальної конструкції позбавлене гострих крайок, не потребує очищення отворів від забивання і забезпечує розділення зернової маси у відцентровому силовому полі [14].

Основним недоліком такої схеми є відносна складність регулювання системи аспірації, яка є замкненою, з двократним очищенням від легких домішок. Крім складності регулювання за рахунок перерозподілу швидкостей повітряного потоку, дана система має збільшену масу і габарити.

Постановка проблеми. На основі зазначеного вище можна сформулювати робочу гіпотезу: спрощення конструкції даної машини і зменшення розмірів при забезпеченні задовільних показників ефективності очищення зерна дозволить підвищити її привабливість для потенційних користувачів.

Виклад основного матеріалу. Розробку нової зерноочисної машини почнемо зі створення схеми, узгодження питань взаємного розташування основних робочих органів і елементів конструкції. Схему запропонованого сепаратора наведено на рис. 1. Спрощення конструкції даної машини і зменшення розмірів при забезпеченні задовільних показників ефективності очищення зерна, на нашу думку, дозволить підвищити її привабливість для потенційних користувачів.

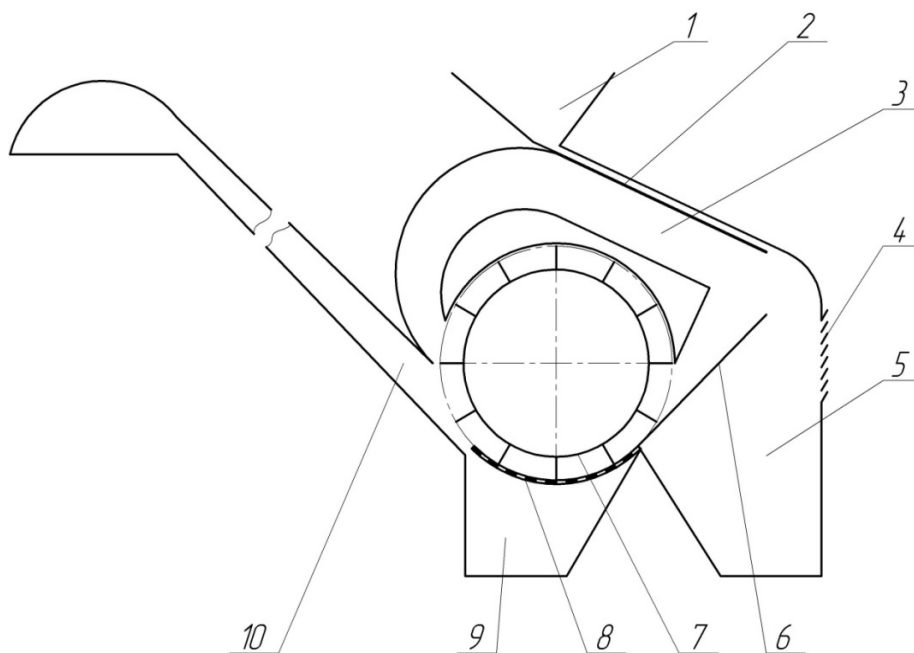


Рисунок 1 – Конструктивна схема відцентрового пневморешітного сепаратора з однократним очищенням зерна повітряним потоком

Джерело: розроблено авторами

Колосове решето, що встановлене на машині є нерухомим, прутковим без поперечних перетинок. Для переміщення зернової маси, кут встановлення колосового решета α (рис.2) повинен бути більшим ніж кут тертя часток оброблюваного матеріалу по ньому

$$\alpha > \varphi.$$

Кут тертя по сталі зерна більшості вирощуваних сільськогосподарських культур становить $\alpha = 0,35 \dots 0,5$. Таким чином, кут нахилу колосового решета повинен бути

шляхом регулювання його висоти h . Встановлення робочої висоти повітряного каналу будемо здійснювати експериментально, тому, для теоретичного визначення габаритів запропонованого сепаратора скористаємося позначенням найбільшої висоти каналу $h_{\max}$.

Таким чином, вертикальна проекція (габарит) повітряного каналу становить

$$L_{y1} = \frac{h_{\max}}{\cos \alpha}.$$

Вертикальна проекція (габарит) колосового решета (рис. 1) становить

$$L_{y2} = l \cdot \sin \alpha = \frac{q_b}{q_F} \cdot \sin \alpha.$$

Таким чином, максимальний вертикальний габарит колосового решета з повітряним каналом складе

$$L_{y3} = L_{y1} + L_{y2} = \frac{h_{\max}}{\cos \alpha} + \frac{q_b}{q_F} \cdot \sin \alpha.$$

Параметри підсівного решета і ротора приймаємо як і у базової машини, оскільки вони будуть використовуватися без змін:

- діаметр ротора $D = 250$ мм;
- центральний кут підсівного решета $\frac{\pi}{4}$;
- радіус решета $R = 125$ мм;
- кут встановлення підсівного решета $\alpha_{II} = 45^\circ$.

Вісь обертання решета встановлюємо на вертикалі, опущеній з початку повітряного каналу (точка A), причому початок підсівного решета (точка E) з'єднається з кінцем повітряного каналу (точка B) напрямним жолобом таким чином, щоб кут BED становив 90° . Дана умова необхідна для уникнення ефекту «завихрення» зерна при переході з жолоба до решета.

Визначимо вертикальний габарит L_{y4} .

$$L_{y4} = L_{y3} + CH$$

$$CH = CD + DH = CD + R.$$

Очевидно, що

$$CD = CF + DF,$$

де складові рівняння визначиться як

$$CF = CB \cdot \operatorname{tg} \beta = l \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta = \frac{q_b}{q_F} \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta,$$

$$DF = \frac{DE}{\cos \beta} = \frac{R}{\cos \beta}.$$

Таким чином, з урахуванням знайдених величин:

$$CD = \frac{q_b}{q_F} \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{R}{\cos \beta}.$$

З урахуванням знайдених складових запишемо:

$$CH = \frac{q_b}{q_F} \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{R}{\cos \beta} + R.$$

Тож вертикальний габарит L_{y4} становитиме

$$L_{y4} = \frac{h_{\max}}{\cos \alpha} + \frac{q_b}{q_F} \cdot \sin \alpha + \frac{q_b}{q_F} \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{R}{\cos \beta} + R.$$

$$L_{y4} = \frac{q_b}{q_F} (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta) + \frac{h_{\max}}{\cos \alpha} - R \left(\frac{1}{\cos \beta} - 1 \right).$$

З урахуванням встановлення під ротором приймального дрібних домішок H_d , загальний вертикальний розрахунковий габарит (висота) запропонованої схеми відцентрового пневморешітного сепаратора становитиме

$$L_{y4} = \frac{q_b}{q_F} (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta) + \frac{h_{\max}}{\cos \alpha} - R \left(\frac{1}{\cos \beta} - 1 \right) + H_d.$$

Очевидно, що загальна висота є меншою ніж у базової машини, вертикальний габарит якої становить близько 1400 мм, однак оцінити кількісно дану різницю можна буде лише після проведення експериментальних досліджень і визначення конкретних значень технологічних параметрів q_b і q_F .

Висновки. На основі проведення попередніх розрахунків можна зробити наступні висновки:

- використання запропонованої схеми дозволить, напевно, зменшити висоту і масу відцентрового пневморешітного сепаратора зерна;
- заміна двократного повітряного очищення однократним дозволить спростити регулювання машини;
- експериментальне встановлення показників технологічної ефективності q_b і q_F запропонованого сепаратора дозволить теоретично визначати габарити і автоматизувати процес проектування зерноочисних машин, створюваних за подібною схемою.

Список літератури

1. Малі фермери та домогосподарства в сільському господарстві та сільській економіці: оцінка їх ролі та заходи з підтримки їх сталого розвитку. веб-сайт. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2021/07/Smallholders-KSE.pdf> (дата звернення: 10.10.2021).
2. Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2003. Вип. 33. С.53-59.
3. Васильковський О. М., Петренко Д. І. Підвищення ефективності повітряного очищення зерна. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2005. Вип. 35. С. 286–288.
4. Дідур В. А., Чебанов А. Б. Обґрунтування технологічних режимів пневмосепараторів з пилоосаджувальною камерою при сепарації рушанки насіння рідини. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2011. Вип.107, т.1. С. 319 – 325.
5. AEROMEN – Виробник зерноочисного обладнання: веб-сайт. URL: <https://aeromeh.com.ua/catalog/separatory-sad/> (дата звернення: 10.10.2021).
6. Машина предварительной очистки МПО-50М. Руководство по эксплуатации МПО-50.00.0 МРЭ. Воронеж: ООО «Воронежсельмаш», 2017. 55 с.
7. Лузан П. Г., Васильковський О. М. Нові конструкції решіткових сепараторів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 1999. Вип. 27. С. 123-127.
8. Півень М. В. Обоснование процесса сепарирования зерновых смесей плоскими вибрационными решетками. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin*. 2015. Vol.17 №.7. 163–169.
9. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European*

- Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2. № 7 (80). 63–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65920
10. Ямпілов С. С. Технологическое и техническое обеспечение ресурсо-энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. 262 с.
 11. Кожуховский И. Е. Зерноочистительные машины. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.
 12. Сисолін П. В., Петренко М. М., Свірень М. О. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Машини та обладнання для переробки зерна та насіння: підруч. для студ. вищ. навч. закл. із спец. "Машини та обладн. с.-г. вир-ва". Кн. 3. К.: Фенікс, 2007. 432 с.
 13. Повітряно-решітний сепаратор: пат. 85117 Україна: МПІК В07В 13/08 (2006.01), В07В 7/00, В02В 3/00. № а200703659; заявл. 03.04.2007; опубл. 25.12.2008, Бюл.№ 24, 2008 р
 14. Васильковский О. М. Разработка конструкции та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 2001. 18 с.
 15. Васильковский О. М., Васильковский М. І., Осипов І. М. Обґрунтування конструктивних параметрів інерційного прямооточного сепаратора зерна. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 1999. Вип. 29. С. 234–238.

References

1. Mali fermery ta domohospodarstva v silskomu gospodarstvi ta silskii ekonomitsi: otsinka yikh roli ta zakhody z pidtrymky yikh staloho rozvytku [Small farmers and households in agriculture and rural economy: assessment of their role and measures to support their sustainable development]. veb-sait. Retrieved from <https://kse.ua/wp-content/uploads/2021/07/Smallholders-KSE.pdf> [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. & Pastushenko, M. H. (2003). Tendentsii rozvytku konstruktii mashyn ta obladnannia dlia ochyshchennia i sortuvannia zerno materialiv [Trends in the design of machinery and equipment for cleaning and sorting grain materials]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s-h mashyn*. Kirovohrad, Vol. 33, 53–59 [in Ukrainian].
3. Vasytkovskyi, O. M. & Petrenko, D. I. (2005). Pidvyshchennia efektyvnosti povitrianooho ochyshchennia zerna. [Improving the efficiency of air cleaning of grain]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*. Kirovohrad, Vol. 35, 286–288 [in Ukrainian].
4. Didur, V. A. & Chebanov, A. B. (2011). Obgruntuvannia tekhnolohichnykh rezhymiv pnevmoseparatoriv z pyloosadzhuvalnoiui kameroiui pry separatsii rushanky nasinnia rytsyny. [Substantiation of technological modes of pneumoseparators with dust-depositing chamber during separation of castor bean seedlings]. *Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva*. Kharkiv, Vol 107, t.1, 319–325 [in Ukrainian].
5. AEROMEH – Vyrobynyk zernoochysnoho obladnannia: veb-sait [AEROMEH - Manufacturer of grain cleaning equipment]. *aeromeh.com.ua*. URL: <https://aeromeh.com.ua/catalog/separatory-sad/> [in Ukrainian].
6. Mashyna predvartelnoi ochystky MPO-50M. (2017). [Machine pre-cleaning MPO-50M]. Rukovodstvo po ekspluatatsii MPO-50. Voronezh: OOO «Voronezhselmash». [in Russian].
7. Luzan, P.G. & Vasilkovsky, O.M. (1999). Novi konstrukciyi reshitkovy'x separatoriv [Design, manufacture and operation of agricultural machinery]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*. Vol. 27, 123–127. [in Ukrainian].
8. Piven, M. V. (2015). Obosnovanye protsessa sepyrovaniia zernovikh smesei ploskymy vybratsyonnyimi reshetamy [Justification of the process of separation of grain mixtures with flat vibrating sieves]. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin, Vol.17 (7), 163–169 [in Russian].
9. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Kharchenko, F., Bredykhin, V. & Tsurkan, O. (2016). Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, № 7 (80), 63–69. [in English].
10. Yampilov, S.S. (2003). *Tekhnolohicheskoe i tekhnicheskoe obespechenie resurso-energoberegaiushchykh protsessov ochistki i sortirovaniia zerna i semian* [Technological and technical support of resource-energy-saving processes of cleaning and sorting of grain and seeds]. Ulan-Ude: VSHTU [in Russian].
11. Kozhukhovskii, Y.E. (1974). *Zernoochistytelnye mashyny* [Grain Cleaning Machines]. Moscow: Mashynostroenie [in Russian].
12. Sysolin, P.V., Petrenko, M.M. & Sviren, M.O. (2007). Silskohospodarski mashyny: teoretychni osnovy, konstruktsiia, proektuvannia. Mashyny ta obladnannia dlia pererobky zerna ta nasinnia [Agricultural machinery: theoretical foundations, construction, design. Machines and equipment for grain and seed processing]. (3d ed.). Kyiv: Feniks [in Ukrainian].

13. Povitriano-reshitnyi separator [Air-lattice separator]. pat. 85117 Ukraina: MPK (2006) B07B 13/08, B07B 7/00, B02B 3/00. №a200703659; zaiavl. 03.04.2007; opubl. 25.12.2008, Biul. № 24 [in Ukrainian].
14. Vasylovskiy, O.M. (2001). Rozrobka konstruktzii ta obgruntuvannia parametriv vidtsentrovoho reshitnoho separatora zerna [Development of design and substantiation of parameters of centrifugal sieve grain separator]. *Extended abstract of Doctor's theses*. Kirovohrad [in Ukrainian].
15. Vasylovskiy O. M., Vasylovskiy M. I. & Osypov I. M. (1999). Obgruntuvannia konstruktyvnykh parametriv inertiinoho priamotocnoho separatora zerna [Substantiation of design parameters of inertial direct-flow grain separator]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Vol. 29*, 234-238 [in Ukrainian].

Oleksii Vasylovskiy, Prof., PhD tech. sci., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Nesterenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Iakymenko**, Assoc. Prof., PhD phys.&math. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Substantiation of the Constructive Scheme of the Pneumatic-grain Separator

The aim of the article is to improve the design of the original centrifugal grain separator. The separator is designed to separate the components of grain materials by size and aerodynamic properties. The basic design satisfactorily performs the technological process, but has large dimensions vertically. Reducing the size will simplify the design and reduce the cost of the machine.

The article proposes to replace the double pneumatic cleaning of grain material with a single one. At the same time the car gets rid of the closed aspiration system. The closed aspiration system has operational advantages, however difficult adjustment reduces indicators of technological efficiency of pneumatic cleaning of grain. The original pneumatic cleaning system allows you to remove light impurities without creating significant air resistance, due to the lack of countercurrent movements. In addition, the use of an inclined pneumatic channel does not require the creation of high-speed airflow. As a result of the proposed improvement simplifies the structure and regulation of the separator, as well as reduces its size and weight. In addition to the modernization of the design of the pneumatic-sieve separator, the article presents the method of design engineering calculation of its basic geometric parameters. Depending on the specific capacity of the upper (ear) sieve and the characteristics of the grain mixture is determined by its length and angle. The remaining geometric parameters are derived from the above.

Based on preliminary calculations, the following conclusions can be drawn. The use of the proposed scheme will reduce the height and weight of the centrifugal pneumatic sieve grain separator. Replacing the double air cleaning with a single one will simplify the adjustment of the machine. Experimental establishment of indicators of technological efficiency of the proposed separator will theoretically determine the dimensions and automate the design process of grain cleaning machines created by a similar scheme.

separator, grain, substantiation, design, calculation, parameters, aspiration

Одержано (Received) 02.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 08.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 631.362.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.111-116>

О.В. Нестеренко, доц., канд. техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський**, проф., канд. техн. наук, **Д.І. Петренко**, доц., канд. техн. наук
Центальноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: nov_78@ukr.net

Оцінка рівномірності розподілу та засміченості зерна при його багаторівневому введенні в пневмосепаруючий канал

Одним із важливих показників ефективності роботи пневмосепаруючих каналів є рівномірність поля швидкостей повітряного потоку, яка в свою чергу залежить від розподілу зернового матеріалу в робочій зоні сепарації. В статті приведені результати розподілу зернового матеріалу при багаторівневому способі введення зерна, а також його вплив на засміченість легкими домішками по висоті пневмосепаруючого каналу. В результаті досліджень отримано залежності засміченості очищеного зерна легкими домішками від кількості задіяних рівнів живильного пристрою.

пневмосепаруючий канал (ПСК), засміченість, рівномірність розподілу, живильний пристрій, зерновий матеріал

Постановка проблеми. Зернова суміш, яка отримується з поля, має в своєму складі значну кількість легких і крупних домішок органічного та мінерального походження, насіння бур'янів та ін. При цьому, в багатьох випадках, вологість цих домішок в значній ступені перевищує вологість основного зерна та впливає на його подальшу обробку та зберігання [1].

Засміченість зернового матеріалу суттєво впливає на показники якості очищеного зерна, оскільки повітряному потоку потрібно транспортувати значно більший об'єм домішок в осадову камеру. Потрапляючи в пневмосепаруючий канал такі домішки розташовуються, як правило, в середніх або в нижніх шарах зернового струменя, що погіршує можливість їх виділення. І для того, щоб вони змогли отримати висхідну траєкторію, необхідно щоб розташування частинок зернової в робочій зоні ПСК було досить рівномірним і з певним інтервалом одна від одної.

Тому, для отримання високого ступеня очищення домішок, особливо при значній засміченості легкими домішками, необхідно забезпечити максимально рівномірне завантаження зернового матеріалу в ПСК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для створення більш рівномірного розподілу зернового матеріалу в робочій зоні ПСК використовують живильні пристрої. Вони забезпечують умови, при яких зерновий матеріал тонкошаровим направленим струменем подається в повітряний потік. Така подача дозволяє значно покращити взаємодію компонентів вхідного зернового матеріалу з повітрям, збільшуючи вірогідність їх виділення, а також мінімізувати контакт частинок зернової суміші, що суттєво підвищує ефективність роботи повітряного потоку [2]. Отже, досягнувши рівномірної подачі та розподілу зернового матеріалу в робочій зоні ПСК, можна отримати більш вирівняне поле швидкостей повітряного потоку та підвищити якість сепарації [3].

Існують декілька типів живильників, одними з найпоширеніших з яких є живильники активного типу та гравітаційні. Але основним недоліком всіх активних живильників, в тому числі аераційних, є необхідність додаткового енергоживлення, використання вентиляторів, електродвигунів, внаслідок чого підвищується енергоємність очищення та складність їх конструкції [4].

В деяких зерноочисних машинах в якості гравітаційного живильника застосовується регульований клапан і перед введенням в ПСК зерновий матеріал вільно падає поблизу отвору і, відбиваючись від клапана, потрапляють в канал з різними траєкторіями та швидкостями, створюючи меншу щільність та збільшуючи взаємодію частинок з повітряним потоком [5].

Застосування гравітаційного живильника решітного типу, на прикладі зерноочисної машини МПО-50 також значно підвищує рівномірність розподілу, завдяки чому важка фракція просипається крізь решето, при цьому крупні домішки вводяться в ПСК над основним зерном [6].

Відомі також багатоярусні живильні пристрої, які дозволяють вводити зерновий матеріал декількома ярусами та під різними кутами відносно напрямку повітряного потоку, що дає можливість рівномірно заповнити робочу зону по глибині ПСК [7, 8]. Але недоліками таких пневмосепараторів є вірогідність забивання та обмеження продуктивності кожного ярусу, оскільки при збільшенні загального питомого навантаження буде погіршуватись епюра швидкостей повітряного потоку та порушуватись умови розділення зернового матеріалу, що суттєво зменшить його ефективність.

На основі огляду та аналізу конструкцій живильників нами був запропонований живильний пристрій для багаторівневого введення зерна, застосування якого дозволяє забезпечити рівномірний розподіл зернового матеріалу в ПСК та вирівняти поле швидкостей повітряного потоку в робочій зоні сепарації [9]. Використання такого живильного пристрою дозволяє значно покращити якісні показники пневмосепарації, але при цьому існує вірогідність потрапляння легких домішок в верхні зернові шари, що може вплинути на повноту розділення очищеного зерна.

Постановка завдання. Метою даних досліджень є визначення впливу багаторівневого введення на вміст легких домішок в очищеному зерні по висоті ПСК, а також аналіз розподілу зернової суміші в робочій зоні сепарації.

Виклад основного матеріалу. Особливістю роботи пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу є те, що зернові потоки вводяться в ПСК паралельно один над одним, і відповідно, легкі домішки, з самого нижнього рівня введення повинні транспортуватись через всі вище розташовані зернові шари. При цьому вони мають пройти останній зерновий шар і отримати висхідну траєкторію до того, як досягнуть жалюзійної стінки ПСК.

Отже, для аналізу ступеня засміченості очищеного зерна по висоті ПСК та для підтвердження теоретичного аналізу [10] була розроблена експериментальна установка (рис. 1) та проведені наступні дослідження.

Експериментальна установка (рис. 1) складається з бункера 1, живильного пристрою 2, ПСК 3, жалюзійної стінки 4 та осадової камери 6. Жалюзійна стінка 4 з'єднана з пробовідбірниками очищеного зерна 5 за допомогою вивідних лотків 7.

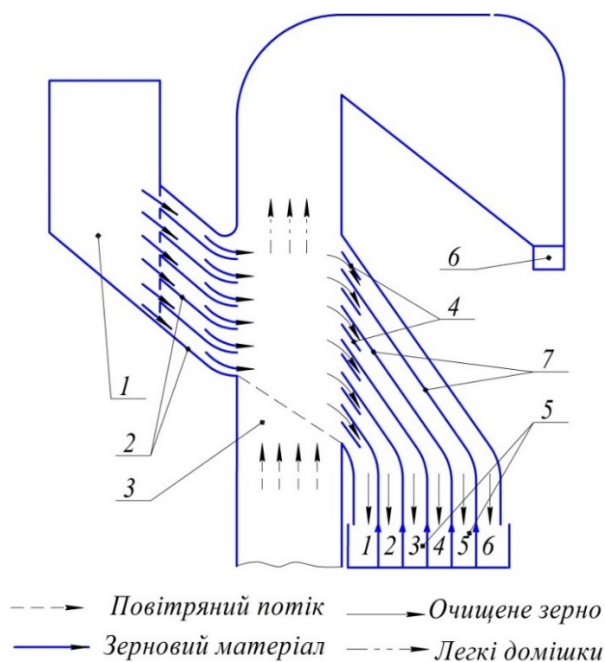


Рисунок 1 – Схема до визначення засміченості очищеного зерна по висоті ПСК
Джерело: розроблено авторами

Вивідні лотки встановлювали напроти відповідної напрямної поверхні живильника так, щоб отримана порція в кожному i -му пробовідбірнику приблизно відповідала питомому навантаженню i -го рівня живильника.

В дослідженнях використовували зерно пшениці масою 10 кг, яке штучно засмічувалось легкими домішками.

Кількість задіяних рівнів живильного пристрою встановлювали 2, 4 та 6 шт., при цьому, навантаження на кожен рівень було однаковим $q_{bi} = 350$ кг/дм·год. Швидкість повітряного потоку – $V_n = 7 \dots 8$ м/с, а швидкість введення зернового матеріалу, $v_g = 0,4 \dots 0,6$ м/с, відстань між рівнями – $h_{м.р.} = 0,03$ м.

Ступінь засміченості для кожного i -го пробовідбірника визначали за вмістом домішок в очищеному зерні:

$$\tau_i = \frac{G_i}{G_{заг}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де G_i – маса легких домішок в i -му пробовідбірнику, кг.;

$G_{заг}$ – загальна маса легких домішок в вихідному зерновому матеріалі, кг.

Рівномірність розподілу зернового матеріалу по висоті ПСК оцінювали коефіцієнтом варіації Δ , якій визначали за формулою:

$$\Delta = \frac{\sigma_c}{M_i} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де $\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum (M_i - \bar{M})^2}{k-1}}$ – середньоквадратичне відхилення маси зерна, кг;

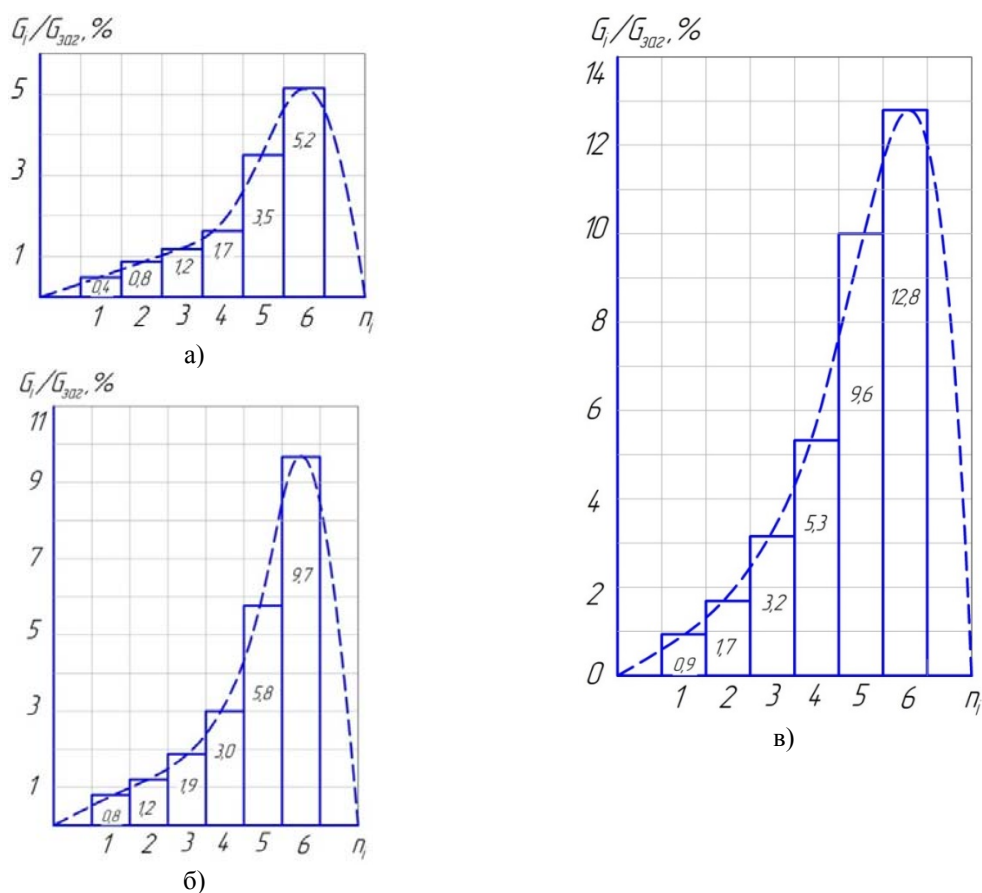
M_i – маса зерна в i -му пробовідбірнику, кг;

$\bar{M}$ – середньоарифметична маса зерна на рівні живильника, кг;

k – кількість пробовідбірників.

Результати визначення засміченості очищеного зерна по висоті ПСК (рис. 2) дозволяють зробити висновок, що вміст домішок в очищеному зерні збільшується по експоненціальному закону як для дворівневого введення так і для чотирьохрівневого та при шести задіяних рівнях.

На основі отриманих даних (рис. 2), можна констатувати, що по мірі збільшення кількості задіяних рівнів живильного пристрою відсотковий вміст легких домішок в очищеному зерні підвищується в кожному приймальнику очищеного зерна по висоті ПСК. При цьому, основна частина легких домішок, що потрапила в очищене зерно знаходиться в п'ятому та шостому приймальнику в незалежності від кількості задіяних рівнів.



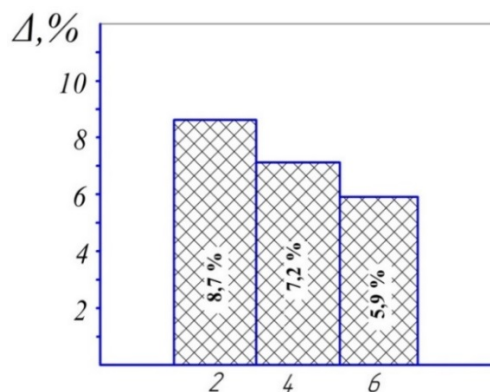
а) – 2 рівнях; б) – 4 рівнях; в) – 6 рівнях живильного пристрою

Рисунок 2 – Варіаційний розподіл вмісту легких домішок в очищеному зерні по висоті ПСК з питомим навантаженням $q_{bi} = 350 \text{ кг} \cdot \text{дм} / \text{год}$ при

Джерело: розроблено авторами

З графіків видно (рис. 3), що при задіюванні двох рівнів введення в 5 і 6 приймальник потрапило легких домішок 8,7% із 12,8 %, при чотирьохрівневому 15,5% із 22,4 %, при шести задіяних рівнях 24,8% із 33,5 %. Відповідно, повнота розділення при двох задіяних рівнях становить $\varepsilon = 87,2\%$ ($q_B = 700 \text{ кг} / \text{дм} \cdot \text{год}$), при чотирьох рівнях $\varepsilon = 77,6\%$ ($q_B = 1400 \text{ кг} / \text{дм} \cdot \text{год}$), а при шестирівневому введенні $\varepsilon = 65,5\%$ ($q_B = 2100 \text{ кг} / \text{дм} \cdot \text{год}$).

Аналіз графіка (рис. 2) дозволяє стверджувати, що рівномірність заповнення приймальників очищеного зерна підвищується зі збільшенням кількості задіяних рівнів живильного пристрою пневмосепаратора. Відповідно, чим більше задіяних рівнів живильника, тим рівномірніше зерновий матеріал розподіляється по висоті ПСК.



2, 4, 6 – кількість задіяних рівнів живильного пристрою

Рисунок 3 – Діаграма рівномірності розподілу зернового матеріалу по висоті ПСК
Джерело: розроблено авторами

Висновки. В результаті проведених досліджень визначено, що кількість задіяних рівнів введення живильного пристрою впливає на ступінь засміченості очищеного зерна, при цьому рівномірність розподілу зернового матеріалу покращується при збільшенні кількості рівнів. Зокрема, при задіюванні до 4 рівнів живильного пристрою при навантаженні $q_{bi} = 350$ кг/дм³·год на кожен рівень кількості легких домішок, що потрапляє в очищене зерно не більше 3% від їх загальної маси в вихідному матеріалі.

Список літератури

1. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.*, 2003. Вип. 33. С. 53-59.
2. Ковриков И.Т., Тавилов И.Ш. Направления исследований и конструирования питателей для сепарирования зерна в вертикальном воздушном потоке. *Вестник ОГУ*. 2003. №7. С. 198-201.
3. Нестеренко О.В., Лещенко С.М., Петренко Д.І. Дослідження нерівномірності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі при багаторівневому введенні зерна . *Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2015. Вип. 156. С. 35 – 42.
4. Нестеренко О.В. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / О.В Нестеренко, О.М Васильковський, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко, Д.В. Богатирьов. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2012. Вип. 25, Ч.1. С.49 – 53.
5. Проспект фирмы «Petkus». Машины предварительной и интенсивной очистки: К-527, К-526, К-560.
6. Машина предварительной очистки МПО-50С. Каталог продукции ОАО Главное специализированное конструкторское бюро (ГСКБ) "ЗЕРНООЧИСТКА". URL : <http://zernoочистka.ru> (дата звернення: 12.09.2021)
7. Ковриков И.Т., Тавилов И.Ш. Оптимизация конструкций устройств для ввода зерна в воздушных сепараторах . *Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития пищевой промышленности России»*. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2005. С.18 – 21.
8. Саитов А.В., Фарафонов В.Г., Саитов В.Е. Повышение эффективности работы пневмосепарирующего канала . *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 6. С. 31 – 35.
9. Спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора: пат. (11) 9586 А Україна: МКИ В 02 В 1/00 . № a200500209; заявл. 10.01.05; опубл. 17.10.2005. Бюл. №10.
10. Нестеренко О. В. Аналітичні дослідження контактного руху легких домішок у пневмосепаруючому каналі / О.В Нестеренко та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип. 47, ч. 2. С. 185 – 191.

Referencis

1. Kotov, B.I. Stepanenko, S.P. & Pastushenko, M.H. (2003). Tendencies of development of machines' designs and equipment for cleaning and sorting of grain . *Design, manufacture and operation of*

- agricultural machinery: Nationwide Interdepartmental Scientific and Technical Collection of Works.* Kirovohrad, Issue 33, 53-59 [in Ukrainian].
2. Kovrikov I.T. & Tavtilov I.Sh. (2003). Areas of research and design of feeders for grain separation in vertical air flow. *Vestnik OSU.* №7. P. 198-201 [in Russian].
 3. Nesterenko, O.V., Leshchenko, S.M. & Petrenko, D.I. (2015). Investigation of non-uniformity of air flow in the pneumatic separating channel at multilevel introduction of grain. *Bulletin of Kharkiv National Technical University named after Vasylenko. Technical sciences, Issue. 156,* 35-42. [in Ukrainian].
 4. Nesterenko, O.V., Vasylovskiy, O.M., Leshchenko, S.M. & Petrenko, D.I., Bohatyrov D.V. (2012). Prospective direction of intensification of air separation of grain. *Machines in Agricultural Production, Industrial Engineering, Automation: Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University, Issue 25; Part 1,* 49-53 [in Ukrainian].
 5. Brochure of "Petkus" company. Preliminary and intensive cleaning machines: K-527, K-526, K-560. [in Russian].
 6. Pre-cleaning machine MPO-50C. Product catalog of JSC Main Specialized Design Bureau "ZERNOOCHISTKA". URL: <http://zernoochistka.ru>. [in Russian].
 7. Kovrikov, I.T., Tavtilov, I. Sh. (2005). Optimization of designs of devices for input of grain in air separators. All-Russian scientific and practical conference "Prospects of development of food industry of Russia". Orenburg: IPK GOU OGU [in Russian].
 8. Saitov A.V., Farafonov V.G., Saitov V.E. (2015). Improving the efficiency of the pneumoseparating channel. *Modern science-intensive technologies, 6,* 31-35. [in Russian].
 9. Vasylovskiy M.I., Vasylovskiy O.M., Moroz S.M., Leshchenko S.M., Nesterenko O.V. The method of introducing grain into the pneumatic separating channel of the air separator. Pat. (11) 958A Ukraine, MKI B 02 B 1/00 (Ukraine). № a200500209; Application 10.01.05; Publ. 17.10.2005. Bull. №10 [in Ukrainian].
 10. O.V. Nesterenko, D.I. Petrenko, I.I. Pavlenko et al. (2017). Analytical studies of the contact motion of light impurities in the pneumatic separating channel. *Design, manufacture and operation of agricultural machinery: state interdepartmental scientific and technical collection of works, Issue. 47, Part 2,* 185-191 [in Ukrainian].

Olexandr Nesterenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexiy Vasylovskiy**, Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Estimation of Uniformity of Distribution and Clogging of Grain at its Multilevel Introduction into the Pneumo-separating Channel

The uniformity of grain distribution in a pneumatic separation channel is an important factor and it significantly affects the quality of grain cleaning. Indeed, with uneven feeding, impurities entering the pneumatic separating channel, to a large extent, are located in the middle or lower layers of grain flow, which impairs the possibility of their release into the settling chamber.

Feeders are used to create a more uniform distribution of grain in the operating area of the pneumatic separating channel. They provide conditions under which grain material is fed into the air stream by a thin layer of directed jet. This feeding can significantly improve the interaction of the components of the input grain material with air, increasing the likelihood of their release, as well as minimize the contact of particles of the grain mixture, which significantly increases the efficiency of air flow.

Based on the review and analysis of feeder designs, we have proposed a feeder for multi-level grain introduction. The use of such a feeder can significantly improve the quality of pneumo-separation, but there is a possibility of light impurities in the upper grain layers, which can affect the completeness of the separation of the purified grain.

Experimental studies were conducted to determine the effect of multilevel introduction on the content of light impurities in the purified grain along the height of the pneumatic separation channel, as well as to analyze the distribution of grain mixture in the operating separation area.

As a result of the conducted research it is determined that the number of involved levels of introduction of the feeding device influences the degree of clogging of the cleared grain, thus, uniformity of distribution of grain improves at increase in quantity of levels. In particular, when using up to 4 levels of the feeder under load $q_{bi} = 350 \text{ kg/dm}^3 \cdot \text{h}$ at each level, the amount of light impurities entering the purified grain is not more than 3% of their total weight in the source material.

pneumatic separation channel (PSC), clogging, uniformity of distribution, nutrient device, grain material

Одержано (Received) 15.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 04.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 631.313

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.117-125>

М.І. Черновол, проф., академік НААН України, д-р техн. наук, **М.О. Свірень**, проф., д-р техн. наук, **В.В. Амосов**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: kaf_sgm_kntu@ukr.net, v_vas_a@ukr.net

Моделювання процесу однозернового дозування вакуумним пневмомеханічним висівним апаратом

Використання математичного моделювання значно прискорює процес досліджень. Розроблено алгоритм та програму в системі MathCAD для імітаційного моделювання процесу відокремлення насінин від циліндричної, конічної та тороїдальної поверхонь присмоктувальних отворів вакуумного пневмомеханічного висівного апарата та падіння їх на дно борозни.

Виявлено, що рівномірність розподілу насінин по довжині рядка погіршується зі зменшенням середнього діаметра насінин та збільшення радіуса присмоктувального отвору.

При конічній поверхні присмоктувального отвору найвища рівномірність розподілу насінин по довжині рядка досягається при куті конуса $\gamma=60^\circ$ та максимальному діаметрі $d_{\max}=(1,7-2,0) r_{\text{сєм}}$.

Найвищу рівномірність розподілу насінин по довжині рядка можливо досягти при тороїдальній поверхні присмоктувального отвору, зокрема, при мінімальному радіусі радіального перерізу тора.

математична модель, однозернове дозування, пневмомеханічний висівний апарат, присмоктувальний отвір, якість розподілу насінин

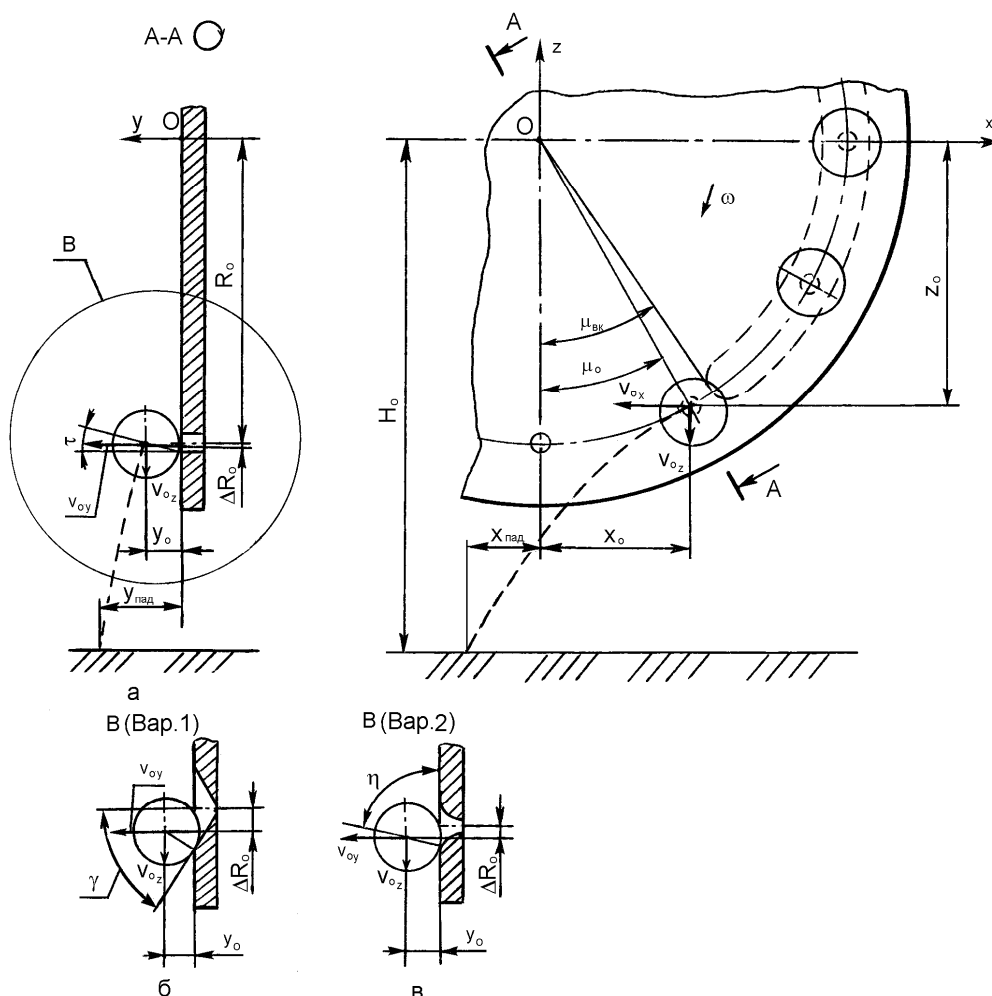
Постановка проблеми. Математичне моделювання стало невід'ємною складовою процесів дослідження, проектування, випробування сільськогосподарських машин та їх робочих органів. Якість роботи висівних апаратів просапних сівалок суттєво впливає на врожайність. Розроблені математичні моделі дозволяють визначити оптимальну форму, розміри та кінематичні параметри висівних апаратів та їх вплив на найважливіший показник якості роботи – рівномірність розподілу насінин по довжині рядка.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найкраще відпрацьовані алгоритми створення емпіричних математичних моделей на основі експериментальних даних, зокрема, методи планування експериментів [1; 2]. Важливу роль відіграють моделі для прогнозування врожайності на основі аналізу рівномірності розподілу насінин по довжині рядка [3]. Використання сучасних комп'ютерів та новітнього програмного забезпечення суттєво розширило можливості створення як емпіричних, так і теоретичних математичних моделей. Так, методи імітаційного моделювання дозволяють провести комп'ютерний експеримент, відтворюючи функціонування найскладнішої технічної системи, що значно прискорює процес досліджень та економить значні кошти.

Ряд математичних залежностей, які моделюють процеси, що відбуваються у висівних апаратах точної сівби, узагальнено в монографіях Волоха М.П. [4], Чичкина В.П. [5] та Кошурнікова А.Ф. [6].

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення впливу форми поверхні та геометричних параметрів присмоктувального отвору на рівномірність розподілу насінин по довжині рядка та визначення його раціональних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Модель імітує процес відокремлення насінин, розміри яких розподілені за нормальним усіченим законом [7] від поверхні присмоктувального отвору з циліндричною поверхнею (індекс $i=1$) (рис. 1, а), конічною поверхнею ($i=2$) (рис. 1, б) та тороїдальною поверхнею ($i=3$) (рис. 1, в).



а – від циліндричної поверхні; б – від конічної поверхні; в – від тороїдальної поверхні

Рисунок 1 – Схема процесу відокремлення насінини від присмоктувального отвору та падіння на дно борозни

Джерело: розроблено авторами

У програмі моделювання, створеній у системі MathCAD 2000 [8] для формування вектора радіусів насінин $r_{сем}$ використано функцію ***rnorm***, яка генерує N випадкових нормально розподілених чисел.

Основні математичні залежності, необхідні для створення математичної моделі, виведено у роботі [7].

Для кожного значення r_{sem} алгоритмом (укрупнена схема наведена на рис. 2) передбачено розрахунок таких величин:

- а) початкові кути при русі насінин по кожній з трьох форм поверхні ($\tau_o, \eta_o, \eta_{ок}$);
 б) кути, які показують положення насінин в момент відокремлення від поверхні ($\tau_{отд}, \eta_{отд}, \eta_{отд.к}$);

г) проекції швидкості насінин в момент відокремлення на осі координат (v_{ox} , v_{oy} , v_{oz});

д) координати центра мас насінини у системі координат $0xyz$, пов'язаній з центром висівного диска (x_{omd} , y_{omd} , z_{omd});

е) час падіння насінини на дно борозни;

ж) інтервал між сусідніми насінинами на дні борозни x_p .

У результаті статистичної обробки отриманого вектора x_p визначаються середнє вибіркве значення інтервалу між насінинами ($x_{гср}$, $x_{ксп}$, $x_{гсп}$) та середньоквадратичне відхилення інтервалів для присмоктувального отвору з гострою кромкою σ_g , конічної σ_k та тороїдальної σ_t поверхонь.

Укрупнена схема алгоритму математичного моделювання процесу відокремлення насінини від присмоктувального отвору та падіння на дно борозни представлена на рис. 2.



Рисунок 2 – Схема алгоритму математичного моделювання

Джерело: розроблено авторами

Моделювання процесу відокремлення кулеподібних насінин від різних по формі поверхонь присмоктувального отвору та падіння їх на дно борозни дозволяють провести імітацію висіву насінин, лінійні розміри яких розподілені за усеченим нормальним законом. Це необхідно для встановлення інтервалів між сусідніми насінинами на дні борозни та їх статистичних характеристик.

При проведенні математичного експерименту змінюється один із вхідних параметрів моделі і його значення фіксуються у робочому векторі, наприклад ω , а отримані у результаті моделювання значення σ_z , σ_k і σ_m – у трьох інших векторах. На основі цих векторів будуються графіки $\sigma_z=f_1(\omega)$, $\sigma_k=f_2(\omega)$ і $\sigma_m=f_3(\omega)$ у системі Mathcad. Аналогічно проводиться аналіз всіх необхідних залежностей.



Рисунок 2 (продовження) – Схема алгоритму математичного моделювання
Джерело: розроблено авторами

Найбільший інтерес викликає вплив середнього радіуса насінини, радіуса отвору, радіуса закруглення тороїдальної поверхні, кута конуса і максимального діаметра конічної поверхні на рівномірність розподілу насінин у рядку.

Розрахунки проведено при таких значеннях параметрів моделі:

радіус кола присмоктувальних отворів $R_0=0,06$ м;

кут закінчення вакуумної камери $\mu_{\text{вк}}=\pi/6$;

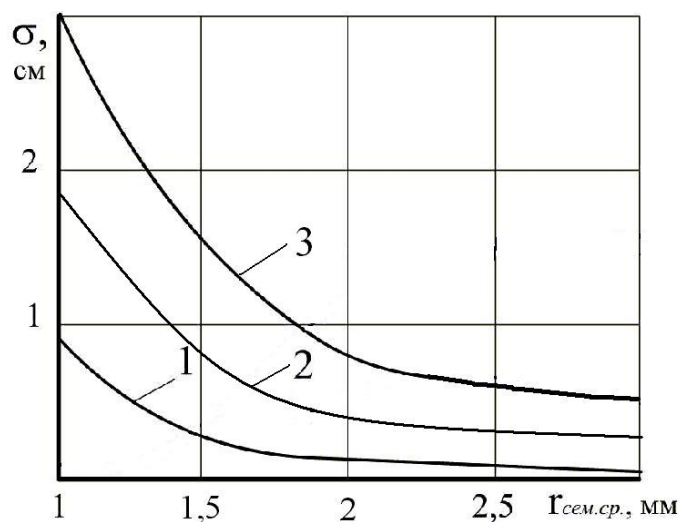
висота осі диска над дном борозни $H_0=0,2$ м;

кількість отворів висівного диска $z=22$;

швидкість руху сівалки $v_m=2$ м/с;

кількість інтервалів моделювання $N=500$.

Як видно з отриманих залежностей (рис. 3), збільшення радіуса насінин покращує якість їх розподілу.



1 – тороїдальна поверхня; 2 – циліндрична поверхня; 3 – конічна поверхня

Рисунок 3 – Вплив розміру насінин на рівномірність їх розподілу у рядку
($\omega=10$ с⁻¹; $r_{отв}=0,5$ мм; $d_{max}=2,8$ мм; $r_{\phi}=0,9$ мм; $K_{тр}=0,4$)

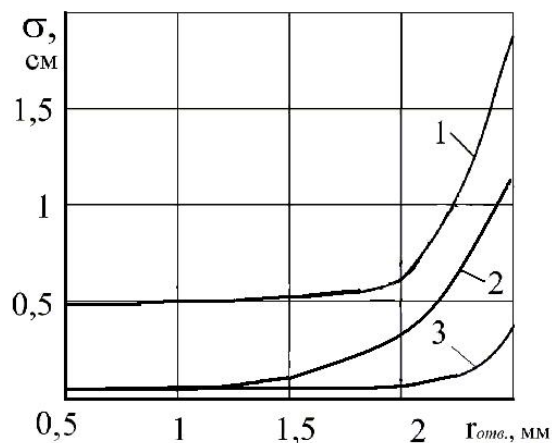
Джерело: розроблено авторами

Найкращі результати точності висіву спостерігаються для присмоктувальних отворів тороїдальної форми.

Для досліджених отворів усіх форм характерне суттєве зменшення впливу розміру отвору на точність висіву при $r_{сеп.ср.}>2$ мм.

Дослідженням впливу радіуса присмоктувального отвору встановлено, що зі збільшенням радіуса, рівномірність розподілу насінини спочатку (до $r_{отв}=1,5$ мм) практично не змінюється, а потім різко погіршується (рис. 4). Пояснити це можна тим, що збільшення отвору приводить до більш глибокого западання насінини в комірку дозуючого диска і що ускладнює процес їх відокремлення.

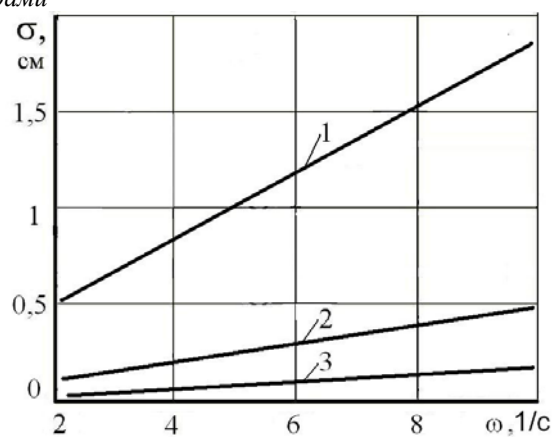
Збільшення кутової швидкості обертання висівного диска помітно погіршує рівномірність розподілу насінин (рис. 5).



1 – $r_{\text{сеп ср}}=6$ мм; $\sigma_{\text{г}}=1,2$ мм; 2 – $r_{\text{сеп ср}}=5$ мм; $\sigma_{\text{г}}=1$ мм; 3 – $r_{\text{сеп ср}}=7$ мм; $\sigma_{\text{г}}=1,4$ мм

Рисунок 4 – Вплив радіуса присмоктувального отвору на рівномірність розподілу насінин у рядку (циліндрична поверхня, $\omega=10$ с⁻¹)

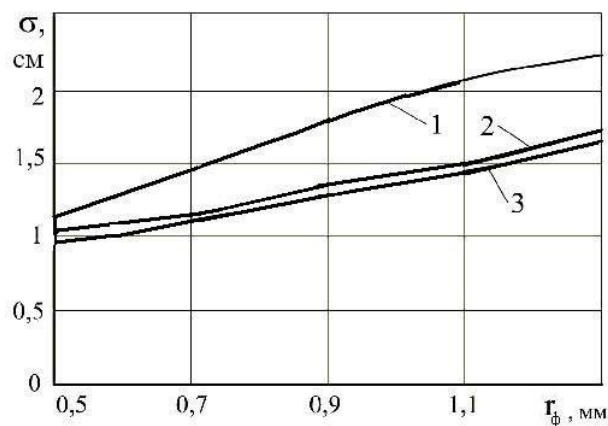
Джерело: розроблено авторами



1 – конічна поверхня; 2 – циліндрична поверхня; 3 – тороїдальна поверхня

Рисунок 5 – Вплив кутової швидкості обертання висівного диска на рівномірність розподілу насінин у рядку ($r_{\text{отв}} = 1$ мм; $r_{\text{сеп ср}} = 3$ мм; $d_{\text{тахк}} = 4$ мм; $\gamma=\pi/3$; $r_{\text{ф}} = 0,9$ мм; $k_{\text{тр}}=0,4$)

Джерело: розроблено авторами



1 – $k_{\text{тр}}=0,7$; 2 – $k_{\text{тр}}=0,4$; 3 – $k_{\text{тр}}=0,3$

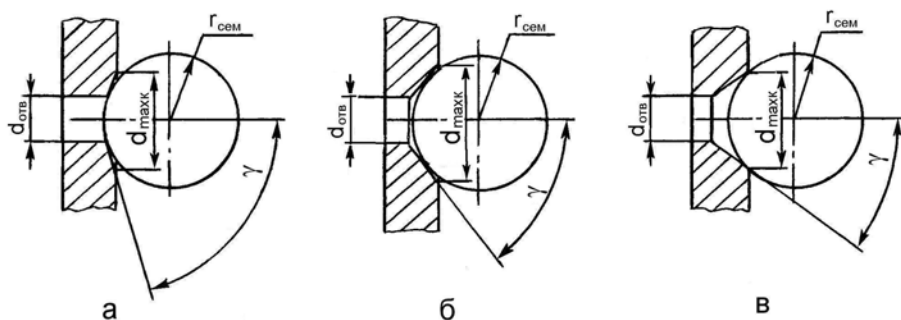
Рисунок 6 – Вплив радіуса закруглення тороїдальної поверхні в перерізі на рівномірність розподілу насінин ($\omega=10$ с⁻¹; $r_{\text{отв}} = 1$ мм; $r_{\text{сеп ср}} = 3$ мм)

Джерело: розроблено авторами

При відокремленні насінини від тороїдальної поверхні присмоктувального отвору збільшення його радіуса негативно впливає на якість розподілу насінин у рядку (рис. 6).

Радіус закруглення тороїдальної поверхні в перерізі (рис. 6) і коефіцієнт тертя між насінною та поверхнею отвору лінійно зменшують точність висіву (рис. 6). Тому для підвищення якості розподілу бажано закругляти гострі кромки присмоктувальних отворів і обробляти їх поверхню до необхідної чистоти.

При відокремленні насінини від конічної поверхні отвору можливі три варіанти розташування насінини на отворі у початковий момент у залежності від співвідношення розмірів отвору, насінини і кута конуса (рис. 7). При першому, якщо виконується співвідношення $r_{отв} > r_{сем} \cos \gamma$, де γ – кут конусності,



а– від внутрішньої кромки; б– від поверхні конуса; в– від зовнішньої кромки

Рисунок 7 – Схема відокремлення насінини від конічної поверхні отвору

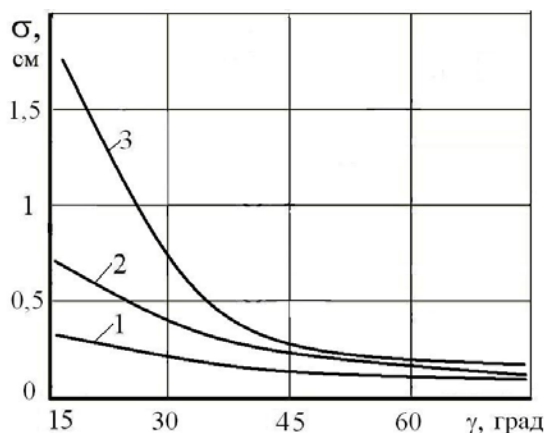
Джерело: розроблено авторами

то насінина торкається внутрішньої кромки конічної поверхні (рис. 7,а) і починає відокремлюватись від неї. При другому, коли виконується подвійна нерівність

$$r_{отв} \leq r_{сем} \cos \gamma < d_{наск}/2,$$

насінина починає рух по конічній поверхні (рис. 7,б). При третьому $d_{наск} \leq 2r_{сем} \cos \gamma$, – насінина відокремлюється від зовнішньої кромки конічної поверхні отвору (рис. 7,в), тобто процес аналогічний відокремленню від гострої кромки.

При третьому варіанті діаметр кола контакту між насінною і отвором дорівнює максимальному діаметру конусної поверхні $d_{наск}$, тому кут конуса мало впливає на рівномірність розподілу насінин (рис. 8).



1– $d_{наск} = 3$ мм; 2– $d_{наск} = 5$ мм; 3– $d_{наск} = 7$ мм

Рисунок 8 – Вплив кута конусної поверхні присмоктувального отвору на рівномірність розподілу насінин у рядку ($\omega = 10 \text{ c}^{-1}$; $r_{отв} = 1$ мм; $r_{сем\text{ ср}} = 3$ мм; $\sigma_r = 0,6$ мм)

Джерело: розроблено авторами

При більших значеннях $d_{maxk}=5-7$ мм рівномірність розподілу покращується зі збільшенням кута конуса і досягає оптимального значення при $\gamma=\pi/3$. Таким чином, можна рекомендувати при $r_{sem\ cr}=3$ мм виконувати конусну поверхню з $d_{maxk}=5$ мм та $\gamma=\pi/3$.

Висновки:

1. Створено математичну модель відокремлення насінин від циліндричної, конічної та тороїдальної поверхонь присмоктувальних отворів та падіння їх на дно борозни.

2. Рівномірність розподілу насінин по довжині рядка погіршується зі зменшенням середнього діаметра насінин та збільшення радіуса присмоктувального отвору.

3. При конічній поверхні присмоктувального отвору найвища рівномірність розподілу насінин по довжині рядка досягається при куті конуса $\gamma=60^\circ$ та максимальному діаметрі $d_{maxk}=(1,7-2,0) r_{sem}$.

4. При тороїдальній поверхні присмоктувального отвору найвищу рівномірність розподілу насінин по довжині рядка можливо отримати при мінімальному радіусі радіального перерізу тора.

Список літератури

1. Шварц А. А., Шварц С. А., Сейитджанов Д. Т. Формализация математической модели аппарата точного высева. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2012. Вып. 4. С.73–75. URL: <https://ur.booksc.org/book/36366073/5fbc74> (дата обращения: 06.10.2021)
2. Золотовская Е.В., Миронов А.С. Моделирование параметров высевающего аппарата овощной сеялки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2015. Вип. 45, ч.І. С.78-86.
3. Полонецкий С.Д. Статистическое моделирование урожайности по точности распределения семян. *Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства*. 1975. №5. С.52–54.
4. Волоха М. П. Технологічний комплекс машин для виробництва буряків цукрових: ширина міжрядь. Теорія, моделювання, результати випробувань : монографія. Київ : ТОВ «Центр учбової літератури», 2015. 220 с.
5. Чичкин В.П. Овощные сеялки и комбинированные агрегаты: теория, конструкция, расчет. Кишинев: Штиинца, 1984. 392 с. URL: <https://sejalki.ru/articles/elementi-teorii-protseessov-viseva-i-raspredelenie-semyan-seyalkami-tochnogo.html> (дата обращения: 12.10.2021)
6. Кошурников, А.Ф. Пунктирный посев пропашных культур и формирование густоты насаждений : монография. Пермь : ИПЦ «Прокрость», 2015. 218 с.
7. Амосов В.В. Аналіз процесу відокремлення насінин від присмоктувальних отворів вакуумного пневмомеханічного висівного апарата. *Техніка в с.-г. виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2004. Вип. 15. С.438–444.
8. Херхагер М., Партоль Х. Mathcad 2000: полное руководство : пер. с нем. Киев : Издат. группа BHV, 2000. 416 с.

References

1. Shvarts, A.A., Shvarts, S.A. & Seyitdzhanov, D.T. (2012). Formalizatsiya matematicheskoy modeli apparata tochnogo vyseva. [Formalization of the mathematical model of the precision seeding apparatus.] *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii – Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, Vol. 4, 73-75. Retrieved from <https://ur.booksc.org/book/36366073/5fbc74> [in Russian]
2. Zolotovskaya, Ye.V. & Mironov, A.S. (2015). Modelirovaniye parametrov vysevayushchego apparata ovoshchnoy seyalki. [Modeling the parameters of the seeding unit of a vegetable seeder.] *Konstruiuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil'skohospodars'kix mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, Vol. 45, 1, 78-86 [in Russian].
3. Polonetskiy, S.D. (1975). Statisticheskoye modelirovaniye urozhaynosti po tochnosti raspredeleniya semyan. [Statistical modeling of yield based on the accuracy of seed distribution]. *Mekhanizatsiya i*

- elektrifikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaystva – Mechanization and electrification of socialist agriculture, 5, 52–54 [in Russian].
4. Volokha, M.P. (2015). *Tekhnolohichnyy kompleks mashyn dlya vyrobnytstva buryakiv tsukrovykh: shyryna mizhryad'. Teoriya, modelyuvannya, rezul'taty vyprobuvan'* [Technological complex of machines for the production of sugar beets: row spacing. Theory, modeling, test results]. Kyiv : TOV «Tsentr uchbovoyi literatury» [in Ukrainian].
 5. Chichkin, V.P. (1984). *Ovoshchnyye seyalki i kombinirovannyye agregaty: teoriya, konstruktsiya, raschet* [Vegetable seeders and combined units: theory, design, calculation]. Kishinev: Shtiintsa, Retrieved from <https://sejalki.ru/articles/elementi-teorii-protsesov-viseva-i-raspredelenie-semyan-seyalkami-tochnogo.html> [in Russian].
 6. Koshurnikov, A.F. (2015). *Punktirnyy posev propashnykh kul'tur i formirovaniye gustoty nasazhdeniy : monografiya* [Dotted sowing of row crops and the formation of plantation density]. Perm : IPTS «Prokrost» [in Russian].
 7. Amosov, V.V. (2004). Analiz protsesu vidokremlennya nasynyn vid prysmoktuval'nykh otvoriv vakuumnoho pnevmomekhanichnoho vysivnoho aparata. [Analysis of the process of separating seeds from the suction holes of the vacuum pneumomechanical sowing machine]. *Tekhnika v s.-h. vyrobnytstvi, haluzeve mashynobudivannya, avtomatyzatsiya: Zb. nauk. pr. Kirovohrad. nats. tekhn. un-tu – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation: Coll. Works of Kirovohrad State Technical University, Vol. 15*, 438–444 [in Ukrainian].
 8. Kherkhager, M. & Partol', K.H. (2000). *Matthcad 2000: a complete guide*. (Ed.). Kiyev : Izdat. gruppa BHV [in Russian].

Mykhailo Chernovol, Prof., Academician of the NAAS of Ukraine, DSci., **Mykola Sviren**, Prof., DSci., **Volodymyr Amosov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Simulation of the Process of Single-grain Dosing by a Vacuum Pneumatic Mechanical Sowing Device

The aim of this work is to determine the influence of the surface shape and geometric parameters of the suction hole on the uniformity of seed distribution along the length of the row and determine its rational parameters.

The use of mathematical modeling significantly speeds up the research process. An algorithm and a program in the Mathcad system have been developed for simulating the process of separating seeds from the cylindrical, conical and toroidal surfaces of the suction holes of a vacuum pneumomechanical sowing device and their fall to the bottom of the furrow. The algorithm is based on the results of previous studies by the authors. Its initial data is the simulation with the help of a generator of random numbers of spherical seed sizes, which are distributed according to the truncated normal law. Each seed undergoes a process of separation from the surface of the suction hole and free fall to the bottom of the furrow. Computer experiments are repeated, changing the average seed diameters, surface type and geometric parameters of the suction hole surface. As a result of statistical processing of the obtained vector of intervals between adjacent seeds at the bottom of the furrow, the mean sample value of the interval between seeds and the standard deviation of the intervals are determined. The last indicator is chosen by the criterion of uniformity of distribution of seeds on length of a line. Graphs of dependence of this indicator on the investigated parameters are constructed.

As a result of the analysis of graphs it was found that the uniformity of seed distribution along the length of the row deteriorates with decreasing average seed diameter and increasing the radius of the suction hole. With a conical surface of the suction hole, the highest uniformity of seed distribution along the row length is achieved at a cone angle $\gamma = 60^\circ$ and a maximum diameter $d_{max} = (1,7-2,0) r_{sem}$. The highest uniformity of seed distribution along the length of the row can be achieved with a toroidal surface of the suction hole, in particular, with a minimum radius of the radial section of the torus.

mathematical model, single-grain dosing, pneumatic mechanical sowing device, suction hole, quality of seed distribution

Одержано (Received) 06.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 18.10.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.432

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.126-132>**А.В. Рутковський**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: coating@ipp.kiev.ua***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: marko60@ukr.net; sergejmihajluta2@gmail.com*

Фрактографічний аналіз іонноазотованих зразків з алюмінієвих поршнів двигунів сільськогосподарської техніки

В роботі проведено фрактографічний аналіз іонноазотованих зразків з алюмінієвих поршнів двигунів сільськогосподарської техніки з використанням методу растрової електронної мікроскопії на мікроскопі мікро аналізаторі “CamScan-4DV”. Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, недосконалостей і включень проводилось в даній роботі з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА). Установлено, що механізм кінетики процесу руйнування зводиться до поступового росту мікротріщин до критичного розміру в результаті розриву атомних зв'язків у вершині тріщини при напруженнях, що перевищують умовну межу текучості композиції «основа-покриття». Спостерігається зародження та ріст однакових за видом тріщин. Потім тріщини все більше розкриваються і довжина та глибина їх збільшується. Показано, що механізм процесу руйнування зводиться до поступового росту мікротріщин в результаті розриву атомних зв'язків у вершині тріщини при напруженнях, що перевищують умовну межу текучості композиції “основа-покриття”. Установлено наявність ділянок основи, які внаслідок порушення суцільності зміцненого поверхневого шару взаємодіють з оточуючим середовищем та впливають на підвищення пластичності за рахунок розкриття дефектів. Це збільшує швидкість повзучості, що у свою чергу, приводить до прогресуючого процесу руйнування при одночасній дії експлуатаційних факторів.

фрактографічний аналіз, іонноазотовані зразки, алюмінієві поршні, кінетика руйнування

Постановка проблеми. Однією з особливостей експлуатації двигунів сільськогосподарської техніки в умовах інтенсифікації землеробства є необхідність зростання експлуатаційних параметрів, що викликає неухильне підвищення робочої температури конструктивних елементів. [1,2]. Особливо це актуально для поршнів з алюмінієвих сплавів, що мають низьку теплостійкість. Одним з прогресивних методів підвищення їх теплової стійкості є іонне азотування (іонно-плазмове азотування) [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій щодо застосування методу іонноплазмового азотування свідчить про те, що постійно відбувається пошук шляхів його удосконалення.

Автори робіт [3,4] пропонують вести процес дифузійного насичення азотом у плазмі пульсуючого струму, що забезпечує недопущення переходу тліючого розряду у дуговий (через малу тривалість імпульсів великої напруги) з одночасним збільшенням швидкості процесу.

У роботі [5] показано застосування комбінованого пульсуючого режиму насичення азотом та вуглецем при циклічному нагріванні та охолодженні садки, що призводить до ефекту прискорення дифузійних процесів. Розроблено математичну модель та методику для теоретичного опису кінетики процесу дифузійного насичення металів в режимі хіміко - термоциклічної обробки за оцінкою енергетичних характеристик (енергії активації та активаційного об'єму) процесу. Показано [6], що застосування термічних циклів при азотуванні, наприклад, титану обумовлює підвищення його міцності при задовільній пластичності.

Автори [7] вказують на переваги газотермоциклічного методу регулювання процесу азотування. Технологія обробки при цьому полягає у періодичному чередуванні циклів насичення при проточному азотуванні та розсіювання азотованого шару при максимально можливому зниженні насичуючої здатності атмосфери. Додаткова інтенсифікація процесу відбувається за рахунок його двостадійності - насичення та розсіювання газу проходить при різних температурах.

Широке впровадження цієї прогресивної технології стримується відсутністю систематичних досліджень, що дозволяють оптимізувати режими формування іонноазотованих шарів за критеріями міцності, які враховують теплостійкість [8, 9].

Таким чином, основною причиною, яка перешкоджає вирішенню задач докорінного удосконалення автотракторних двигунів внутрішнього згорання на базі застосування зміцнювальних іонноазотованих шарів є те, що, не зважаючи на накопичений досвід, загальну позитивну оцінку та доцільність застосування у виробництві та ремонтній практиці, технологія вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми має ряд невирішених проблем, недостатня вивченість яких ускладнює розробку науково-обґрунтованих принципів її реалізації [10]. Це обумовлює необхідність цілеспрямованого продовження дослідження механізму процесу руйнування теплозахисного іонноазотованого покриття при термічному впливі

Постановка завдання. Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення поршнів, що виготовлені із алюмінієвих сплавів необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і їх вплив на властивості дифузійних іонноазотованих шарів.

Для більш детального вивчення кінетики та механізму руйнування, впливу оточуючого середовища та навантаження на опір зразків з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами необхідно провести ряд додаткових фрактографічних досліджень.

Наявність цієї інформації дозволить підвищити міцність і надійність як самих покриттів, так і деталей з покриттями на стадії їхнього конструювання.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили з застосуванням зразків з алюмінієвого сплаву AL21 із теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами ізотермічній та термоциклічній повзучості проводились.

Фрактографічні дослідження в даній роботі проводилися з використанням методу растрової електронної мікроскопії на мікроскопі мікро аналізаторі "SamScan-4DV" основне призначення якого полягає у відтворенні за допомогою електронно-променевої трубки тримірною зображення поверхні зразка за загально прийнятою методикою [11]. При цьому можливе дослідження мікро топографії грубих поверхонь та масивних зразків, що не є можливим у випадку традиційних методів світової й трансмісійної електронної мікроскопії. Дослідження зображення при задовільних умовах фотографування може досягати 5...6 нм, а значна глибина фокусу, що виникає внаслідок малого кута розходження електронного пучка (~10 мрад), більше ніж в 300

разів перевищує глибину фокусу в світовому мікроскопі, що працює в аналогічних умовах.

При взаємодії електронного пучка із зразком виникають вторинні електрони малої енергії (ті, що генеруються в зразку пучком), а також високоенергетичні відбиті електрони (первинні електрони, що відбилися від поверхні зразка). Детектування низькоенергетичних вторинних електронів здійснюється скінтілятором із накладанням потенціалу 12 кВ. Сигнал від електронів даного виду дозволяє фіксувати зображення ділянок поверхонь.

У випадку роздільного детектування сигналів від зворотно розсіяних електронів, які в даному приборі здійснюються за допомогою твердотілого чотирьохполюсного детектора, можливе отримання додаткової інформації. Тобто, так як відношення зворотного розсіювання відбитих електронів до падаючих зростає із зростанням атомного номеру матеріалу зразка або його ділянки, даний режим зображення широко використовується у випадку контраста, що зумовлений різницею в атомних номерах аналізованих елементів чи середнього ефективного номеру у випадку багатоеlementних зразків. Ця методика дозволяє також детектувати поверхневе забруднення на зразках.

Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, недосконалостей і включень проводилось в даній роботі з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА), фізична сутність якого полягає в генерації рентгенівського випромінювання при попаданні первинного електронного пучка на поверхню зразка, що досліджується.

Рентгенівський спектр, що випромінюється, складається із спектру нерозривного рентгенівського випромінювання, який включає рентгенівські промені всіх значень енергії, аж до енергії пучка, що падає, і із ліній характеристичного рентгенівського випромінювання (відомих як ряд ліній К- і М-серій), за допомогою яких можна однозначно ідентифікувати хімічний склад зразка. Детектування і аналіз рентгенівських променів, що випромінюються зразком під дією електронного пучка, в даній роботі проводились за допомогою дисперсного енергетичного спектрометра LZ-5 з обробкою отриманих результатів, включаючи кількісний аналіз із врахуванням всіх поправок, в мінікомп'ютерній системі "LINK-860".

Методика кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу 2AP-4, що використовується в роботі, базується на використанні еталонів відомого складу. При проведенні кількісного мікроаналізу визначається величина відношення інтенсивностей рентгенівського випромінювання елементу, що досліджується, в зразку і в еталоні. Дослідження інтенсивності рентгенівського випромінювання, як в зразку, так і в еталоні проводяться в однакових експериментальних умовах: прискорюване напруження - 20 кВ; струм пучка - $1 \dots 2 \cdot 10^{-10}$ А; кут нахилу площини зразка до детектору – 100. Крім цього, для отримання даних кількісного мікроаналізу необхідно додатково вводити в розрахунок три поправки: 1) поправка на різницю в розсіюванні і гальмуванні електронів у зразку і в еталоні, тобто поправка на атомний номер елементу; 2) поправка на поглинання генеруючого рентгенівського випромінювання зразком; 3) поправка на ефект флуоресценції через безупинне рентгенівське випромінювання.

Проте, у ряді випадків стандартна програма автоматичного розрахунку концентрацій дає великі похибки. Це пов'язано із взаємним впливом профілей характеристичних ліній елементів. В цьому випадку найбільш достовірні результати розрахунку вмісту елементів можуть бути отримані за допомогою підпрограми ручного розрахунку концентрацій. Ця підпрограма оперує не реальними профілями піків елементів, а їх площами. При цьому діапазони енергій "вікон" встановлюються

довільно, що дозволяє уникнути взаємний вплив ліній і підвищити точність аналізування.

Використання програми “Linescane”, яка передбачає розбиття ліній і сканування на 128 точок із послідуочим кількісним хімічним аналізом, дозволяє реєструвати і обробляти рентгенівське випромінювання зразка, що досліджується. За допомогою цієї програми можна зафіксувати характерні діапазони енергій, керувати розгорткою растрового електронного мікроскопу і збирати інформацію про відносний вміст елементів вздовж визначеної лінії із послідуочною обробкою і роздрукуванням результатів дослідження.

Установлено, що механізм кінетики процесу руйнування зводиться до поступового росту мікротріщин до критичного розміру в результаті розриву атомних зв'язків у вершині тріщини при напруженнях, що перевищують умовну межу текучості композиції «основа-покриття». Спостерігається зародження та ріст однакових за видом тріщин. Потім тріщини все більше розкриваються і довжина та глибина їх збільшується. Дослідження показують, що на поверхні без зміцнення тріщини утворюються після прикладення навантаження на різного роду дефектах: включеннях, подряпинах, неоднорідностях і т.п. Наявність зміцненого поверхневого шару знижує інтенсивність зростання тріщин (рис. 1).

Установлено наявність ділянок основи, які внаслідок порушення суцільності покриття взаємодіють з оточуючим середовищем та впливають на підвищення пластичності за рахунок розкриття дефектів. Початок інтенсивного місцевого окислювання основи в області дефекту покриття приводить до скорочення поперечного перерізу і росту діючого напруження. Наслідком цього є збільшення швидкості повзучості, що у свою чергу, приводить до розвитку початкового дефекту і до прогресуючого процесу руйнування при неадитивній дії експлуатаційних факторів (рис. 2). Виявлено, що дефекти основи руйнують покриття. Крім того, виявлено, що деформація зразка здійснюється за рахунок процесів зсуву. Підтвердженням цього є характерні лінії Чернова-Людерса (рис. 3, 4 та 5, за варіантами плану експерименту).

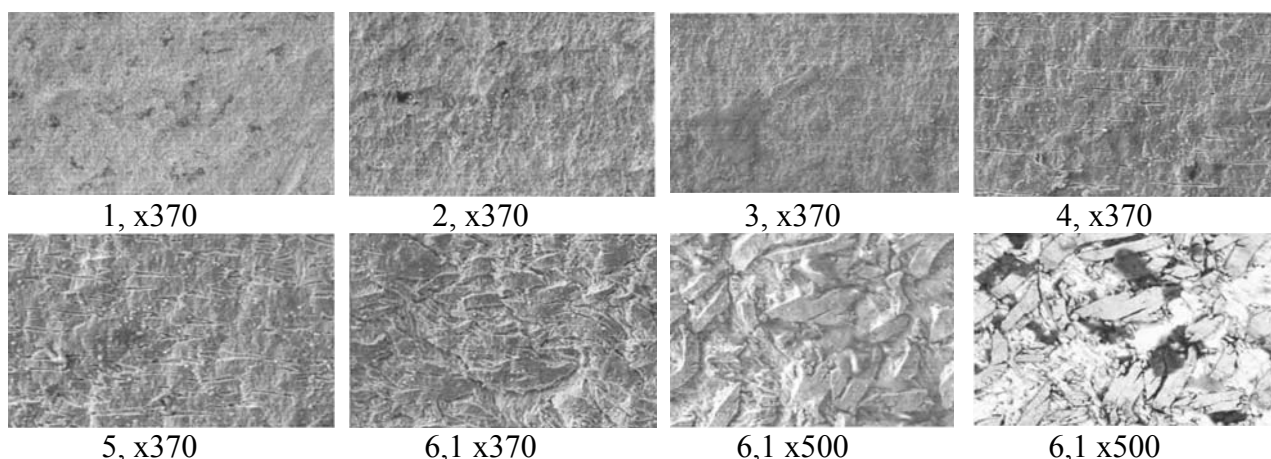


Рисунок 1 – Кінетика руйнування: 1 - ділянка сталої повзучості; 2 - перехід від сталої до прискореної повзучості; 3, 4, 5, 6.1 - ділянка прискореної повзучості; 6.2 - топограма зруйнованої поверхні; 6.3 - фазовий контраст зруйнованої поверхні

Джерело: розроблено авторами

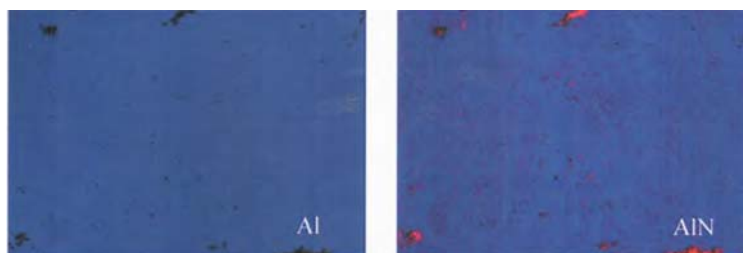
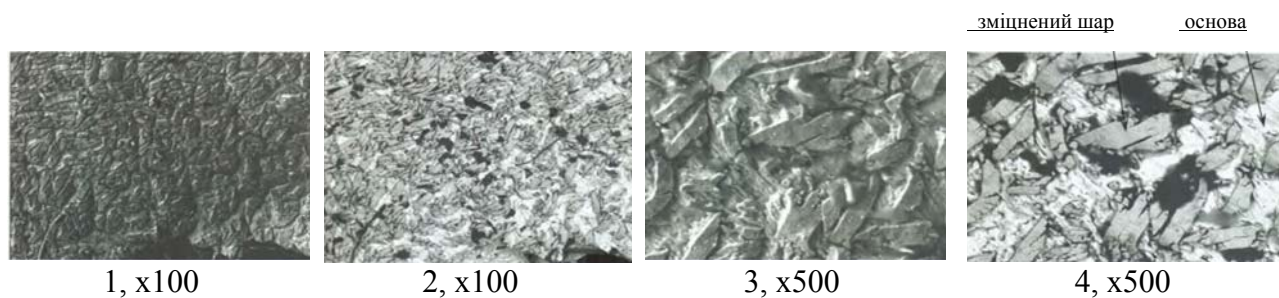
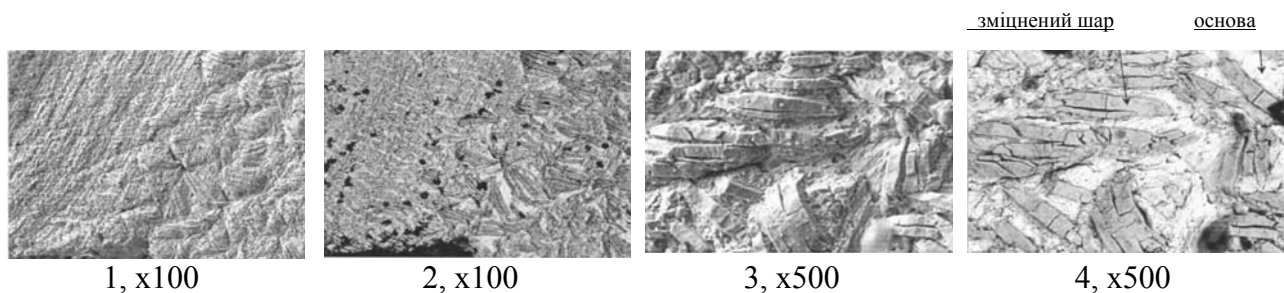
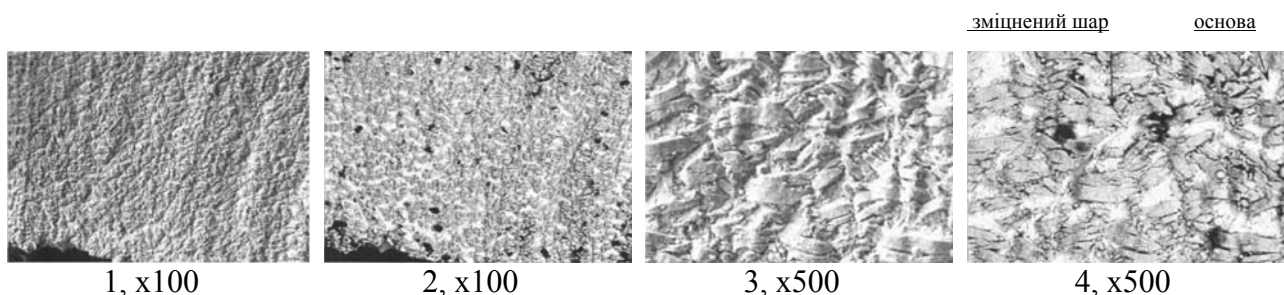


Рисунок 2 – Розподіл хімічних елементів по зруйнованій поверхні, х 300

Джерело: розроблено авторамиРисунок 3 – Топограма поверхні зразка: 1, 3 - загальний вигляд зруйнованої зміцненої поверхні;
2, 4 - фазовий контраст зруйнованої зміцненої поверхні*Джерело: розроблено авторами*Рисунок 4 – Топограма поверхні зразка: 1, 3 - загальний вигляд зруйнованої зміцненої поверхні;
2, 4 - фазовий контраст зруйнованої зміцненої поверхні*Джерело: розроблено авторами*Рисунок 5 – Топограма поверхні зразка: 1, 3 - загальний вигляд зруйнованої поверхні покриття;
2, 4 - фазовий контраст зруйнованої поверхні покриття*Джерело: розроблено авторами*

Висновки. Показано, що механізм процесу руйнування зводиться до поступового росту мікротріщин в результаті розриву атомних зв'язків у вершині тріщини при напруженнях, що перевищують умовну межу текучості композиції “основа-покриття”. Установлено наявність ділянок основи, які внаслідок порушення суцільності зміцненого поверхневого шару взаємодіють з оточуючим середовищем та

впливають на підвищення пластичності за рахунок розкриття дефектів. Це збільшує швидкість повзучості, що у свою чергу, приводить до прогресуючого процесу руйнування при одночасній дії експлуатаційних факторів.

Список літератури

1. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. О достоинствах технологии вакуумного. *Оборудование и инструмент*. 2005. №12. С. 45-47.
2. Ляшенко Б.А., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Розробка технологічного процесу вакуумного азотування поршнів двигунів в пульсуючому пучку плазми. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб.* Вип. 47, ч. 1. 2017. С. 158-166.
3. Afonso A., Ferran G., Chi F. Development of fiber reinforced aluminium alloy for diesel piston application. *SAE Techn. Pap. Ser.*1991. №910632. P. 1-9.
4. Aluminium alloy composite material with intermetallic compound finely dispersed in matrix among reinforcing elements: Пат. 5449421 США: МКИ C22C21/00. Оpubл. 12.09.95.
5. Murakami Shoji. Plasma jet sprayed alumina coating on automobile piston. *SAE Techn. Pap. Ser.* 1987. №870158. P. 179-184.
6. Surface hardened aluminium part and method of producing same: Пат. 5352538 США: МКИ B22P7/04. Оpubл. 04.10.94
7. Кровяков К.С., Радченко М.В. Упрочнение кольцевых канавок поршня дизеля электронно-лучевой обработкой. *Техн. машиностр.* 2000. №3. С. 23-25.
8. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Внуков Ю.Н. и др. К.: Техника, 1992. 143 с.
9. Рутковский А.В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Дослідження іонноазотованих алюмінієвих сплавів на ізотермічну та термоциклічну повзучість. *Підвищення надійності машин і обладнання: зб. матеріалів конф. Міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 квітня 2020 р. Кропивницький: ЦНТУ.* 2020. Вип. 2. С. 45-50.
10. Jom Larsen-Basse. Surface engineering and the new millennium. *Surface Engineering.* 1998. Vol. 14. №2. P. 81 -83.
11. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Зчлин И. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 552 с.

Referencis

1. Ljashenko, B.A. & Rutkovskij, A.V. (2005). O dostoinstvah tehnologii vakuumnogo. *Oborudovanie i instrument*, 12, 45-47 [in Russian].
2. Liashenko, B.A., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2017). Rozrobka tekhnologichnoho protsesu vakuumnoho azotuvannia porshniv dvyhunyiv v pul'suiuchomu puchku plazmy. *Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj naukovy-tekhnichnyj zbirnyk. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn, Vol. 47, ch. 1*, 158-166 [in Ukrainian].
3. Afonso, A., Ferran, G. & Chi, F. (1991). Development of fiber reinforced aluminium alloy for diesel piston application. *SAE Techn. Pap. Ser.* №910632. p.1-9.
4. Aluminium alloy composite material with intermetallic compound finely dispersed in matrix among reinforcing elements. pat. 5449421 USA, MKI C22C21/00. Opubl. 12.09.95.
5. Murakami Shoji. (1987). Plasma jet sprayed alumina coating on automobile piston. *SAE Techn. Pap. Ser.*, №870158, p. 179-184.
6. Surface hardened aluminium part and method of producing same. Pat. 5352538 USA, MKI B22P7/04. Opubl. 04.10.94
7. Krovjakov, K.S. & Radchenko, M.V. (2000). Uprochnenie kol'cevykh kanavok porshnja dizelja zlektronno-luchevoj obrabotkoj. *Tehn. mashinostr.*, 3, 23-25. [in Russian].
8. Vnukov, Ju.N., Markov, A.A., Lavrova, L.V. et al. (1992). Nanesenie iznosostojkikh pokritij na bystrozeshushchij instrument. Kyiv: Tehnika [in Russian].
9. Rutkovsk'kyj, A.V., Markovych, S.I., Mykhajliuta, S.S. (2020). Doslidzhennia ionnoazotovanykh aliuminiievych splaviv na izotermichnu ta termotsyklichnu povzuchist'. *Pidvyshchennia nadijnosti mashyn i obladnannia: zb. materialiv konf. Mizhnarodna naukovy-praktychna konferentsiia (15-17 kvitnia 2020 r)*. Kropyvnyts'kyj: TsNTU, Vol. 2. S. 45-50.

10. Jom Larsen-Basse (1998). Surface engineering and the new millennium. *Surface Engineering, Vol. 14, 2*, p. 81 -83.
11. Gouldstejn Dzh., N'juberi D. & Zchlin I. (1984). Rastrovaja zlektronnaja mikroskopija i rentgenovskij mikroanaliz. (Trans.) Moskow: Mir [in Russian].

Anatoly Rutkovskiy, Senior Researcher, PhD tech. sci.

National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Myhajlyta**, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Fraktografichnyi Analysis of the Ion Nitrided Standards From the Aluminium Pistons of Engines of Agroindustrial Technique

For a more detailed study of kinetics and the mechanism of destruction, the influence of the environment and the load on the resistance of the samples with heat-protecting diffusion ion-accounted layers, a number of additional fractographic studies should be carried out. The presence of this information will increase the strength and reliability of both coatings and coatings in the stage of their design.

In the work, a fractographic analysis of ionic nitrogen samples from aluminum pistons of agro-industrial machinery engines using a method of raster electron microscopy on a microscope Micro analyzer "Samssn-4DV" was performed. Determination of the chemical composition of the surface of the samples, as well as various phases, imperfections and inclusions was carried out in this paper using the X-ray spectral microanalysis method (RSMA). It has been established that the mechanism of kinetics of the process of destruction is reduced to the gradual growth of microcracks to a critical size as a result of the rupture of atomic bonds in the vertex of the crack with stresses, which exceeds the conditional limit of the content of the "base-coating" composition. There is an emergence and growth of the same types of cracks. Then the cracks are increasingly revealed and the length and depth increases. The intensive local oxidation of the base in the area of the coating defect leads to a reduction in the cross-section and the growth of acting stress. The consequence of this is an increase in the creep speed, which in turn leads to the development of the initial defect and to the progressive process of destruction in non-additive operating factors. It has been found that the bases defects are destroying the coating. In addition, it has been found that the deformation of the sample is carried out at the expense of the displacement processes. Confirmation of this is the characteristic lines of Chernova-Leuders.

Conclusions. It has been shown that the mechanism of destruction process is reduced to the gradual growth of microcracks as a result of the rupture of atomic bonds in the vertex of the crack at strains, which exceeds the conditional line of fluidity of the "base-coating" composition. The presence of areas of the base is established, which as a result of a violation of the strength of the strengthened surface layer interact with the environment and affect the increase of plasticity due to the disclosure of defects. This increases the creep speed, which in turn leads to the progressive process of destruction in the simultaneous operation of operational factors.

fractographic analysis, ion-nitrided samples, aluminum pistons, fracture kinetics

Одержано (Received) 12.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 23.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 621.57

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.133-140>**В.Я. Ошовський**, доц., канд. техн. наук*Первомайська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала**Макарова, м. Первомайськ, Україна**e-mail: oshovskyikt@ukr.net*

Аналіз неізотермічних процесів в дегазаторах ресорбційних холодильних машин

Розроблено методику аналізу залежності температури киплячого розчину в дегазаторі від отриманого тепла. На прикладі аналізу кипіння в дегазаторі водоаміачного розчину при різних його вихідних параметрах побудовано графіки залежностей і показано, що на їх характер суттєво впливає початкова концентрація розчину. Запропоновано при проектуванні ресорбційних машин використовувати дану методику аналізу вибирати початкову концентрацію розчину для наближення до еквідистантності змін температури розчину і охолоджуваної речовини з метою зменшення енергетичних втрат.

дегазатор, ресорбційні холодильні машини, інтервал концентрацій, розчин, приведена ентальпія

Постановка проблеми. Процеси охолодження потоків рідких і газоподібних речовин широко використовуються як в різних галузях промисловості, в сільському господарстві, а також в установках глибокого охолодження для отримання кисню, в теплових насосах для економічного теплопостачання з природних та інших альтернативних джерел та для кондиціонування повітря.

Доведено, що для таких процесів високу термодинамічну ефективність мають цикли в яких температури робочого тіла і охолоджуваного потоку еквідистантні [1].

Одним з видів холодильних машин, в яких охолоджує робоче тіло має змінну температуру при поглинанні тепла є ресорбційні холодильні машини (РХМ) та теплові насоси, які працюють на розчинах агентів в абсорбентах [2, 3, 4, 5]. Їх особливістю є можливість зменшити ступінь стискання пари та близько до еквідистантного характеру копіювати температуру охолоджуваного потоку, що при охолодженні рідин і газів могло б значно підвищити термодинамічну ефективність цих процесів.

Але характер неізотермічності процесів дегазації розчинів в апаратах ще недостатньо досліджений для впровадження РХМ. Без розрахунків, аналізу і побудови графіків залежності температури розчину від переданої теплоти та корегування температурного напору по довжині теплообмінних апаратів неможливо практично здійснити роботу РХМ за заданими вихідними параметрами охолодження. Зміни температури киплячого розчину характеризується не тільки зміною його кількості, а й зміною теплових властивостей з-за зменшення концентрації по агенту. Це ускладнює задачу розрахунку РХМ, тому що призначеному при розрахунку температурному напору на кінцях дегазатора може не відповідати напір в середній його частині і навіть бути від'ємним, що призведе практично до неможливості потрібного теплообміну.

Тому розробка методів розрахунку і аналізу неізотермічних процесів розчину в дегазаторах є актуальними для проектування РХМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежно від конструкції дегазатора склад пари яка відводиться з нього може бути від близького до рівноважного вхідному міцному розчину до рівноважного слабкому розчину на виході з дегазатора [7, 8].

Бліер Б.М. і Вургафт А.В. за способами відгону пари випарні апарати абсорбційних машин підрозділяють на три типи: несуміщений, суміщений і напівсуміщений [9]. Але ці апарати, подібні до дегазаторів, працюють не для охолодження, а для генерації пари з розчину при тиску конденсації і температурах значно вище навколишнього середовища в абсорбційно-генераторному контурі термічного компресора.

Розрахунок процесів тепломасообміну в одноірних потоках розчину і пари можна здійснювати за геометричним співвідношення відрізків (конод), які з'єднують стан розчину і пари у процесах циклу побудованому в ξ, i - діаграмі розчину [7, 9].

Прогнозується перспективність використання ресорбційних машин в рішеннях проблем енергозбереження [10, 11], але відзначаються труднощі їх розрахунку і реалізації з-за недостатності досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методики розрахунків та аналіз характеру неізотермічного процесу кипіння розчину в протитоківих дегазаторах ресорбційних холодильних машин при різних варіантах концентрацій розчину і температурах відбору пари для можливості вирівнювання температурного напору між охолоджуючим киплячим розчином і охолоджуваним потоком рідини або газу.

Виклад основного матеріалу. Температурний напір між потоками в дегазаторі залежить в основному від характеру зміни температури розчину, який кипить в дегазаторі при сприйманні теплоти. При необгрунтовано вибраних тиску дегазації, від якого залежить інтервал концентрацій розчину, та температурних напорів на кінцях протитоківого дегазатора розрахунковий температурний напір в середній частині дегазатора між потоками може бути як додатною величиною, що сприяє передачі теплоти від охолоджуваного потоку до киплячого розчину, так і від'ємною, що унеможливить роботу дегазатора та РХМ в заданому режимі.

Таким чином виникає необхідність розрахунку і побудови залежності різниці температур від теплоти, яка передається між потоками в протитоківому дегазаторі $\Delta T = f(Q)$, щоб не було зменшення температурного напору в перерізах теплообмінника менше прийнятого допустимого. Температурний напір між потоками залежить в основному від масової витрати і властивостей розчину, які змінюються по довжині дегазатора, а також від незначних змін властивостей охолоджуваної речовини.

Для однорідного охолоджуваного потоку залежність переданого тепла від температури $Q = f(T)$ більш прямолінійна. Для охолоджуючого потоку киплячої парорідинної суміші у зв'язку зі зміною співвідношення мас, складу і властивостей рідкої і парової фази залежність $Q_0 = f(T)$ не прямолінійна. Тому основний вплив на температурний напір ΔT по довжині дегазатора має залежність $Q_0 = f(T)$ для киплячого розчину. Після вибору тиску дегазації і температурного напору на кінцях дегазатора необхідно обов'язково будувати графіки залежності температур потоків киплячого розчину і охолоджуваної речовини в залежності від переданого тепла. Потім за значеннями $\Delta T = f(Q)$ корегувати початкову концентрацію киплячого розчину вибором тиску дегазації при заданій нижчій температурі цього розчину таким чином, щоб в інтервалі температур кипіння і концентрацій розчину ΔT не було менше допустимого.

В дегазаторі охолоджувальний ефект дає розчин і він завжди повинен рухатися протитоком до охолоджуваного потоку. Пара не має особливого впливу на процес охолодження і може рухатися як протитоком до охолоджуваної рідини, так і прямою, залежно від перетину дегазатора для її відбору в компресор.

Проаналізуємо залежності $Q_0 = f(T)$ для двох варіантів дегазаторів: з відбором пари з холодного та з відбором пари з теплового перетинів дегазатора.

В дегазаторі з відбором пари з холодного перетину (рис. 1, а) течія розчину протитокова, а пари прямоотокова відносно до потоку охолоджуваної речовини. Течія пари і розчину одномірна, тому в різних перетинах N дегазатора сумарний потік пари і розчину незмінний за правилом суцільності сумарного потоку. Розчин при кипінні тече від перетину I до перетину II . Його температура при цьому підвищується від нижчої T_1 до вищої T_2 , а кількість зменшується від M_1 до M_2 . Пара рухається над поверхнею розчину від перетину II до перетину I , її кількість збільшується від $M_2=0$ до M_1 . В процесі теплообміну тиск суміші пари і розчину $P_0 = \text{const}$. Тепло передається від потоку речовини до розчину, що рухається протитоком.

Припустимо теоретично, що у всіх перетинах дегазатора, перпендикулярних напрямку руху потоків, пара рівноважна з розчином. В розрахунках реальних процесів необхідно врахувати відхилення концентрації і температури пари від розчину, які залежать від конструкції апаратів і властивостей розчину та враховуються за експериментальними даними по відхиленням температури, це близько $3...7^\circ\text{C}$, наприклад для водоаміачного розчину [12, с. 50].

Прийmemo у виведенні залежностей для розрахунків, при одномірному потоці суміші вздовж дегазатора, напрям руху розчину за додатній, а рух пари за від'ємний.

Виділимо в дегазаторі вільний перетин N та введемо такі позначення: N, I, II – стани сумішей пари і розчину відповідно в перетинах N, I, II ; $n, I, 2$ – стани розчину відповідно в перетинах N, I, II ; $n', I', 2'$ – стани пари відповідно в перетинах N, I, II .

За умов нерозривності та одномірності потоку пари і розчину та враховуючи що при відборі пари з холодного перетину дегазатора напрями потоків розчину і пари протилежні слідує, що в кожному з перетинів потоків N, I, II сумарні масові витрати потоків пари і розчину постійні, відповідно

$$M_N = M_n - M_{n'} = M_I - M_{I'} = M_2 = \text{const} . \quad (1)$$

Аналогічно, за умови нерозривності одномірного потоку по агенту, в тих же перетинах дегазатора

$$M_N \times \zeta_N = M_I \times \zeta_I = M_{II} \times \zeta_{II} = \text{const}, \quad (2)$$

$$\text{або} \quad (M_n - M_{n'}) \zeta_N = (M_I - M_{I'}) \zeta_I = M_2 \times \zeta_2 = \text{const}, \quad (3)$$

$$\text{або} \quad M_n \times \zeta_n - M_{n'} \times \zeta_{n'} = M_I \times \zeta_I - M_{I'} \times \zeta_{I'} = M_2 \times \zeta_2 = \text{const}, \quad (4)$$

де $\zeta_N, \zeta_I, \zeta_{II}$ – концентрація потоку відповідно в перетинах N, I, II .

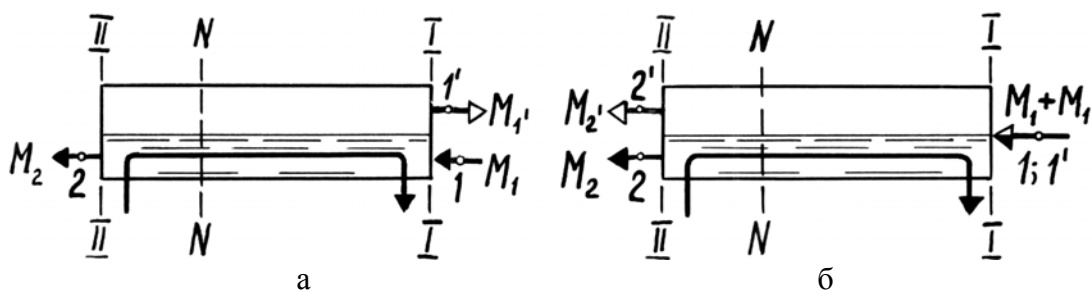


Рисунок 1 – Схеми дегазаторів з відбором пари із холодного (а) і теплого (б) перетинів
Джерело: розроблено автором

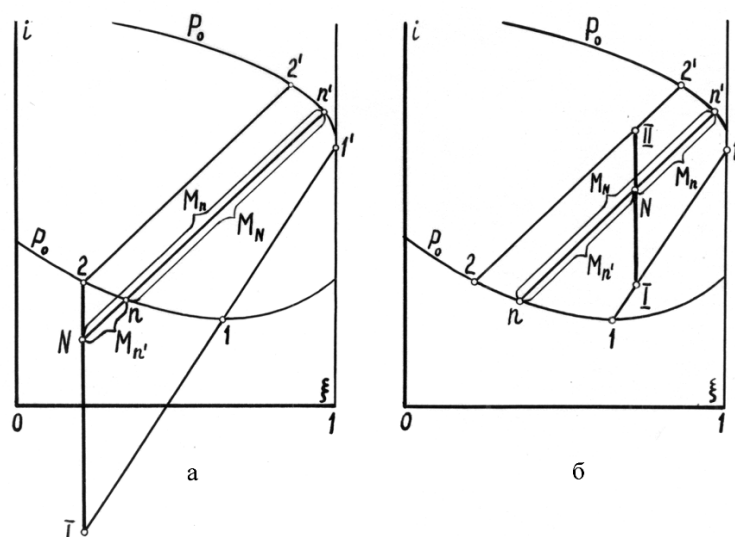


Рисунок 2 – Співвідношення потоків на ξ, i – діаграмі при відборі пари із холодного (а) і теплого (б) перетинів дгазатора

Джерело: розроблено автором

З виразів (2), (3) та з урахуванням (2) виходить, що

$$\xi_N = \xi_I = \xi_{II} = \xi_2 = \text{const.}$$

Таким чином, процес зміни стану суміші пари і розчину знаходиться в ξ, i – діаграмі розчину на лінії $\xi_2 = \text{const}$ (рис. 2, а), яку називають віссю приведених ентальпій потоку [7, 8, 9].

В перетинах дегазатора за правилом відрізків коноди, яка з'єднує стани розчину і пари можна отримати з рівнянь (3) та (4) такі співвідношення витрат розчину і пари

$$\text{в перетині N} \quad \frac{M_n}{M_{n'}} = \frac{\xi_{n'} - \xi_N}{\xi_n - \xi_N} = \frac{\xi_{n'} - \xi_2}{\xi_n - \xi_2}, \quad (5)$$

$$\text{в перетині I} \quad \frac{M_1}{M_{1'}} = \frac{\xi_{1'} - \xi_I}{\xi_1 - \xi_I} = \frac{\xi_{1'} - \xi_2}{\xi_1 - \xi_2}, \quad (6)$$

$$\text{в перетині II} \quad \frac{M_2}{M_{2'}} = \frac{\xi_{2'} - \xi_{II}}{\xi_2 - \xi_{II}} = \frac{\xi_{2'} - \xi_2}{\xi_2 - \xi_2} = \infty. \quad (7)$$

З виразів (5), (6), (7) витікає, що в кожному перетині дегазатора витрати розчину пропорційні різниці концентрації пари і приведеної концентрації потоку в цьому перетині, а витрати пари пропорційні різниці концентрацій розчину і приведеної концентрації. На ξ, i – діаграмі різниці концентрацій пропорційні відрізкам конод, що з'єднують точки відповідних станів пари, розчину і парорідинної суміші в перетинах потоку. Тоді процес I-II, що характеризує зміну стану потоку парорідинної суміші - в ξ, i – діаграмі лежатиме на лінії приведених ентальпій між точкою перетину її з продовженням коноди 1'-1 і точкою 2 (рис. 1, а).

Співвідношення витрат розчину і пари в кожному перетині N дегазатора можна виразити через ентальпії або концентрації потоків розчину і пари в цьому перетині

$$\frac{M_n}{M_{n'}} = \frac{i_{n'} - i_N}{i_n - i_N} = \frac{\xi_{n'} - \xi_N}{\xi_n - \xi_N} = \frac{\xi_{n'} - \xi_2}{\xi_n - \xi_2}. \quad (8)$$

Це підтверджує правильність розташування на ξ, i - діаграмі (рис. 2, а) відрізка прямої $I-2$, що характеризує зміну приведеної ентальпії парорідинної суміші розчину і пари в процесі дегазації.

Приведену ентальпію сумарного потоку в будь-якому перетині можна визначити графічно на ξ, i - діаграмі розчину або аналітично за відомими станами розчину і пари в цьому перетині.

Графічно приведена ентальпія i_N в будь-якому перетині потоку N визначається на ξ, i - діаграмі точкою, яка лежить на перетині продовження відповідної коноди $n'-n$ з віссю приведених ентальпій $I-2$.

Аналітично приведену ентальпію i_N в будь-якому перетині N потоку можна визначити за параметрами точок процесу по одній із формул виведених із співвідношень (8)

$$i_N = \frac{i_n(\xi_{n'} - \xi_2) - i_{n'}(\xi_n - \xi_2)}{\xi_{n'} - \xi_n} = i_{n'} - \frac{(\xi_{n'} - \xi_2)(i_{n'} - i_n)}{\xi_{n'} - \xi_n} = i_n - \frac{(\xi_n - \xi_2)(i_{n'} - i_n)}{\xi_{n'} - \xi_n}. \quad (9)$$

Для побудови графіка залежності $Q_0=f(T)$, тобто кількості сприйманого робочим тілом тепла від температури розчину, необхідно процес зміни стану розчину $1-n-2$ на лінії кипіння в ξ, i - діаграмі розбити перетинами по температурам, наприклад $T_1, T_a, T_b, \dots T_n, \dots T_2$. Приведені ентальпії суміші розчину і пари в цих перетинах (процес $I-N-2$) визначаються графічно продовженням конод, наприклад $n'-n$ до перетину з лінією процесу $I-2$ в точці N , або за параметрами точок по одній з формул (9).

Кількість тепла, отримане сумарним потоком робочого тіла M_2 при нескінченно малій зміні приведеної ентальпії потоку, $dQ_0=M_2di$, тоді кількість тепла, отримане робочим тілом на ділянці від початкового перетину потоку I до будь-якого перетину N

$$Q_{0N} = \int_I^N M_2 di = M_2(i_N - i_I). \quad (10)$$

Кількість тепла, яке отримане сумарним потоком робочого тіла від перетину I до перетинів $A, B, \dots N, \dots 2$ буде відповідно дорівнювати:

$$Q_{0A} = M_2(i_A - i_I); Q_{0B} = M_2(i_B - i_I); \dots Q_{0N} = M_2(i_N - i_I); \dots Q_{02} = M_2(i_2 - i_I). \quad (11)$$

По знайдених таким чином кількостях тепла (10, 11) і відомим температурам розчину в перетинах $I, A, B, \dots N, \dots 2$ будується графік $Q_{0N} = f(T_N)$.

У дегазаторі з відбором теплої пари рух розчину і пари додатний тому приведенний стан суміші розчину і пари відбувається по лінії $I - II$ (рис. 2, б). Температура киплячого розчину підвищується від T_1 до T_2 . Масова витрата розчину при цьому зменшується від M_1 до M_2 а пари відповідно збільшується від M_1' до M_2' . Тиск кипіння розчину $P_0=const$. Сумарний потік через будь-який перетин N дегазатору в цьому випадку дорівнює кількості розчину F , що дроселюється в дегазатор, тобто $M_N = M_n + M_{n'} = F = const$.

Обчислити приведену ентальпію в перетині потоку N можна із співвідношення витрати розчину (або пари) до сумарного потоку. За правилом змішування

$$\frac{M_n}{M_N} = \frac{M_n}{F} = \frac{i_{n'} - i_N}{i_{n'} - i_n} = \frac{\xi_{n'} - \xi_N}{\xi_{n'} - \xi_n},$$

$$i_N = i_{n'} - \frac{M_n}{F}(i_{n'} - i_n) = i_{n'} - \frac{(\xi_{n'} - \xi_N)(i_{n'} - i_n)}{\xi_{n'} - \xi_n}. \quad (12)$$

звідки

Кількість тепла, що отримане сумарним потоком F робочого тіла на ділянці від початкового перетину I до будь-якого перетину N

$$Q_{0N} = \int_I^N F di = F(i_N - i_I). \quad (13)$$

Підставивши сюди значення i_N з формули (13) одержимо кількість тепла отриманого в будь-якому перетині N

$$Q_{0N} = F \left[i_{n'} - i_I - \frac{(\xi_{n'} - \xi_N)(i_{n'} - i_n)}{\xi_{n'} - \xi_n} \right]. \quad (14)$$

Графік залежності $Q_0=f(T)$ можна побудувати, розбивши в діаграмі за рис. 2, б лінію $I-II$ зміни стану сумарного потоку F конодами по температурах киплячого розчину, наприклад $T_1, T_a, T_b, \dots, T_n, \dots, T_2$. На перетинах конод з віссю приведенного потоку $I-II$ графічно визначаються ентальпії приведенного потоку при температурах киплячого розчину $T_1, T_a, T_b, \dots, T_n, \dots, T_2$. На перетині конод з лінією $1'-2'$ визначаються параметри точок пари, а на лінії $1-2$ - параметри точок розчину. За формулами (13, 14) визначається кількість тепла, отримане робочим тілом на ділянці від початкового перетину потоку I до будь-якого перетину N з температурою розчину T_n .

На рис. 3 приведені залежності $Q_0=f(T)$ для розглянутих способів дегазації водоаміачного розчину при відборі холодної пари (1, 3, 4) з холодного перетину та теплої (2) з теплового перетинів дегазатора та при різних початкових концентраціях киплячого розчину.

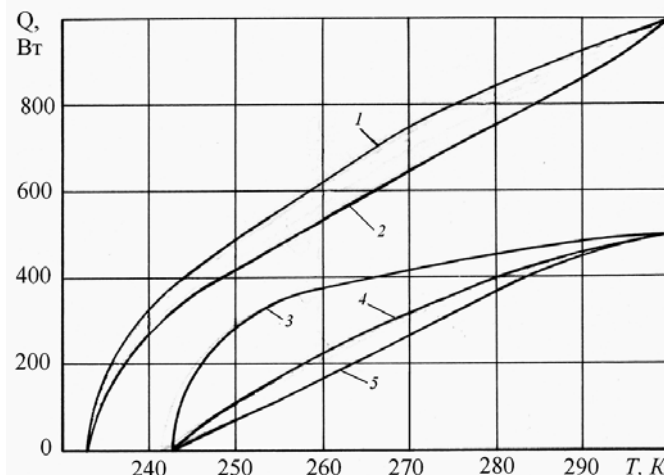


Рисунок 3 – Залежність $Q=f(T)$ при дегазації водоаміачного розчину (1...4) і охолодженні антифризу (5)
Джерело: розроблено автором

Лінії 1, 2 - при холодопродуктивності $Q_0 = 1000$ Вт, неізотермічності кипіння розчину від 233К до 300К, тиску дегазації 39,2кПа. Для порівняння процесів дегазації з відбором холодної (1) та теплої (2) пари при початковій концентрації киплячого розчину 0,644 кг/кг.

Лінії 3, 4 – при холодопродуктивності $Q_0 = 500$ Вт і неізотермічності кипіння розчину від 243К до 300К:

- 3 - при початковій концентрації розчину 0,84 кг/кг (тиск дегазації 98 кПа);
- 4 - при початковій концентрації розчину 0,544 кг/кг (тиск дегазації 39,2 кПа).

Для порівняння приведена крива 5, що відповідає залежності $Q=f(T)$ для антифризу марки 40 при $Q=500$ Вт.

Аналіз неізотермічного процесу кипіння розчину $Q_0=f(T)$ в дегазаторі РХМ (рис3) показує, що залежності 1, 2, 3, 4 між температурою і теплом, який сприймає

розчин більш непропорційні у відзнаку від залежності для охолоджуваного потоку рідини 5. Дуже впливає на пропорційність графіка початкова концентрації розчину. Так, найбільша непропорційність графіка $Q_0=f(T)$ при високій концентрації (графік 3), а найменша – при середній (4).

Причиною цього є зміна в процесі кипіння не тільки кількості розчину, а й його концентрації, яка суттєво змінює теплоту пароутворення від більш насиченого до мало насиченого розчину.

Перетин відбору з дегазатора холодної (1) або теплої (2) пари незначно впливає на пропорційність залежності $Q_0=f(T)$.

Висновки. Таким чином розроблена методика аналізу залежності температури киплячого розчину від переданого тепла в дегазаторі РХМ дає можливість вибору доцільного варіанту початкової концентрації киплячого розчину. Рекомендується вибирати початкову концентрацію таким чином, щоб наблизити до еквідистантності зміни температур охолоджуючого потоку розчину та охолоджуваного потоку рідини або газу. Це сприятиме розробці термодинамічно ефективних РХМ, які можуть бути використані в енергозберігаючих технологіях охолодження в промисловості, в сільському господарстві та різних установках для охолодження рідин або газів.

Список літератури

1. Мартыновский, В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / под ред. В.М. Бродянского. Москва : Энергия, 1979. 288 с.
2. Енергетична ефективність ступінчастих ресорбційних циклів для охолодження / Ошовський В.Я. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2019. Вип. 49. С.168-178.
3. Морозюк Л. И., Грудка Б. Г. Энергетическая эффективность абсорбционно-резорбционной холодильной машины в системе тригенерации малой энергетики. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. Т. 52, вип. 4. С.4-10.
4. Resorption heat pump / Vasiliev L.L., Mishkinis D.A., Antukh A.A., Kulakov A.G. *Applied. Thermal Engineering*. 2004. Vol. 24. P. 1893–1903.
5. А.с. 1092336 СССР, МКИ F25B 15/12. Абсорбционно-резорбционная холодильная установка / Одесский технолог. ин-т холод. пром-ти; В.Я.Ошовский, А.Г. Дергачёв, Н.Г. Шмуйлов ; заявл. 11.10.82 ; опубл. 15.05.84, Бюл. № 18. 6 с.
6. Ree H., Oostendorp P.A. Resorption heat pumps, in : NATO Advanced State Institute : Heat Pumps Fundamentals, Espinho (Portugal), Sept. 1980.
7. Бошнякович, Ф. Техническая термодинамика. Ч.2 : пер. с нем. Москва : Ленинград : Госэнергоиздат, 1956. 255с.
8. Кириллин, В.А., Шейндлин А.Е., Шпильрайн Э.Э. Термодинамика растворов. Москва : Энергия, 1980. 281 с.
9. Блиер Б.М., Вургафт А.В. Теоретические основы проектирования абсорбционных термотрансформаторов. Москва : Пищевая промышленность, 1971. 203 с.
10. Машины и системы низкопотенциальной энергетики : веб-сайт. URL: http://Sergey-Osetrov.Projects/Heat_Pump/not_traditional_sources_low_potential_energy.htm. (дата звернення: 14.10.2021)
11. Расчет двухступенчатой абсорбционно-резорбционной машины : веб-сайт. URL: <http://vseholodilniki.ru/stati/absorbtsionnye-holodilnye-mashiny/raschet-dvuhstupenchatoy-a>(дата звернення: 15.10.2021)
12. Бадилькес И.С., Данилов Р.Л. Абсорбционные холодильные машины. Москва : Пищевая промышленность, 1966. 356 с.

References

1. Martynovsky, V.S. (1979). *Cycles, schemes and characteristics of thermal transformers* . V.M. Brodiansky (Ed.). Moscow: Energy, 288 p. [in Russian].
2. Oshovskyi, V.J. Anastasenko, S.N., Svyateckiy, N.V. & Shostak, O.V. (2019). Enerhetychna efektyvnist' stupinchastykh resorbtisijnykh tsyklyv dlia okholodzhennia [Energy efficiency of step resorption cycles for cooling]. *Konstruiuvannja, vyrobnytvo ta ekspluatacija sil'skohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 49* [in Ukrainian].

3. Morozyuk, L.I. & Grudka, B.G. (2016). Enerhetycheskaia efektyvnost' absorbtsonno-rezorbtsyonnoj kholodyl'noj mashyny v systeme tryheneratsyy maloj enerhetyky [Energy efficiency of absorption-resorption refrigeration machine in the system of low energy trigeneration]. *Kholodyl'na tekhnika ta tekhnolohiia – Refrigeration equipment and technology*, Vol. 52, issue. 4, 4-10. [in Ukrainian].
4. Vasiliev, L.L., Mishkinis, D.A., Antukh, A.A. & Kulakov, A.G (2004). Resorption heat pump. *Thermal Engineering*, Vol. 24, P. 1893–1903. [in Belorussian].
5. A.s. 1092336 USSR, MKI F25B 15/12. Absorption-resorption refrigeration unit. [Odessa technologist. int cold. prom-ti; V.J. Oshovskyi, A.G. Dergachev, NG Шмуйлов; declared 11.10.82; publ. 15.05.84, Bull. № 18. 6 p. [in Ukrainian].
6. Ree, H. & Oostendorp, P.A. (1980). Resorption heat pumps. [NATO Advanced Stade Institute : Heat Pumps Fundamentals] Espinho, Sept. [in Portugal].
7. Boshnyakovich, F. (1956.) *Technical thermodynamics*. Part 2. (Trans). Moscow: Leningrad: Gosenergoizdat, 255p. [in Russian].
8. Kirillin, V.A., Sheindlin, A.E. & Spielrein, E.E. (1980). *Termodinamika rastvorov [Thermodynamics of solutions]*. Moscow: Energy [in Russian].
9. Blier, B.M., Wurgaft, A.V. (1971). Teoreticheskie osnovy proektirovaniya absorbcionnyh termotransformatorov [Theoretical bases of design of absorption thermotransformers.] Moscow: Pishhevaya promyshlennost' [in Russian].
10. Low-potential energy machines and systems: website. Retrieved from http://Sergey-Osetrov.narod.ru/Projects/Heat_Pump/not_traditional_sources_low-potential_energy.htm.
11. Mashiny i sistemy nizkopotencial'noj energetiki : veb-sajt. [Calculation of a two-stage absorption-resorption machine: website]. vseholodilniki.ru. Retrieved from <http://vseholodilniki.ru/stati/absorbtsionnye-holodilnye-mashiny/raschet-dvuhstupenchatoy-a>
12. Badylkes, I.S. & Danilov, R.L. (1966). *Absorbtsionnye holodil'nye mashiny [Absorption refrigeration machines]*. Moscow: Pishhevaya promyshlennost' [in Russian].

Viktor Oshovskyi, Assos. Prof., PhD tech. sci

Pervomaysk Branch of National Shipbuilding University named after admiral Makarov, Pervomaysk, Ukraine

Analysis of Non-isothermal Processes in Degassers of Resorption Refrigeration Machines

The aim of the article is to develop a method of calculations and analysis of the non-isothermal process of boiling the solution in countercurrent degassers of resorption refrigeration machines (RCM) at different variants of solution concentrations and vapor sampling temperatures. The concentration and properties of the solution change in the degasser in contrast to the flow of liquid or gas being cooled. Therefore, the results of the analysis predict the ability to choose the parameters of the solution and steam to equalize the temperature pressure between the cooling solution and the cooled stream, which will increase the thermodynamic efficiency of the RHM.

According to the presented method, the analysis of the temperature dependence on the received heat for the solution of ammonia in water at boiling in the set temperature range is carried out. According to the constructed graphs, it is proved that this dependence is not proportional. The deviation from proportionality depends on the initial concentration of the solution. The largest deviation from proportionality corresponds to a high concentration of the solution. As the concentration of the solution decreases to the average value, the deviation from proportionality decreases. This is due to the fact that due to the unlimited solubility of ammonia in water and the different heat of vaporization of water and ammonia, the thermal properties of the solution change from a more ammonia-saturated solution to a less saturated one. Thus, to approximate the equidistance of the boiling solution to the stream being cooled, it is necessary to choose the initial concentration of the solution based on the analysis of this method. In addition, whenever possible, the components of the solution for RHM with similar thermal properties should be selected. The equidistance of the temperatures of the boiling solution to the cooled stream will increase the thermodynamic efficiency of the RHM.

Thus, the developed technique allows analyzing the relationship between temperature and heat of the solution, the properties of which change during boiling. It is proved by the example of boiling a solution of ammonia in water that this dependence is disproportionate due to the change in the concentration of the solution. The deviation from proportionality is affected by the initial concentration of the solution, which must be chosen so as to approach the equidistance of changes in temperature of the cooling stream of the solution and the cooled stream of liquid or gas. This will increase the efficiency of RCM for their use in energy-saving technologies.

degasser, resorption refrigeration machines, concentration range, solution, reduced enthalpy

Одержано (Received) 16.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 24.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 629.33

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.141-146>

Л.Г. Малай, доц., канд. техн. наук, **В. С. Попеску**, доц., канд. техн. наук, **Анжела Попескул**, доц., канд. пед. наук, **Я.В. Валуца**, препод.

Государственный аграрный университет Молдовы, г. Кишинёв, Молдова

e-mail: leondanus@mail.ru, v.popescu@mail.ru, popescula@mail.ru, valutamd@rambler.ru

Внедорожное транспортное средство на базе импульсно-фрикционного двигателя

В работе представлено описание результатов экспериментальных исследований условие сборки планетарной трансмиссии с некоторыми сателлитами которые выполняется в предположении, что все скоростные передачи нулевые, без перемещения инструмента. Это условие сильно ограничивает кинематические возможности передачи. Предлагается способ сборки спутников с произвольным передаточным числом планетарного (или просто соосного) механизма путем изготовления колес со смещенным прибором offset. Проблема решена как для сателлитов с одной, так и с двумя коронками.

планетарный механизм, уникальные спутники, двойные спутники, делительные окружности колёс, начальные радиусы центральных колес, начальные радиусы спутников

Постановка проблемы. Излагаемое в статье техническое новшество относится к транспортной технике, в первую очередь – для условий влажной и пересеченной местности.

Традиционные вездеходы основаны на касательном взаимодействии колесной или гусеничной ходовой части с землей. Их движение по снегу, грязи и мокрой дороге, особенно на подъеме, затруднено из-за недостаточности и без того большого сцепного веса. Это приводит к общеизвестным явлениям буксования и интенсивного износа шин и траков гусениц. Известно также, что гусеница – самая уязвимая часть боевой машины.

Анализ последних исследований и публикаций. У огромного класса наземных машин – тракторов – ключевым техническим показателем их тяговых возможностей является усилие «на крюке» [1]. И чем больше пассивная масса машины, тем выше этот показатель.

Небесные тела Марс, Венера и особенно Луна неблагоприятны для привычных средств передвижения, которые взаимодействуют с почвой посредством касательного тягового усилия. Этот недостаток проистекает из низкой гравитационной силы и разнообразия почв. В стремлении минимизировать массу межпланетной станции мы существенно понижаем тяговые качества «лунного трактора».

Однако в желании улучшить тяговые свойства двигателя инженерная мысль угнетена закостенелой идеей касательного контакта с дорогой. Так, изобретено вспомогательное колесное устройство к гусеничному ходу для обката встретившегося препятствия [2]. А для более глубокого погружения в грунт между двумя обычными ведущими колесами установлено эллипс образное колесо [3]. По замыслу авторов все это позволяет повысить ходовые свойства машины.

Импульсно-фрикционный движитель (ИФД) основан на отталкивании от земли под углом к направлению движения, подобно движению по земле людей и большинства хордовых животных, вследствие чего здесь отпадает гравитационное условие движения. В отличие от ноги в органическом мире, механический импульсатор генерирует колебания значительной частоты, измеряемой десятками циклов в секунду.

Назовем *виброходом* транспортное средство, приводимое в движение импульсно-фрикционным движителем. Все составные части виброхода могут быть отнесены к трем категориям: вибрирующие элементы ИФД, остов машины и передающие звенья. А важнейший показатель качества машины это отношение вибрирующей массы m_i к общей массе машины m :

$$k_m = m_i / m. \quad (1)$$

И чем ниже этот *показатель масс*, тем благоприятней он сказывается на всех нормативах виброхода - скоростных, энергетических, эргономических и пр.

ИФД сочетает в себе вибровозбудитель направленного действия и связанный с ним рабочий орган, например, опорную плиту, взаимодействующую с грунтом. Каждый цикл колебаний состоит из двух обычно равных интервалов. На *активном* интервале сила отталкивания увлекает плиту вперед и вверх, а на *пассивном* интервале плита прижата к земле и остается неподвижной благодаря значительной силе трения.

Вибровозбудитель направленного действия традиционно выполняют в виде пары неуравновешенных шестерен (рис.1), синхронно вращающихся в противоположные стороны [4]. Угол α суммарной кинетической реакции F фиксирован заранее в зависимости от условий движения. Проекция переменной силы F на направление дороги x служит движущей силой в активном интервале движения.

$$F_x = \cos \alpha \quad (2)$$

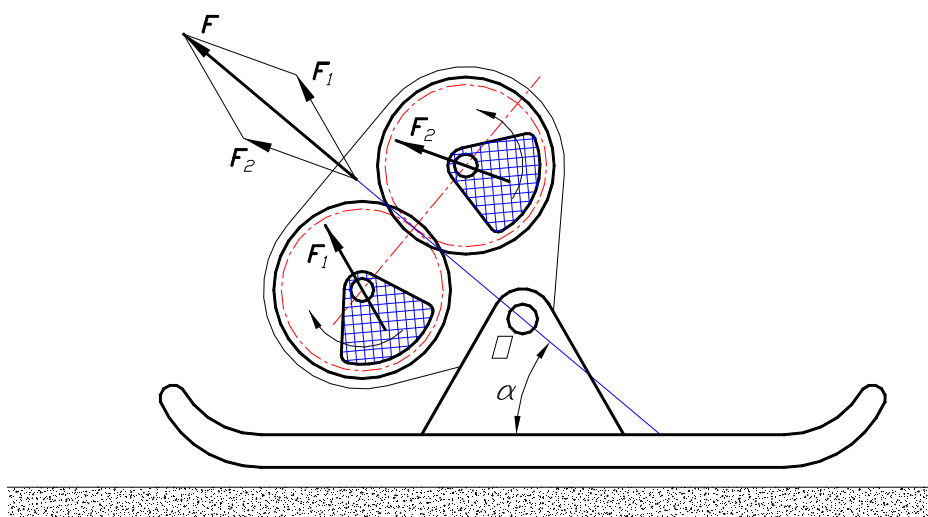


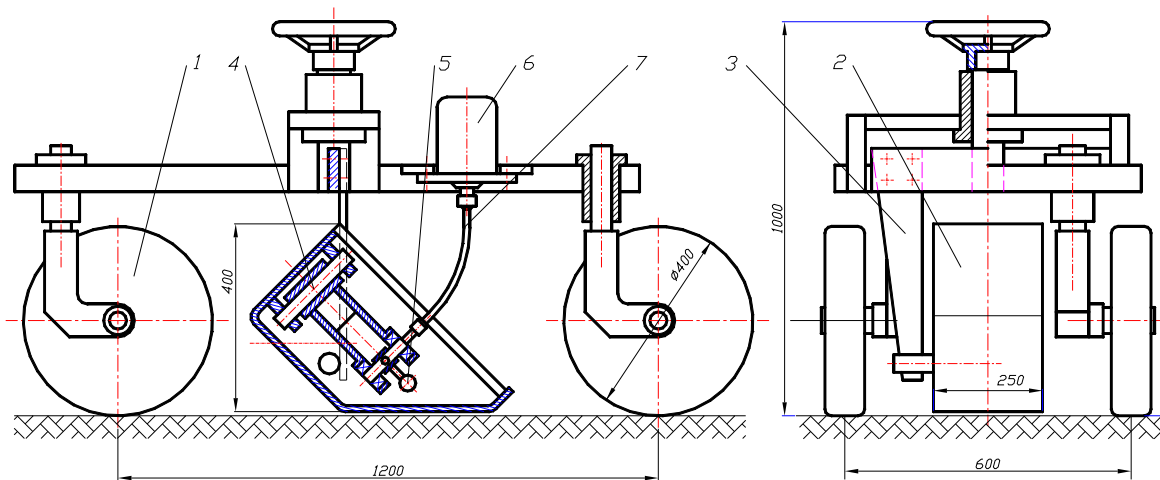
Рисунок 1 – Вибровозбудитель направленного действия

Источник: [4]

Постановка задачи. Для рассматриваемых условий зубчатая передача весьма массивна и шумно работает на больших частотах. Поэтому актуальной и перспективной задачей исследований является изыскание иных способов совершения вибраций, снижение шума и повышение общей эффективности работы машины, а также создание методики расчета основных параметров предложенного устройства.

Изложение основного материала. В ходе проведения анализа нами были предложены иные принципы вибрации. направленного действия. По маятниковой схеме [5, 6] совершающий быстрое вращение дебаланс помещен на конце стержня, наклоненного под заданным углом α к направлению дороги. Положение стержня фиксировано мягкой пружиной кручения, вследствие чего он совершает синхронные колебания малой угловой амплитуды 2β . При этом кинетическая реакция F строго направлена вдоль стержня.

Остов машины это тележка на колесах, но *не ходовых*, а в качестве обыкновенной опоры качения. Первый опытный образец виброхода изображен на рис.2.



1 – тележка на рояльных колесах, 2 – импульсатор, 3 – плоская пружина, 4 – ось маятника, 5 – дебаланс, 6 – двигатель, 7 – гибкий вал

Рисунок 2 – Схема экспериментального образца виброхода

Источник: [4]

Здесь двигатель, помещенный на остов машины, вращает дебаланс движителя посредством гибкого или карданного вала. В результате машина приобрела плавность хода, и степень ее эффективности выросла в основном за счет того, что лишь десятая часть устройства взаимодействует с дорогой ($k_m \approx 0.1$).

Толчковые движения рабочего органа передаются машине разными способами. Когда механизм передачи содержит несколько весовых звеньев, как, например в [7], это отрицательно сказывается на показателе k_m .

Наиболее простая связь ИФД с машиной реализована посредством упругих элементов с мягкой характеристикой. Это могут быть горизонтально установленные пружины, либо, как здесь показано, вертикальные пластины в форме балок равного сопротивления.

Алгоритм расчета ходовых свойств.

Основными характеристиками ходовых качеств импульсного вездехода являются скорость движения v и сила тяги на крюке F . А исходными данными служат следующие показатели экспериментального образца [8-14]:

- масса дебаланса $m_d = 2,9 \text{ kg}$;
- радиус дебаланса $r = 0,062 \text{ m}$;
- угловая скорость дебаланса $\omega = 300 \text{ rad / s}$;
- масса толкателя (суммарная) $m = 6 \text{ kg}$;
- угол наклона толкателя $\alpha = 45^\circ$.

Порядок расчета.

Окружная скорость дебаланса

$$v_d = \omega r = 300 \cdot 0,062 = 18, m/s. \quad (3)$$

Средняя окружная скорость дебаланса (за полупериод)

$$v_{med} = v_c / \pi = 18,6 / \pi = 6 m/s, \quad (4)$$

а ее проекция на направление движения –

$$v_\alpha = v_{med} \cos \alpha = 6 \cdot \cos 45^\circ = 4,24 m/s. \quad (5)$$

Коэффициент массы

$$\lambda_m = m_c / m = 2,9 / 6 = 0,48. \quad (6)$$

Скорость перемещения толкателя определяется исходя из закона сохранения импульса

$$mv = m_d v_\alpha,$$

откуда

$$v = m_d v_\alpha / m = \lambda_m v_\alpha = 0,48 \cdot 4,24 \approx 2 m/s. \quad (7)$$

Статический момент дебаланса

$$S = m_d r = 2,9 \cdot 0,62 = 0,18 kg \cdot m, \quad (8)$$

и его центробежная сила

$$F_d = \omega^2 S = 300^2 \cdot 0,18 = 16200 N. \quad (9)$$

Среднее значение центробежной силы (за полупериод)

$$F_{med} = F_d / \pi = 16200 / \pi = 5160 N, \quad (10)$$

а ее проекция на направление движения (сила тяги) –

$$F = F_{med} \cos \alpha = 5160 \cdot \cos 45^\circ = 730 N. \quad (11)$$

Мощность толкателя

$$P = Fv = 730 \cdot 2 = 1460 W \approx 1,5 kW. \quad (12)$$

Для предстоящих натурных исследований взаимодействия толкателя с тележкой выбран принят двигатель мощностью $P_m = 2 kW$.

Достоинства новой самоходной машины следующие.

Абсолютная проходимость. Отталкивание от земли под углом исключает буксование на месте. Машина не нуждается в пассивной массе для сцепления с дорогой.

Тяговая способность не зависит от веса машины и ее распределения по колесам.

Непосредственная передача энергии от двигателя к движителю. Устранена традиционная трансмиссия в виде коробки передач, дифференциала и пр. Движение управляется непосредственно частотой вращения двигателя. Скорость можно регулировать также углом импульсации (направление колебаний). При столкновении с препятствием или на крутом подъеме происходит автоматическое замедление движения в соответствии с воспринимаемой энергией.

Свободная маневренность. Колеса рояльного типа придают машине нулевой радиус поворота вплоть до разворота на месте. Более того, транспортное средство

способно перемещаться в поперечном и обратном направлениях. Такие маневры выполняются простым поворотом движителя вокруг вертикальной оси.

Отсутствие тормозных устройств. Для остановки машины достаточно замедлить вращение мотора или приблизить угол пульсации к вертикали. Устройство оставляет возможность двигаться по инерции: достаточно приподнять движитель, нарушив контакт с дорогой.

Долговечность. Исполнительным органом движителя служит опорная плита, практически не изнашиваемая. В итоге - значительная экономия резинового покрытия ведущих колес и гусеничных лент.

Перечисленные преимущества компенсируют сравнительно низкий КПД, обусловленный пассивной частью циклической работы движителя.

Выводы.

1. В отличие от традиционных наземных транспортных средств вездеход взаимодействует с дорогой не по касательной, а под острым углом; и это исключает пробуксовку на месте независимо от влажности опорной поверхности.

2. Машина, опирающаяся на четыре рояльных колеса, отделена от импульсного движителя мягким упругим элементом, вследствие чего она перемещается плавно и не испытывает вибрационных воздействий.

3. По сравнению известными вибророндами здесь КПД неизмеримо выше, потому что масса движителя существенно меньше общей массы машины.

4. Трансмиссия вездехода предельно проста: движение от двигателя передается гибким или карданным валом, а скорость движения регулируется углом наклона импульсатора.

Список литературы

1. Силаев Г.В. Конструкция автомобилей и тракторов: учебник для вузов: 3-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2018. 369 с.
2. J. Zuchoski, J. Bernard, S. Pilette. Track assembly for an all-terrain vehicle (ATV) or other tracked vehicle. US patent № US9033430B2. 2015.
3. Фролов М.Ф. Ходовая часть транспортного средства. Патент России: RU2504481C2 . 2012.
4. Блехман И.И. Вибрация изменяет законы механики. *Природа*. 2003. № 11.
5. Мор Е.Г., Сусян Л.А. А.С. СССР № 768690 по кл. В 62 D 57/00/. 1980.
6. Мор Е.Г. А.С. СССР № 998211 по кл. В 62 D 57/00/. 1983.
7. Grossfeld K. Traction devise. US patent № 3.365.012 . 1968.
8. Клімов Е.С. Щодо питання визначеності вагового стабілізуючого моменту . *Вісник КДПУ*. 2009. Вип. 1.54 . С. 61-65.
9. Черненко С.М., Клімов Е.С., Черниш А.А. Рулевые приводы транспортных средств с двумя управляемыми мостами. *Наукові нотатки* . 2018. Вип. 62. С 220-225.
10. Кравець В.В., Зіборов К.А., Бас К.М. та ін. Математичні моделі складових силової установки гібридного транспортного засобу. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. Вип 56. С. 117-136.
11. Гуревич Л.В., Меламуд Р.А. Пневматический тормозной привод автотранспортных средств: Устройство и эксплуатация. М.: Транспорт, 1988. 224 с.
12. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобили. Теория эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение, 1989. 237 с.
13. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория. Минск: Вышэйшая школа, 1986. 229 с.
14. Грубель М.Г., Назаркевич С.М., Зіркевич В.М. Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля: курс лекцій . Львів: вид-во Академії сухопутних військ, 2011. 153 с.

References

1. Silaev, G.V. (2018). *Konstruktsiya avtomobiley i traktorov: uchebnik dlya vuzov [The design of cars and tractors: a textbook for universities]*. Moskva: Yurayt [in Russian].

2. Zuchoski, J., Bernard, J. & Pilette S. (2015). *Track assembly for an all-terrain vehicle (ATV) or other tracked vehicle*. US patent № US9033430B2.
3. Frolov, M.F. (2012). *Hodovaya chast transportnogo sredstva [Chassis of the vehicle]*. Patent Rossii: RU2504481C2.
4. Blehman, I.I. (2003). Vibratsiya izmenyaet zakonyi mehaniki [Vibration changes the laws of mechanics]. *Priroda – Nature*, 11 [in Russian].
5. Mor, E.G. & Suslyan, L.A. (1980). *Avtorskoe svidetelstvo SSSR № 768690 po kl. B 62 D 57/00/* [in Russian].
6. Mor, E.G. (1983). *Avtorskoe svidetelstvo SSSR № 998211 po kl. B 62 D 57/00/* [in Russian].
7. Grossfeld, K. (1968). *Traction devise.- US patent № 3.365.012*.
8. Klimov, E.S. (2009). Schodo pitannya viznachenosti vagovogo stabilizuyuchogo momentu [On the question of the certainty of the weight stabilizing moment]. *Visnik KDPU 1.54 – Bulletin of the KGPU 1.54*, 61-65 [in Ukrainian].
9. Chernenko, S.M., Klimov, E.S. & Chernish, A.A. (2018). Rulevyie privodyi transportnyih sredstv s dvumya upravlyaemyimi mostami [Steering gears of vehicles with two steering axles]. *Naukovi notatki – Scientific notes* 62, 220-225 [in Russian].
10. Kravets, V.V., Zilborov, K.A. & Bas, K.M. et al. (2018). Matematichni modeli skladovih silovoyi ustanovki gibridnogo transportnogo zasobu [Mathematical models of the components of the power plant of a hybrid vehicle]. *Zbirnik naukovih prats Natsionalnogo girnichogo universitetu – Collection of scientific works of the National Mining University*, 56, 117-136 [in Ukrainian].
11. Gurevich, L.V., Melamud, R.A. (1988). *Pnevmaticheskii tormoznoy privod avtotransportnyih sredstv: Ustroystvo i ekspluatatsiya [Pneumatic brake drive of motor vehicles: Device and operation]*. Moscow: Transport [in Russian].
12. Litvinov, A.S. & Farobin, Ya.E. (1989). *Avtomobili. Teoriya ekspluatatsionnyih svoystv [Cars. Theory of operational properties]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
13. Grishkevich A.I. (1986). *Avtomobili. Teoriya [Cars. Theory]*. Minsk: Vyisheyshaya shkola [in Russian].
14. Grubel, M.G., Nazarkevich, S.M. & Zirkevich, V.M. (2011). *Avtomobili. Teoriya ekspluatatsiy nih vlastivostey avtomobilya: kurs lektsiy [Cars. Theory of operational properties of the car: a course of lectures]*. Lviv: vid-vo Akademiyi suhoputnih viysk [in Ukrainian].

Leonid Malai, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victor Popescu**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Angela Popescu**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Iacob Valuța**, assistant
State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Moldova

Off-road Vehicle Based on Impulse-friction Propulsion

The paper considers the issues of improving the driving performance of ground vehicles, which are designed for conditions of wet and rough terrain. The analysis of existing propellers is carried out and their most promising type is proposed - a vibration exciter of directional oscillations. The connection of the proposed impulse-friction propulsion unit with the machine is implemented by means of elastic elements with a soft characteristic.

A description of the results of experimental studies of the assembly condition of a planetary transmission with some satellites is presented, which is performed on the assumption that all speed gears are zero, without moving the tool. This condition severely limits the kinematic possibilities of the transmission. A method is proposed for assembling satellites with an arbitrary gear ratio of a planetary (or simply coaxial) mechanism by manufacturing wheels with a displaced offset device. The problem has been solved for both satellites with one and two crowns.

Thus, the proposed all-terrain vehicle interacts with the road at an acute angle, which eliminates slipping, regardless of the humidity of the supporting surface. At the same time, the machine rests on four wheels and is separated from the impulse mover by a soft elastic element, as a result of which it moves smoothly and does not experience vibration effects. The proposed device has a simple transmission and high efficiency, since the mass of the propeller is significantly less than the total mass of the machine.

planetary mechanism, unique satellites, double satellites, wheels splitting rays, the initial rays of the central wheels, the initial rays of the satellites.

Одержано (Received) 11.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 19.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.96/98 (075)

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.147-168>

В. М. Боков, проф., канд. техн. наук, **О. Ф. Сіса**, доц., канд. техн. наук, **І. І. Павленко**, проф., д-р техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Viktor.alia.kntu@gmail.com

Витягування циліндричних деталей із не суцільного матеріалу

Запропоновано, розроблено та досліджено новий спосіб витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком. В даному способі витягування здійснюють із квадратної заготовки, сторони якої паралельні діагоналям вічка сітки. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких нерівномірність висоти циліндричної частини деталі суттєво зменшується, що дозволяє на 35-40 % знизити собівартість штампування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком.

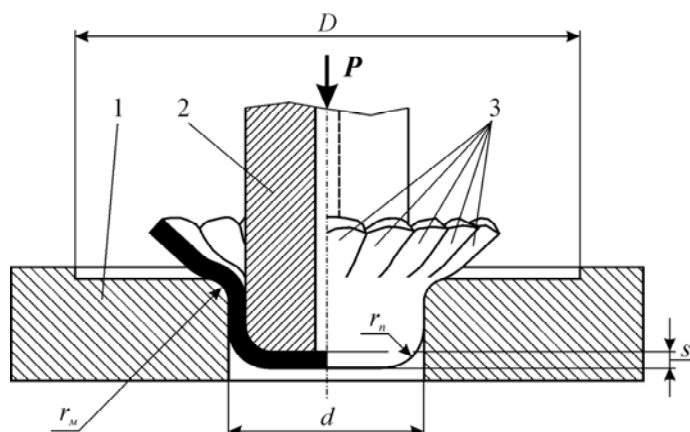
Запропоновано та експериментально випробувано новий спосіб витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки, який відрізняється тим, що заготовку попередньо перфорують; перфорацію заготовки виконують тільки в області фланцю, внутрішній діаметр якої дорівнює середньому діаметру d_c отриманої циліндричної деталі; перфорацію заготовки виконують так, щоб сума Σ усіх перемичок за шириною a_i на кожному концентричному колі розташування отворів перфорації дорівнювала довжини кола за середнім діаметром d_c отриманої циліндричної деталі, тобто є справедливим вираз: $\Sigma a_i = \pi \cdot d_c$. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких граничний коефіцієнт витягування значно зменшується ($< 0,46$), що дозволяє реалізувати більш глибоке витягування деталей за один хід пресу.

витягування циліндричних деталей, металева сітка, квадратна заготовка, перфорація, коефіцієнт витягування

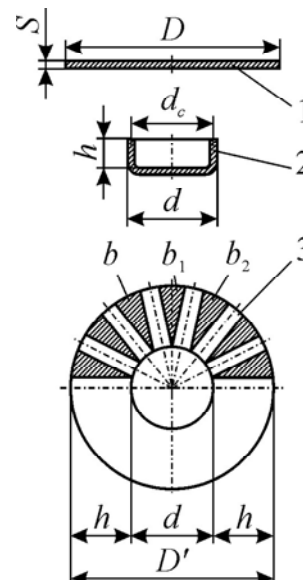
Постановка проблеми. В сучасному машинобудуванні для виготовлення циліндричних деталей із плоскої суцільної листової заготовки широко використовуються різноманітні способи витягування [1, 2]. В даних способах найбільша глибина деталі обмежується критичним коефіцієнтом витягування. Однак, при спробі реалізації процесу при менших значеннях коефіцієнта витягування, ніж критичний, спостерігається відрив дна, який обумовлений перевищенням напружень розтягання в критичному перерізі заготовки (між донною та бічною поверхнями) межі міцності заготовки σ_{ϕ} . В роботі звертається увага на те, що дані напруження можна значно зменшити за рахунок заміни суцільного матеріалу заготовки на не суцільний, зокрема на металеву сітку або перфоровану заготовку. Це, на думку авторів, значно зменшить зусилля штампування, а отже напруження в її критичному перерізі, що дозволить суттєво зменшити граничний коефіцієнт витягування та підвищити глибину штампування. Власне це визначає актуальність досліджень, що спрямовані на зменшення граничного коефіцієнта витягування та підвищення глибини штампування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Витягування – це процес перетворення плоскої заготовки у відкритий зверху порожній виріб [3, с. 148]. Воно здійснюється за допомогою витяжних штампів без заздалегідь обумовленої зміни (тобто зменшення) товщини стінки виробу. Витягування із порожнистої заготовки (так зване друге та подальше витягування) в даній статті не розглядається.

В роботі [3] показано, що при витягуванні циліндричної деталі із суцільної плоскої заготовки без притиску фланця (рис. 1) по краю витягнутого ковпачка утворюються гофри 3 за рахунок надлишкового матеріалу або так званих характеристичних трикутників $b, b_1, b_2, \dots, b_n$ (рис. 2), так як для утворення порожнистого ковпачка діаметром d і висотою h достатньо мати заготовку діаметром D' без заштрихованих ділянок.



1 – матриця; 2 – пуансон; 3 – гофри на виробі
Рисунок 1 – Схема процесу витягування суцільної
плоскої заготовки без притиску фланця
Джерело: [3]



1 – реальна вихідна заготовка; 2 – виріб; 3 –
модель уявленої вихідної заготовки
Рисунок – 2. До пояснення процесу витягування
Джерело: [3]

Наявність надлишкових трикутників приває до необхідності витискування та переміщення металу вгору. Таким чином, при постійному середньому діаметрі ковпачка d_c , підвищення діаметра вихідної заготовки D приводить до зростання об'єму характеристичних трикутників, об'єму гофрів та амплітуди їх елементарної ділянки, а отже до зростання зусилля витягування. При досяганні певного діаметра вихідної заготовки, зусилля опору витягування металу фланця в зазор між матрицею та пуансоном настільки зростає, що спостерігається відрив дна.

Загально відомо [4, 5], що можливість витягування циліндричної деталі за одну технологічну операцію визначається граничним коефіцієнтом витягування m_z , який є кількісним показником даного процесу. За Романовським В. П. [6] його експериментально встановлюють за формулою (1)

$$m_z = \frac{d_c}{D}. \quad (1)$$

Оскільки чисельник формули (1) завжди менше знаменника, граничний коефіцієнт витягування m_z менше одиниці, але більше нуля (рис. 3).



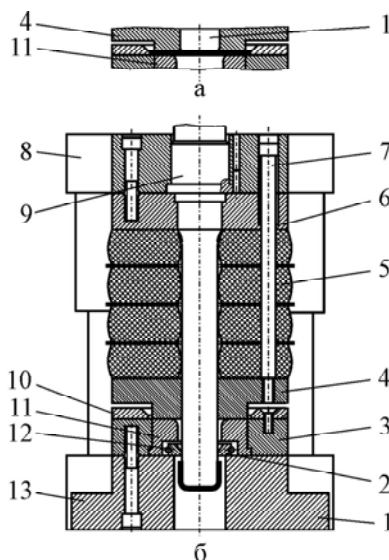
Рисунок 3 – До визначення граничного коефіцієнта витягування
Джерело: розробка авторів

Граничний коефіцієнт витягування ділить відстань між нулем та одиницею на дві зони. В зоні 1 розрахункове значення коефіцієнта витягування m_1 більше або дорівнює граничному значенню m_2 ($m_1 \geq m_2$), а процес витягування відбувається при відносно невеликому зусиллі та напруженню розтягання в критичному перерізі виробу (на межі між донною та бічною поверхнями). Тому в зоні 1 витягування можливе. В зоні 2 розрахункове значення коефіцієнта витягування m_2 менше граничного значення m_2 ($m_2 < m_2$), а процес витягування відбувається при відносно великому зусиллі та напруженню розтягання в критичному перерізі виробу. Тому в зоні 2 витягування не можливе: спостерігається відрив дна.

Однак способи витягування без притиску фланця дозволяють штампувати циліндричні деталі лише на незначну глибину, тобто коли граничний коефіцієнт витягування m_2 не зменшується нижче 0,75...0,85 [7, с. 70].

Більш прогресивними, а тому поширеними способами витягування, є такі, при яких штампування плоскої заготовки здійснюється з притиском фланця [8 – 10]. При витягування в таких умовах гофрування на фланці вихідної заготовки за рахунок притиску суттєво зменшується. Це дозволяє, в свою чергу, зменшити зусилля штампування, а отже і граничний коефіцієнт витягування [11].

Звичайно витягування з притиском фланцю здійснюється у витяжних штампах [7, 12, 13]. В процесі витягування конструкція штампа (рис. 4) забезпечує надійний притиск фланцю вихідної заготовки.



а – початок штампування; б – кінець штампування; 1 – пуансон; 2 – знімач; 3 – матрицетримач;
4 – притискач; 5 – буфер; 6 – пуансонотримач; 7 – ступінчастий гвинт; 8 – плита верхня; 9 – хвостовик;
10 – трафарет; 11 – матриця; 12 – пружина розтягання; 13 – плита нижня

Рисунок 4 – Типовий штамп для витягування циліндричної деталі з притиском фланцю
Джерело: розроблено автором [7]

В роботі [3, с.153] показано, що найбільше потоншення (10-18 %) при витягуванні с притиском фланцю заготовки спостерігається у місці переходу вертикальної стінки у дно ковпачка. У деяких випадках (при відриву дна) це потоншення досягає 30 % та більше. Як бачимо, потоншення заготовки при витягуванні с притиском фланцю обмежує технологічні можливості даного способу штампування.

Способи витягування з притиском фланця дозволяють знизити граничний коефіцієнт витягування m_2 до 0,48, а за деякими джерелами тільки до 0,6 [7, с. 74], і тим самим підвищити глибину витягування.

При спробі реалізації процесу при менших значеннях коефіцієнта витягування спостерігається відрив дна, який обумовлений перевищенням напружень розтягання в критичному перерізі заготовки (між донною та бічною поверхнями) межі міцності заготовки σ_g .

За думкою авторів, дані напруження можна значно зменшити за рахунок заміни суцільного матеріалу заготовки на не суцільний, зокрема на металеву сітку або перфоровану заготовку. Деталі, які отримані способом витягування із не суцільного матеріалу, можуть штампуватися при значно менших коефіцієнтах витягування, а отже мати значно більшу висоту витягнутої частини. Крім того, деталі (наприклад, кожуха та оболонки), що виготовлені із не суцільної заготовки, мають значно меншу масу, порівняно з деталями, що виготовлені із суцільної заготовки.

Постановка завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення глибини витягування циліндричних деталей за одну технологічну операцію шляхом використання для заготовки не суцільного матеріалу (металевої сітки або перфорованої заготовки).

Для досягнення мети були поставлені такі завдання: розробити та дослідити спосіб витягування циліндричних деталей із металевої сітки; розробити та дослідити спосіб витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки.

Методика дослідження способу витягування циліндричних деталей із металевої сітки.

Дана методика складається із обґрунтування технологічної схеми формоутворення поверхні тіла при витягуванні із металевої сітки; методики експериментального дослідження; експериментального обладнання та оснащення; матеріалів, зразків та вимірювального інструмента.

Технологічна схема формоутворення поверхні циліндричної деталі, передбачає використання при витягуванні з притиском фланця вихідної заготовки із металевої сітки з квадратним вічком (рис. 5).

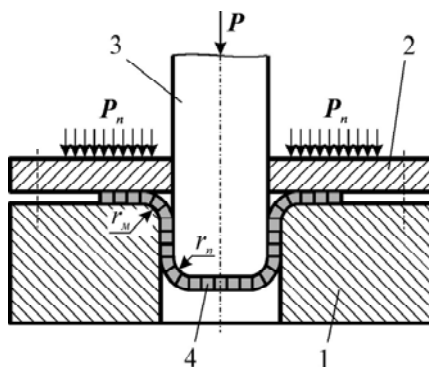
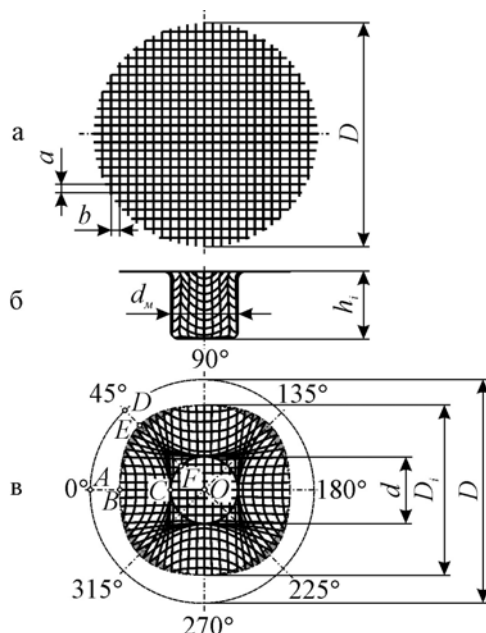


Рисунок 5 – Технологічна схема формоутворення поверхні циліндричної деталі із сітки з квадратним вічком: 1 – матриця; 2 – притискач; 3 – пуансон; 4 - деталь

Джерело: розробка авторів

Плоску сітчасту заготовку (на рис. не показано) кладуть на витяжну матрицю 1 з радіусом округлення кромки r_m , накривають притискачем 2 та притискають до матриці 1 з постійним невеликим зусиллям P_{np} , яке дорівнює 0-10 Н. Далі у притискач вставляють пуансон 3 з радіусом округлення кромки r_n , навантажують його зусиллям P та здійснюють витягування виробу 4.

Плоска сітчаста заготовка (рис. 6, а) в процесі витягування деформується (рис. 6, б, в).



а – вихідна заготовка; б, в – заготовка в процесі витягування

Рисунок 6 – Моделювання картини викривлення квадратних вічок сітки при витягуванні

Джерело: розробка авторів

порівняно з напруженнями, що виникають у фланці при витягуванні суцільної заготовки, так як вони теж викликані бічною деформацією «порожнього» вічка сітки. Вони навіть менші напружень стиснення σ_Θ , що виникають при кутах 0° , 90° , 180° та 270° . Аналогічна картина спостерігається у фланці при кутах 135° , 225° та 315° .

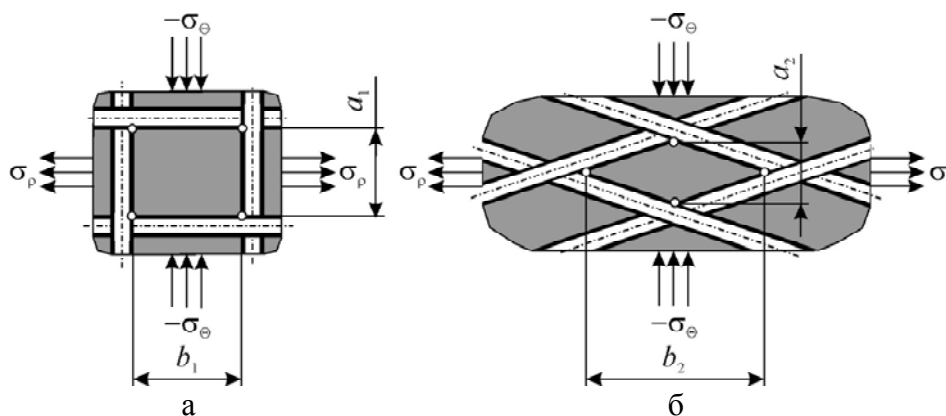


Рисунок 7 – Схема напружень розтягу σ_p у радіальному та стиснення σ_Θ у тангенціальному напрямках, що виникають в елементарному вічку фланцю сітчастої заготовки в процесі витягування при кутах 0° (а) та 45° (б) (див. рис. 6)

Джерело: розробка авторів

Таким чином, в процесі витягування у фланці сітчастої заготовки спостерігаються наступні зміни розмірів у світлі елементарного вічка ($a \times b$):

- при кутах 0° , 90° , 180° , 270° : $a_1 < a$; $b_1 \approx b$;

- при кутах 45° , 135° , 225° , 315° : $a_2 \ll a$; $b_2 \gg b$.

Такі зміни впливають на відхилення від кола зовнішнього периметру заготовки з утворенням чотирьох зон «надлишкового» матеріалу (на рис. 6 зони виділено сірим кольором), що потребує застосування операції обрізування. Слід припустити, що при збільшенні діаметра вихідної заготовки та підвищенні висоти витягнутого ковпачка, зони «надлишкового» матеріалу будуть зростати, і тоді виникає питання про оптимальну форму вихідної сітчастої заготовки. Особливий практичний інтерес має процес витягування круглого ковпачка із квадратної заготовки, який потребує подальшого вивчення.

Наведена технологічна схема формоутворення поверхні тіла при витягуванні деталей з притиском фланцю із плоскої сітчастої заготовки суттєво зменшує зусилля штампування, так як в ній відсутня необхідність витискування металу із надлишкових трикутників, дане зусилля замінено на значне менше, що проявляється у формі «гнуття» та «ковзання» дротів сітки. Це створює передумови для зменшення граничного коефіцієнту витягування і підвищення глибини витягування за одну технологічну операцію.

Для порівнювального аналізу зміни форми фланцю в процесі витягування ковпачка середнім діаметром 29 мм методика передбачала виготовлення двох заготовок із сітки. Перша заготовка була кругла та мала діаметр 90 мм, а друга була квадратна з довжиною діагоналі теж 90 мм. Таким чином, квадратна заготовка вписувалася в круг 90 мм. Крім того, дотримувалася додаткова умова: сторони квадратної заготовки паралельні діагоналям вічка сітки, тобто квадратна заготовка була повернута відносно квадратного вічка сітки на кут, що дорівнює 45° . Витягування здійснювали на експериментальному штампі послідовно з кроком зміни висоти ковпачка h 10 мм. Після кожного витягування заготовку виймали зі штампа, клали на білий папір та фотографували фланець.

Методика визначення граничного коефіцієнта витягування для сітчастої заготовки передбачала наступну послідовність виконання експериментального дослідження:

- для можливості подальшого порівняння, приймається за орієнтир вихідна заготовка діаметром $D = 60$ мм за як така, із якої гарантовано (без відриву дна) витягується ковпачок середнім діаметром $d_c = 29$ мм із листової сталі 08. Експериментально встановлено, що при використанні заготовки діаметром $D = 65$ мм дно ковпачка із листової сталі завжди відривається. Можна вважати, що граничний коефіцієнт витягування для даних умов $m_c = 29/60 = 0,48$;

- із металевої сітки простого переплетення (розмір сторони вічку у світлі 2,5 та діаметром дроту 0,5) вирізали заготовки у формі диску діаметром $D = 55, 60, 65$ і т. д. мм, тобто для кожного наступного експерименту діаметр заготовки збільшували на 5 мм;

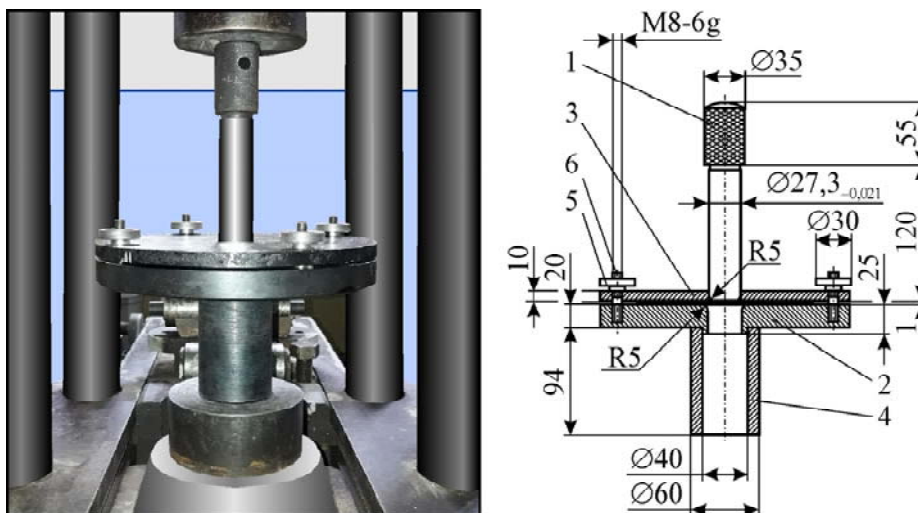
- послідовно із кожної заготовки витягували ковпачки, вимірювали їх розміри, розраховували коефіцієнти витягування та заносили отримані дані в таблицю. Експеримент продовжували до моменту відриву дна. За граничний коефіцієнт витягування приймали такий коефіцієнт, який відповідає ковпачку без відриву дна, що був отриманий із найбільшого діаметру D вихідної заготовки;

- виконували порівнювальний аналіз граничних коефіцієнтів витягування ковпачків із листової та сітчастої заготовок.

Для експериментального дослідження впливу форми вихідної сітчастої заготовки на зусилля витягування здійснювали витягування циліндричних (діаметром

D) та вписаних в них квадратних (розміром D) заготовок в діапазоні зміни D від 50 до 125 мм.

Витягування заготовок із різних матеріалів здійснювали з використанням універсальної випробувальної машини УИП-50, яка дозволяє реєструвати зусилля в процесі деформації. В якості інструмента використовувався експериментальний штамп (рис. 8). Він складається з наступних основних деталей: витяжного пуансона 1; матриці 2, яка дозволяє встановлювати вихідні заготовки діаметром D до 170 мм; притискача 3 для запобігання гофрутворенню на фланці заготовки; втулки-підставки 4 для забезпечення виходу пуансона з відштампованим зразком; чотирьох спеціальних гайок 5; чотирьох шпильок 6.



а

б

Рисунок 8 – Експериментальний витяжний штамп, що встановлений на універсальну випробувальну машину УИП-50 (а) та його креслення (б)

Джерело: розробка авторів

В початковому положенні експериментальний штамп знаходиться у частково розібраному стані. На втулку-підставку 4 встановлюють матрицю 2 з попередньо вкрученими шпильками 6. Далі змащують вихідну заготовку із не суцільного матеріалу та встановлюють на дзеркало матриці 2 симетрично відносно її осей. Заготовку накривають притискачем 3 та легко фіксують його нижнє положення спеціальними гайками 5. В центральний отвір притискача вставляють витяжний пуансон 1. У такому вигляді встановлюють штамп на універсальну випробувальну машину УИП-50. Витягування зразка здійснюють з записом зусилля штампування. Після штампування знімають зразок, вимірюють його та фіксують результати виміру в таблиці.

Експериментальні дослідження способу витягування деталей з притиском фланцю із плоскої сітчастої заготовки здійснювали з використанням в якості матеріалу сітки напівтомпакової 2,5 ГОСТ 6613-73 [14, с. 218], товщиною 1 мм. Аналогічні сітки використовують для виготовлення мікрофонів [15]. Зразки вирізали круглої та квадратної форми. Розміри зразків вказані нижче у відповідних розділах статті.

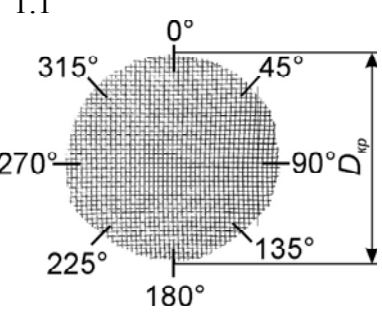
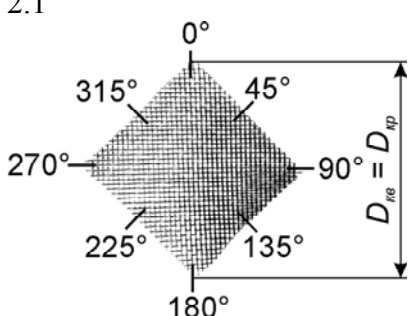
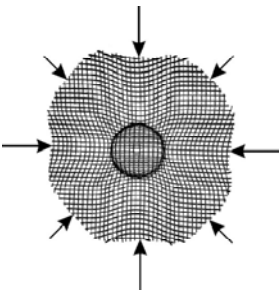
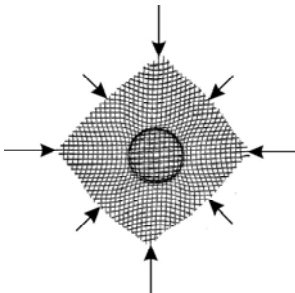
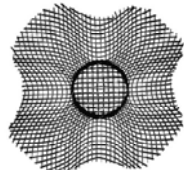
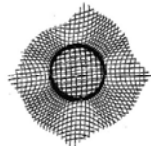
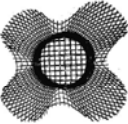
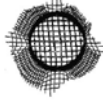
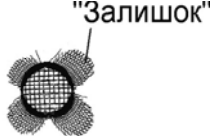
Для вимірювання лінійних розмірів зразків до витягування та після витягування застосовували штангенциркуль типу ШЦ1 з ціною поділки 0,1 мм та мікрометр типу МК з ціною поділки 0,01 мм.

Методика дослідження способу витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки. Дана методика передбачала пояснення фізичної сутності

нового способу витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки, що пропонується, шляхом порівняння його з відомим способом їх витягування із суцільної заготовки за результатами експериментального випробування.

Результати розробки та дослідження способу витягування циліндричних деталей із металевої сітки. Результати порівнювального аналізу зміни форми фланцю в процесі витягування ковпачка зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Морфологія зміни форми фланцю в процесі витягування ковпачків із круглої та квадратної сітчастих вихідних заготовок

Висота ковпачка h , мм	Фото форми фланцю	
	Кругла заготовка	Квадратна заготовка
0 (вихідна заготовка)	1.1 	2.1 
10	1.2 	2.2 
20	1.3 	2.3 
30	1.4 	2.4 
40	1.5 	2.5 

Джерело: розробка авторів

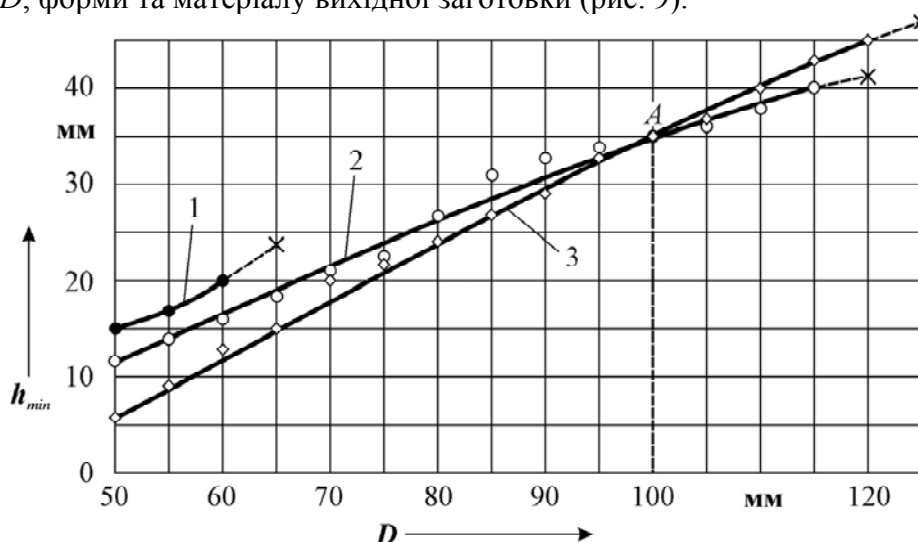
Результати визначення граничного коефіцієнта витягування для сітчастої заготовки наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати експериментально-аналітичного визначення граничних коефіцієнтів витягування циліндричних ковпачків діаметром $d_c = 29$ мм із сітчастої заготовки

Діаметр (розмір) вихідної заготовки D , мм	Коефіцієнт витягування $m = d_c / D$	Висота витягнутого ковпачка h_{min} , мм		
		Кругла вихідна заготовка із листової сталі 08	Кругла вихідна заготовка із металевої сітки	Квадратна вихідна заготовка із металевої сітки
50	0,580	15	12	6
55	0,527	17	14	9
60	0,483	20	16	13
65	0,446	Обрив дна	18	15
70	0,414	-	21	20
75	0,387	-	23	22
80	0,362	-	27	24
85	0,341	-	31	27
90	0,322	-	33	29
95	0,305	-	34	33
100	0,290	-	35	35
105	0,276	-	36	37
110	0,264	-	38	40
115	0,252	-	40	43
120	0,242	-	Обрив дна	45
125	0,232	-	-	Обрив дна

Джерело: розроблено авторами

Побудована графічна залежність мінімальної висоти ковпачка h_{min} від діаметру (розміру) D , форми та матеріалу вихідної заготовки (рис. 9).

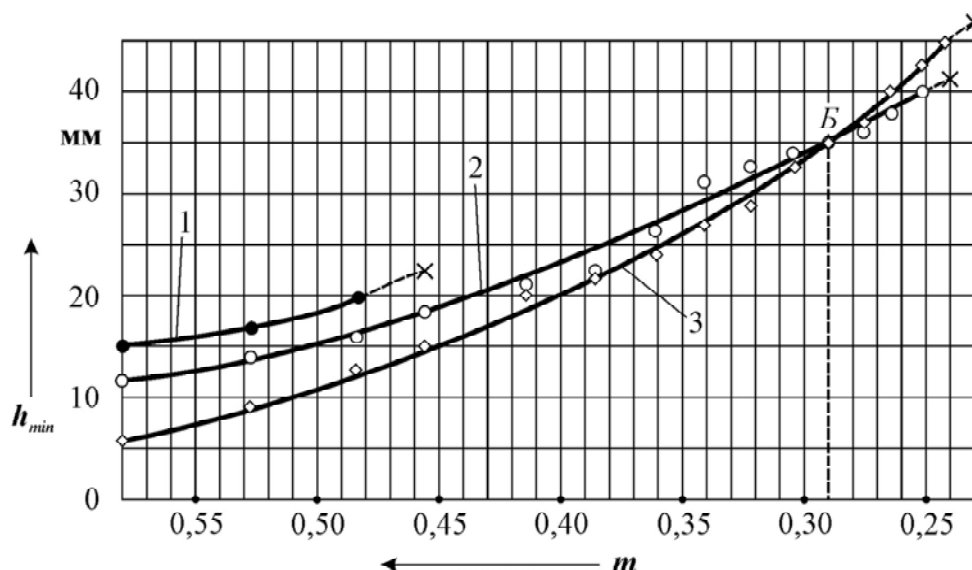


1 – кругла заготовка із листової сталі 08; 2 – кругла заготовка із сітки;
3 – квадратна заготовка із сітки; x - обрив дна

Рисунок 9 – Залежність мінімальної висоти ковпачка h_{min} від діаметру (розміру) D , форми та матеріалу вихідної заготовки

Джерело: розробка авторів

Побудована графічна залежність мінімальної висоти ковпачка h_{min} від коефіцієнта витягування m , форми та матеріалу вихідної заготовки (рис. 10).



1 – кругла заготовка із листової сталі 08; 2 – кругла заготовка із сітки;
3 – квадратна заготовка із сітки; × - обрив дна

Рисунок 10 – Залежність мінімальної висоти ковпачка h_{min} від коефіцієнта витягування m , форми та матеріалу вихідної заготовки

Джерело: розробка авторів

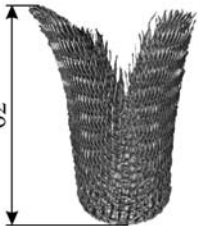
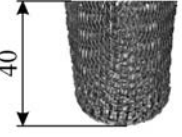
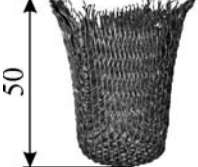
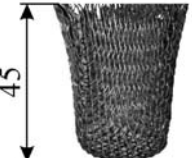
Виконано порівнювальний аналіз процесу та граничних коефіцієнтів витягування циліндричних ковпачків із різних вихідних заготовок (табл. 3), та порівнювальний аналіз циліндричних ковпачків із різних вихідних заготовок при граничних значеннях коефіцієнтів витягування m_c (табл. 4).

Таблиця 3 – Порівнювальний аналіз процесу та граничних коефіцієнтів витягування циліндричних ковпачків із різних вихідних заготовок

Вихідна заготовка		Граничний коефіцієнт витягування m_c		Площа вихідної заготовки при $h_{min} = 20$ мм, F , мм ²
		Реальний	Відносний	
Матеріал	Форма			
Листова сталь 08	Кругла	0,483	1	При $D = 60$ мм: 2826
Металева сітка	Кругла	0,252	0,52	При $D = 67$ мм: 3524
Металева сітка	Квадратна	0,242	0,50	При $D = 73$ мм: 2664

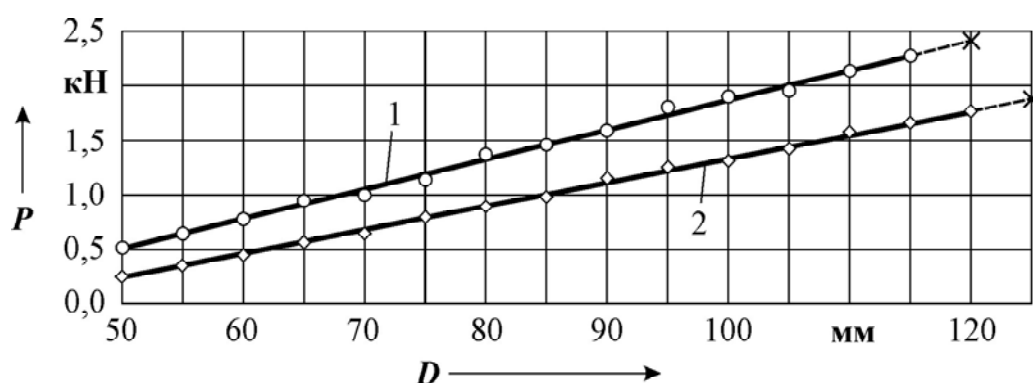
Джерело: розробка авторів

Таблиця 4 – Порівнювальний аналіз циліндричних ковпачків із різних вихідних заготовок при граничних значеннях коефіцієнтів витягування m_2

Вихідна заготовка		Фото ковпачка при $m = m_2$	
Матеріал	Форма	До обрізування	Після обрізування
Листова сталь 08	Кругла	1.1 	1.2 
Металева сітка	Кругла	2.1 	2.2 
Металева сітка	Квадратна	3.1 	3.2 

Джерело: розробка авторів

Результати експериментального дослідження впливу форми вихідної сітчастої заготовки на зусилля витягування наведено на рис. 11.



1 – кругла заготовка; 2 – квадратна заготовка

Рисунок 11 – Залежність зусилля витягування P циліндричного ковпачка із сітки від розміру (діаметру) D та форми вихідної заготовки

Джерело: розробка авторів

Результати порівнювального аналізу наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Порівнювальний аналіз впливу площі фланця круглої та квадратної сітчастої вихідної заготовки в плані на зусилля витягування

Форма вихідної заготовки	Заготовка розміром $D = 50$ мм				Заготовка розміром $D = 115$ мм			
	Площа фланцю ($F_D = 50 - F_d = 29$)		Зусилля витягування P		Площа фланцю ($F_D = 115 - F_d = 29$)		Зусилля витягування P	
	мм ²	%	кН	%	мм ²	%	кН	%
Кругла	1302	100	0,53	100	9721	100	2,26	100
Квадратна	590	54,7	0,26	51,3	5952	38,8	1,65	38,2

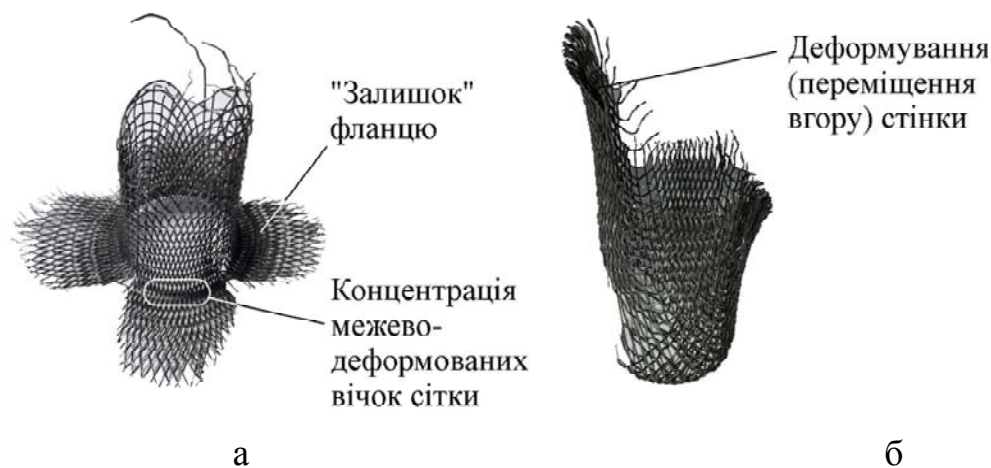
Джерело: розробка авторів

Результати експериментального дослідження впливу коефіцієнта витягування m на кількість дротів на лінії обрізування ковпачка із сітчастої круглої та квадратної вихідної заготовки наведено в таблиці 6, а характер пошкоджень ковпачків – на рис. 12.

Таблиця 6 – Результати дослідження впливу коефіцієнта витягування на кількість дротів на лінії обрізування ковпачка із сітчастої вихідної заготовки

Коефіцієнт витягування m	Розмір (діаметр) вихідної заготовки D , мм	Кількість дротів на лінії обрізування ковпачка, шт.	
		Кругла заготовка	Квадратна заготовка
0,446	65	94	78
0,252	115	160	132

Джерело: розробка авторів



а – обрив дна при витягуванні із круглої сітчастої заготовки діаметром $D = 120$ мм;
 б – обрив дна з подальшим деформуванням стінки при витягуванні із квадратної заготовки розміром $D = 125$ мм

Рисунок 12 – Характер пошкодження ковпачків при коефіцієнті витягування менше граничного
Джерело: розробка авторів

Результати аналізу якості витягування деталей із сітчастої заготовки представлено рис. 13.

Результатом виконаних вище експериментальних досліджень є пропонування нового способу витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком [16].

Результати розробки та дослідження способу витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки. Результатом розробки та дослідження є запропонований новий спосіб витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки [17], що спрямований на створення таких умов витягування, при яких граничний коефіцієнт витягування значно зменшується ($< 0,46$). Це дозволить реалізувати більш глибоке витягування деталей за один хід пресу.

Фізична сутність даного способу витягування витікає із розуміння виконання наступних умов:

- **пункт 1.** Заготовку попередньо перфорують (рис. 14, 15);



1 – ковпачок із квадратної сітчастої вихідної заготовки;
2 – опрання із паперу;
3 – місце, з якого випав короткий дріт;
4 – короткий дріт, що випав
Рисунок 13 – Ковпачок з дротом, що випав

Джерело: розробка авторів

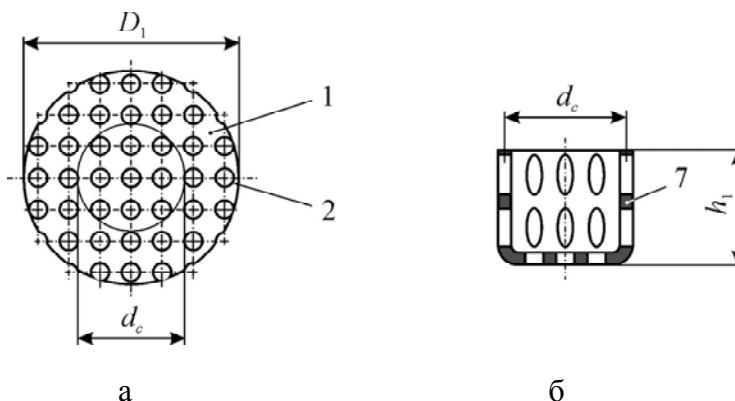
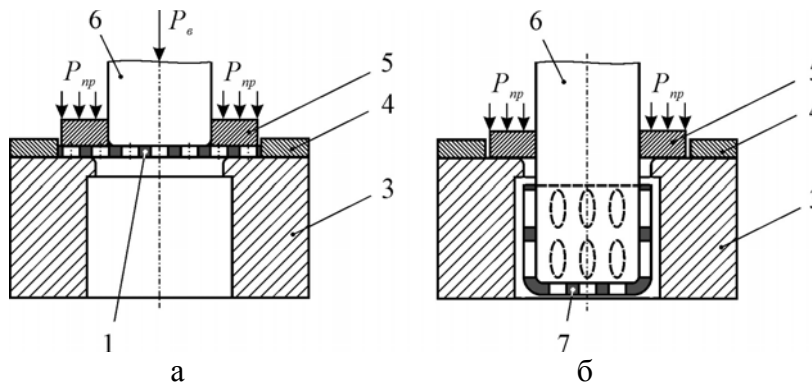


Рисунок 14 – Заготовка (а) та деталь (б) після витягування за пунктом 1

Джерело: розробка авторів



а – початкова фаза; б – кінцева фаза

Рисунок 15 – Схема роботи штампа для витягування деталі за пунктом 1

Джерело: розробка авторів

- **пункт 2.** Перфорацію заготовки виконують тільки в області фланцю, внутрішній діаметр якої дорівнює середньому діаметру d_c отриманої циліндричної деталі (рис. 16);

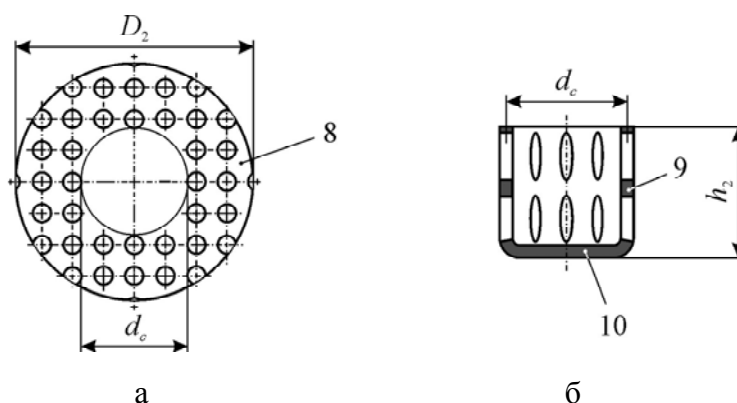


Рисунок 16 – Заготовка (а) та деталь (б) після витягування за пунктом 2

Джерело: розробка авторів

- пункт 3. Перфорацію заготовки виконують так, щоб сума Σ усіх перемичок за шириною a_i на кожному концентричному колі розташування отворів перфорації дорівнювала довжини кола за середнім діаметром d_c отриманої циліндричної деталі (рис. 17), тобто є справедливим вираз:

$$\Sigma a_i = \pi \cdot d_c .$$

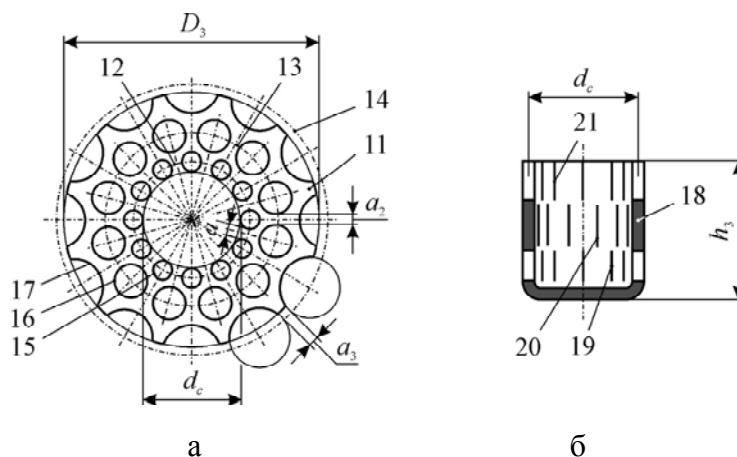


Рисунок 17 – Заготовка (а) та деталь (б) після витягування за пунктом 3

Джерело: розробка авторів

Результати випробування нового способу витягування наведені на рис. 18, в таблиці 7 та на рис. 19.

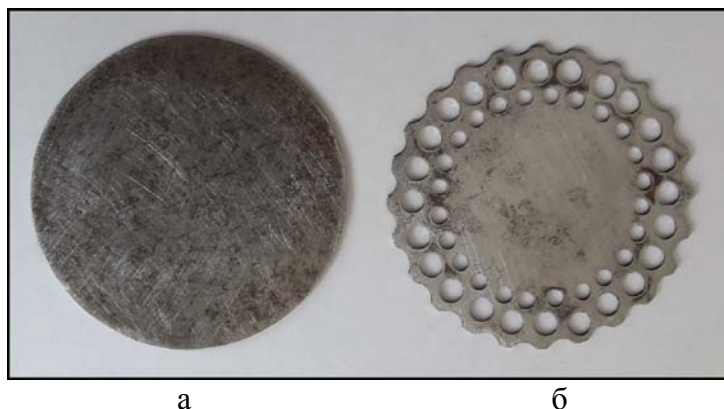
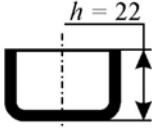
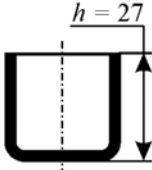
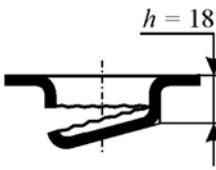
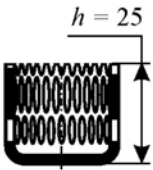


Рисунок 18 – Приклад суцільної (а) та не суцільної (б) заготовки

Джерело: розробка авторів

Таблиця 7 – Результати випробування нового способу витягування

Матеріал заготовки	Діаметр заготовки, D , мм	Діаметр ковпачка за середньою лінією, d_c , мм	Коефіцієнт витягування, m	Ескіз витягнутого ковпачка	
				із суцільної заготовки	із не суцільної заготовки
Сталь 08	55	29	0,52		—
	60		0,48		—
	65		0,44		



а

б

Рисунок 19 – Зразки, що отримані в рівних умовах при коефіцієнті витягування $m = 0,44$ із суцільної (а) та не суцільної (б) заготовок*Джерело: розробка авторів*

Обговорення результатів розробки та дослідження способу витягування циліндричних деталей із металевої сітки. Як бачимо (табл. 1), в процесі витягування циліндричного ковпачка із круглої заготовки (фрагмент 1.1) спостерігається інтенсивне

симетричне осьове втягування у матрицю сітки у напрямках, що співпадають з напрямками дротів в сітці (кути 0° , 90° , 180° , 270°). В той же час у напрямках, що відповідають кутам 45° , 135° , 225° , 315° , сітка одночасно втягується в матрицю та деформується (кожне вічко сітки в напрямку втягування в матрицю подовжується). Тому інтенсивність втягування периферії заготовки в матрицю зменшується (фрагменти 1.2 – 1.4). В наслідок даного явища круглий початковий контур вихідної заготовки поступово викривляється і на фланці утворюється «залишок» (фрагмент 1.5), який не використовується і підлягає обрізуванню. В процесі витягування циліндричного ковпачка із квадратної заготовки (фрагмент 2.1) також спостерігається інтенсивне симетричне осьове втягування у матрицю сітки у напрямках, що співпадають з напрямками дротів в сітці (кути 0° , 90° , 180° , 270°). В той же час у напрямках, що відповідають кутам 45° , 135° , 225° , 315° , сітка також одночасно втягується в матрицю та деформується (кожне вічко сітки в напрямку втягування в матрицю подовжується). Тому інтенсивність втягування периферії заготовки в матрицю зменшується (фрагменти 2.2 – 2.4). В наслідок даного явища квадратний початковий контур вихідної заготовки поступово перетворюється у круглий, а «залишок» на фланці практично не утворюється (фрагмент 2.5).

Таким чином, витягування із квадратної сітчастої вихідної заготовки дозволяє суттєво зменшити собівартість штампування деталей за рахунок зменшення площі вихідної заготовки.

Із рис. 9 виходить, що із підвищенням діаметру (розміру) вихідної заготовки D мінімальна висота ковпачка h_{min} зростає, але до певної межі. Дана межа визначається граничним значенням коефіцієнта витягування (рис. 10), який найменший для квадратної заготовки із сітки (див. табл. 3, значення $m_e = 0,252$). Так, для круглої вихідної заготовки із листової сталі 08 мінімальна висота ковпачка $h_{min} = 20$ мм, для круглої заготовки із сітки – 40 мм, а для квадратної заготовки із сітки – 45 мм (табл. 4). Як бачимо, найкращі показники за цим фактором спостерігаються при витягуванні із квадратної сітчастої заготовки.

Крім того, із таблиці 3 видно, що для отримання ковпачка мінімальної висотою 20 мм, доцільно використати квадратну сітчасту заготовку як таку, яка володіє найменшою площею: площа квадратної сітчастої вихідної заготовки на 5,7 % менша площі круглої вихідної заготовки із листової сталі 08 та на 24,4 % менша площі круглої вихідної заготовки із сітки. Використання квадратної сітчастої вихідної заготовки дозволяє суттєво зменшити собівартість витягнутого із неї виробу.

Із залежності, що представлена на рис. 11 виходить наступне: із підвищенням розміру (діаметру) D вихідної заготовки зусилля витягування P лінійно збільшується і для круглої, і для квадратної заготовки. Однак, інтенсивність збільшення зусилля витягування із квадратної заготовки менша. Для пояснення цього явища порівняємо відсоток зменшення зусилля витягування квадратної заготовки по відношенню до круглої з відсотком зменшення площі фланця квадратної заготовки по відношенню до круглої для діаметрально протилежних точок на графіку: для заготовок розміром $D = 50$ мм та $D = 115$ мм (див. табл. 5). Як бачимо, при витягуванні ковпачка із вихідної заготовки розміром $D = 50$ мм, зменшення площі фланця квадратної заготовки до 54,7 % від площі круглої заготовки приводить до практично такому ж зменшенні зусилля витягування (до 51,3 % від зусилля витягування круглої заготовки). Аналогічна ситуація відбувається і при витягуванні ковпачка із вихідної заготовки розміром $D = 115$ мм: зменшення площі фланця квадратної заготовки до 38,8 % від площі круглої заготовки приводить до такому ж зменшенні зусилля витягування (до 38,2 % від зусилля витягування круглої заготовки). Отже, можна стверджувати, що зусилля

витягування P циліндричного ковпачка із сітки пропорційно площі фланцю вихідної заготовки.

Слід відмітити, що фізичний механізм витягування циліндричних ковпачків із сітчастої вихідної заготовки принципово відрізняється від фізичного механізму їх витягування із листової (суцільної) вихідної заготовки. В останньому випадку за Зубцовим М. Ю. [1] процес витягування супроводжується пластичним деформуванням заготовки у фланці для витискування надлишкових трикутників із фланця в циліндричну частину. В той же час при витягуванні циліндричних ковпачків із сітчастої вихідної заготовки таких надлишкових трикутників немає. Матеріал сітки лише втягується в матрицю, а плоска форма фланцю вихідної заготовки перетворюється в циліндричну за рахунок деформації вічок сітки. Таким чином, дроти стрічки, що співпадають та наближені до осей матриці в плані, в процесі витягування ковпачка випробують такі ж деформації, як при гнутті. Більш складну деформацію випробують дроти стрічки, які віддалені від осей матриці на відстань більшу її радіуса. Вони випробують одночасно складне гнуття (гнуття у двох площинах). При цьому периферійна частина вічок сітки безперервно деформується: витягується в бік від квадрату до ромбу. Із зменшенням коефіцієнта витягування (тобто при підвищенні діаметра вихідної заготовки) кількість деформованих «ромбів» у вхідному перерізі матриці, а отже кількість дротів сітки, зростає. Останнє підтверджується результатами дослідження кількості дротів сітки на лінії обрізування ковпачка при великому ($m = 0,446$; $D = 65$ мм) та малому ($m = 0,252$; $D = 115$ мм) коефіцієнті витягування для круглої та квадратної сітчастої вихідної заготовки (див. табл. 6). Як бачимо, і для круглої, і для квадратної сітчастої заготовки із зменшенням коефіцієнта витягування, кількість дротів сітки на лінії обрізування ковпачка за висотою h_{min} зростає, але дана кількість на 17% менша для квадратної заготовки. Саме тому, граничний коефіцієнт витягування для квадратної вихідної заготовки завжди менший коефіцієнта витягування для круглої вихідної заготовки.

При граничному значенні коефіцієнта витягування кількість дротів сітки на вхідному перерізі матриці збільшується настільки, що подальше витягування «ромбів» в напрямку штампування потребує значного збільшення зусилля. По суті, настає момент переходу пластичного гнуття вічок сітки у холодне об'ємне розтягання її складових дротів. Тому, при подальшому зменшенні коефіцієнта витягування нижче граничного значення, найбільш навантажені тертям дроти сітки починають розриватися (див. рис. 12).

Особливістю витягування деталей із сітчастої заготовки є те, що вічка сітки на різних за геометрією її поверхнях деформуються по різному.

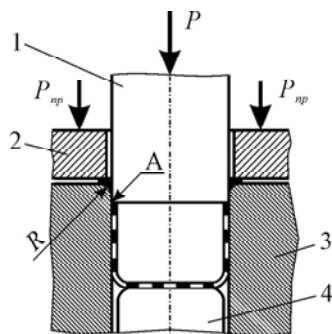
Так, найменш викривляється вічка на торцевій поверхні (дні) ковпачка. Цю властивість використовують, коли потрібно виготовити деталь з не викривленими вічками. Звичайно такі деталі являють собою неглибокі ковпачки, що доцільно штампувати із круглої сітчастої вихідної заготовки з відносно великим коефіцієнтом витягування m , який змінюється у межах від 0,6 до 0,4 (рис. 10). Донна поверхня таких деталей може бути плоскою або сферичною.

Викривлення вічок сітки на циліндричній поверхні збільшується за напрямком від дна ковпачка до його торця. Воно супроводжується деформацією у напрямку зменшення горизонтальної та збільшення вертикальної діагоналей вічка. На циліндричній поверхні ковпачка утворюється характерний малюнок, який можна використати для декоративного оздоблення деталей із сітки (наприклад, для виготовлення кожухів мікрофонів). Оскільки такі деталі являють собою глибокі

ковпачки, їх доцільно виготовляти із квадратної сітчастої вихідної заготовки з коефіцієнтом витягування m , що наближається до граничного m_z (рис. 10).

Слід відмітити, що короткі дроти стрічки на циліндричній поверхні ковпачка, які V-подібно вигнуті поблизу лінії обрізування, мають недостатній зв'язок з іншими дротами, а тому можуть випадати (рис. 13).

Для забезпечення якісного та точного ковпачка рекомендується його витягувати із вихідної заготовки, що має припуск на подальше обрізування. Величина припуску повинна бути не менше 2 – 3 розмірів в світлі вічка сітки.



- 1 – ступінчастий пуансон;
2 – притискач; 3 – матриця;
4 – притискач-виштовхувач;
A – гостра кромка

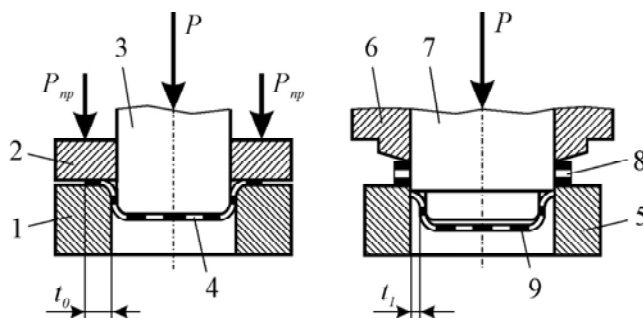
Рисунок 20 – Схема робочої зони штампа для одночасного витягування та обрізування ковпачка із сітчастої заготовки
Джерело: розробка авторів

Крім того, рекомендується сполучати витягування з обрізуванням на одному штампі (рис. 20). З цією метою в штампі використовується ступінчастий пуансон 1, який в останній момент штампування «перекушує» дроти стрічки по лінії обрізування.

У випадку, коли циліндричний ковпачок має невеликий фланець для кріплення деталі у вузлу, доцільно штампувати деталь на двох окремих штампах: в штампі для витягування та в штампі для обрізування (рис. 21). Навіть коли короткий дріт поблизу лінії обрізування випаде, це місце буде закрито елементом кріплення ковпачка у вузлі.

В запропонованому новому способі витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком [16] процес здійснюють із квадратної заготовки, сторони якої паралельні діагоналям вічка сітки. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких нерівномірність висоти

циліндричної частини деталі суттєво зменшується, що дозволяє на 35-40% знизити собівартість штампування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком.



- а – штамп для витягування; б – штамп для обрізування; 1 – витяжна матриця; 2 – притискач;
3 – витяжний пуансон; 4 – заготовка після витягування; 5 – обрізна матриця; 6 – ніж для розрізування відходів; 7 – пуансон для обрізування; 8 – відходи від обрізування; 9 – деталь після обрізування

Рисунок 21 – Схеми штампів для виготовлення циліндричного ковпачка із невеликим фланцем із сітчастої вихідної заготовки:

Джерело: розробка авторів

Обговорення результатів розробки та дослідження способу витягування циліндричних деталей із перфорованої заготовки. Із рис. 14, 15 бачимо, що реалізацію нового способу витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки [17] за **пунктом 1** здійснюють із перфорованої заготовки. Завдяки наявності на заготовці отворів перфорації 2 зусилля витягування зменшується, а це дозволяє підвищити глибину витягування деталей за одну технологічну операцію.

Якщо за **пунктом 2** (див. рис. 16) перфорацію заготовки 8 виконати тільки в області фланцю, внутрішній діаметр якої дорівнює середньому діаметру d_c отриманої циліндричної деталі 9, то дно 10 деталі 9 посилюється. Тому є можливим підвищити діаметр вихідної заготовки 8 з D_1 до D_2 і тим самим ще зменшити коефіцієнт витягування. Це, в свою чергу, дозволяє підвищити глибину витягування деталі 9 з h_1 (рис. 14) до h_2 .

Якщо виконується умова за **пунктом 3** (див. рис. 17, 18), то зусилля витягування деталі 18 ще більше зменшується. Тому є можливим ще підвищити діаметр вихідної заготовки 11 з D_2 (рис. 16) до D_3 і тим самим ще зменшити коефіцієнт витягування. Спосіб витягування за **пунктом 3** дозволяє отримати найбільшу глибину витягування h_3 деталі 18 так, що стає справедливим співвідношення: $h_1 < h_2 < h_3$. Крім того, точне виконання на заготовці 11 перемичок a_1, a_2, a_3 та розрахованих за вказаним принципом залежних від них діаметрів отворів 15, 16, 17 дозволяють отримати деталь 18 із закритими, або майже закритими отворами перфорації 19, 20, 21.

Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови, при яких граничний коефіцієнт витягування значно зменшується (див. табл. 7, рис. 19), що дозволяє реалізувати більш глибоке витягування деталей за один хід пресу.

Висновки. Внаслідок вивчення морфології зміни форми фланцю в процесі витягування ковпачка із круглої та квадратної сітчастої вихідної заготовки виявлено явище утворення на фланці круглої заготовки чотирьох симетрично розташованих «залишків» сітки, які не використовуються і підлягають обрізуванню. В той же час показано, що квадратний контур вихідної заготовки поступово перетворюється у круглий, а «залишок» на фланці практично не утворюється. Дане явище пов'язано з інтенсивним деформуванням вічок сітки при витягуванні в діагональному напрямку. Показано, що із підвищенням діаметру (розміру) вихідної заготовки D мінімальна висота ковпачка h_{min} зростає, але до певної межі. Дана межа визначається граничним значенням коефіцієнта витягування, який найменший для квадратної заготовки із сітки ($m_c = 0,252$). Доведено, що при однаковій висоті витягування, площа квадратної сітчастої вихідної заготовки на 5,7 % менша площі круглої вихідної заготовки із листової сталі 08 та на 24,4 % менша площі круглої вихідної заготовки із сітки. Використання квадратної сітчастої вихідної заготовки дозволяє суттєво зменшити собівартість витягнутого із неї виробу. Експериментально доведено, що зусилля витягування циліндричного ковпачка із сітки пропорційно площі фланцю вихідної заготовки. За цією причиною, при рівності діаметра круглої та діагоналі квадратної вихідних заготовок, зусилля витягування із квадратної заготовки завжди менше. Встановлено, що при граничному значенні коефіцієнта витягування кількість дротів сітки на вхідному перерізі матриці збільшується настільки, що подальше витягування «ромбів» в напрямку штампування потребує значного збільшення зусилля. Концентрація «ромбів» приводить до моменту переходу пластичного гнуття вічок сітки у холодне об'ємне розтягання її складових дротів. Тому, при зменшенні коефіцієнта витягування нижче граничного значення, найбільш навантажені тертям дроти сітки починають розриватися. Встановлено, що вічка сітки на різних за геометрією її поверхнях деформуються по різному. Дані пропозиції щодо раціональної розробки

технологічних процесів витягування деталей із сітки з урахуванням цього фактору. За результатами виконаних досліджень запропоновано новий спосіб витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком, який відрізняється тим, що витягування здійснюють із квадратної заготовки, сторони якої паралельні діагоналям вічка сітки. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких нерівномірність висоти циліндричної частини деталі суттєво зменшується, що дозволяє на 35-40% знизити собівартість штампування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком.

Запропоновано та експериментально випробувано новий спосіб витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки, який відрізняється тим, що заготовку попередньо перфорують; перфорацію заготовки виконують тільки в області фланцю, внутрішній діаметр якої дорівнює середньому діаметру d_c отриманої циліндричної деталі; перфорацію заготовки виконують так, щоб сума Σ усіх перемичок за шириною a_i на кожному концентричному колі розташування отворів перфорації дорівнювала довжини кола за середнім діаметром d_c отриманої циліндричної деталі, тобто є справедливим вираз: $\Sigma a_i = \pi \cdot d_c$. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, створює такі умови витягування, при яких граничний коефіцієнт витягування значно зменшується ($< 0,46$), що дозволяє реалізувати більш глибоке витягування деталей за один хід пресу.

Список літератури

1. Ковка и штамповка. Т. 1. Листовая штамповка: справочник / под ред. А. Д. Матвеева; Ред. совет: Е. И. Семёнов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1985-1987. 544 с.
2. Suchy I. Handbook of Die Design, 2-nd ed. New York: McGraw-Hill; 2006.
3. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: учеб. . 3-е изд. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. 432 с.
4. Oluwole O. O., Anyaech C. O., Faola O. V. Effect of draw ratio and sheet thickness on earing and drawability of Al 1200 cups. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. 2010; 9 (5): 461 – 470. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2010.95032>.
5. Ramirez F. J., Domingo R., Packianather M. S., Sebastian M. A. Enhancing multistage deep-drawing and ironing manufacturing processes of axisymmetric components: analysis and experimentation. International Journal of Manufacturing Engineering. 2014; 2014(596128). <http://dx.doi.org/10.1155/2014/596128>
6. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 60-е изд., пере раб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.
7. Боков В. М. Конструювання та виготовлення штампів. Проектування штампів: формозмінних, складної дії, для складання та автоматичного штампування: навч. посіб. . Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2010. 322 с.
8. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
9. Dong Weiping, Wang Qichao, Wayg Xiaoming, Wang Bin. Stress analysis of cylindrical parts during deep drawing based on Dynaform. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 423 (2018) 012166. doi:10.1088/1757-899X/423/1/012166
10. Ravi Kumar D. F. Formability analysis of extra-deep drawing steel. Journal of Materials Processing Technology. 2002;130-131:31-41. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0113\(02\)00789-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0113(02)00789-6)
11. Ehsan Karajibani 1, Ali Fazli 2, Ramin Hashemi. Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer metallic sheets. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6978-5>
12. Savas V, Secgin O (2010). An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. Int J Mater Form 3(3):209-213. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0672-9>
13. M. Mahmoodi, H. Sohrabi. Using the Taguchi Method for Experimental and Numerical Investigation on Square-Cup Deep-Drawing Process for Aluminum/Steel Laminated Sheets. Mechanics of Advanced Composite Structures 4 (2017) 169-177.

14. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 1. 5-е изд. М.: Машиностроение, 1989. 728 с.
15. Сетка для микрофона DPA microphones DUA0710N. URL: <https://muzline.ua/dpa-microphones-dua0710n/> (дата обращения: 14.10.2020)
16. Спосіб витягування циліндричних деталей із плоскої металевої сітки з квадратним вічком: пат. 143027 Україна: МПК В26F 1/40, В21D 22/00, u2019 12214; заявл. 24.12.2019; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 13.
17. Спосіб витягування деталей з притиском фланцю плоскої листової заготовки: пат. 138268 Україна: МПК В26F 1/40, В21D 22/00. u2019 04647; заявл. 02.05.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22.

References

1. Matveeva, A.D. (Eds.). (1985-1987). Forging and stamping. Vol. 1. Sheet stamping. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Suchy, I. (2006). Handbook of Die Design, 2-nd ed. New York: McGraw-Hill [in English].
3. Zubcov, M. E. (1980). *Sheet stamping*. (3d ed.). L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie [in Russian].
4. Oluwole O. O., Anyaech C. O., Faola O. V. Effect of draw ratio and sheet thickness on earing and drawability of Al 1200 cups. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. 2010; 9 (5): 461 – 470. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2010.95032>. [in English].
5. Ramirez F. J., Domingo R., Packianather M. S., Sebastian M. A. Enhancing multistage deep-drawing and ironing manufacturing processes of axisymmetric components: analysis and experimentation. International Journal of Manufacturing Engineering. 2014; 2014(596128). <http://dx.doi.org/10.1155/2014/596128> [in English].
6. Romanovskij, V.P. (1979). *Cold Forging Handbook*. (60th ed.). L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie [in Russian].
7. Bokov, V.M. (2010). *Konstruiuvannia ta vyhotovlennia shtampiv. Proektuvannia shtampiv: formozminnykh, skladnoi dii, dlia skladannia ta avtomatichnoho shtampuvannia: navchal'nyj posibnyk* [Design and manufacture of stamps. Design of stamps: changeable, complex action, for assembly and automatic stamping]. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychyj tsentr TOV «Imeks-LTD» [in Ukrainian]
8. Popov, E.A. (1977). *Osnovy teorii listovoj shtampovki* [Fundamentals of the theory of sheet stamping]. M.: Mashinostroenie [in Russian].
9. Dong Weiping, Wang Qichao, Wayg Xiaoming, Wang Bin. Stress analysis of cylindrical parts during deep drawing based on Dynaform. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 423 (2018) 012166. doi:10.1088/1757-899X/423/1/012166 [in English].
10. Ravi Kumar D. F. Formability analysis of extra-deep drawing steel. Journal of Materials Processing Technology. 2002;130-131:31-41. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924 01136 \(02\) 00789-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924 01136 (02) 00789-6) [in English].
11. Ehsan Karajibani 1, Ali Fazli 2, Ramin Hashemi. Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer metallic sheets. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6978-5> [in English].
12. Savas V, Secgin O (2010). An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. Int J Mater Form 3(3):209-213. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0672-9> [in English].
13. M. Mahmoodi, H. Sohrabi. Using the Taguchi Method for Experimental and Numerical Investigation on Square-Cup Deep-Drawing Process for Aluminum/Steel Laminated Sheets. Mechanics of Advanced Composite Structures 4 (2017) 169-177. [in English].
14. Anur'ev, V.I. (1989). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja* [Handbook of the designer-machine builder]. Vol. 1. (5th ed.). Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
15. Setka dlja mikroфона DPA microphones DUA0710N [Grid for microphone DPA microphones DUA0710N]. Retrieved from <https://muzline.ua/dpa-microphones-dua0710n/> [in Russian].
16. Sposib vytiahuvannia tsylindrychnykh detalej iz ploskoi metalevoi sitky z kvadratnym vichkom [Method of extracting cylindrical parts from flat metal mesh with square mesh]: pat. 143027 Ukraina: MPK V26F 1/40, V21D 22/00, u2019 12214; zaiavl. 24.12.2019; opubl. 10.07.2020, Biul. № 13 [in Ukrainian].
17. Sposib vytiahuvannia detalej z prytyskom flantsiu ploskoi lystovoi zahotovky [Method of extracting parts with flange clamp of flat sheet blank]. pat. 138268 Ukraina: MPK V26F 1/40, V21D 22/00. u2019 04647; zaiavl. 02.05.2019; opubl. 25.11.2019, Biul. № 22 [in Ukrainian].

Victor Bokov, Prof., PhD tech. sci., **Oleh Sisa**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Pavlenko**, Prof., DSc.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Drawing Cylindrical Parts From Non-Continuous

A new method for drawing cylindrical parts from a flat metal mesh netting with square openings has been proposed, developed and investigated. According to this method, drawing is carried out from a square workpiece, whose sides are parallel to the diagonals of the netting mesh. A new method of drawing parts with flange clamping of a sheet workpiece has been proposed and experimentally tested, which differs in that the workpiece is pre-perforated; perforation of the workpiece is performed only in the flange area, whose inner diameter is equal to the average diameter d_c of the cylindrical part obtained; perforation of the workpiece is performed so that the sum Σ of all jumpers by the width a_i on each concentric circle of the location of the perforation holes is equal to the circumference at the average diameter d_c of the cylindrical part obtained, i.e. formula $\Sigma a_i = \pi \cdot d_c$ is valid. The use of the proposed method, in comparison with the known one, creates such conditions for drawing, under which the limiting drawing ratio becomes significantly lower ($< 0,46$), which makes it possible to conduct a deeper drawing of parts in one press run.

The scientific novelty of this research is as follows. Usually, when manufacturing parts such as caps or box shapes, stamping is used in several runs to avoid the phenomenon of tearing-off of the bottom. However, the use of stamping in several runs leads to a complication of the process equipment and an increase in the cost of the product, which is justified only for cases of obtaining a high-quality product and provided that the integrity of the part is intact at a considerable depth. When trying to draw parts of considerable depth, objective difficulties arise associated with breaking-off of the bottom, which are due to exceeding by the tensile stresses in the critical section of the workpiece (between the bottom and lateral surfaces) of the ultimate tensile strength σ_s of the latter. As part of the research described in this article, a way to overcome those difficulties has been proposed. It is based on the fact that when implementing the stamping process at lower values of the drawing ratio than the critical one, a metal mesh netting or perforated workpiece is used, and tearing-off of the bottom is therefore no longer observed. This method made it possible to obtain an integral shape of the part while using a significant depth of drawing due to the prior perforation of the workpiece, which significantly reduces the cost of the product. That means that the obtained scientific result in the form of a proposed kinetic description of the stamping process compared to the known one creates such drawing conditions, under which the unevenness of the height of the cylindrical portion of the part is significantly reduced, which in turn reduces by 35-40% the cost of stamping cylindrical parts from a flat metal mesh netting with square openings. This result is interesting from a theoretical point of view. As far as the practical point of view is concerned, a mechanism of transition of plastic bending of netting meshes into cold volumetric expanding of its constituent wires has been revealed, which makes it possible to determine the conditions for using the process of manufacturing parts from metal mesh netting or perforated workpieces.

Consequently, an applied aspect of using the scientific result obtained is the possibility of improving the typical technological process of stamping, where the stamping force will be significantly reduced and hence the stress in the critical section, which will make it possible to reduce significantly the limiting drawing ratio and increase the depth of stamping. This constitutes prerequisites for the transfer of the obtained technological solutions of the process of drawing from a metal mesh netting or a perforated workpiece.

drawing of cylindrical parts, metal mesh netting, square workpiece, perforation, drawing ratio

Одержано (Received) 27.07.2021

Прорецензовано (Reviewed) 08.09.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.891:631

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.169-174>

Ю.В.Кулешков, проф., д-р техн. наук, **М.І. Черновол**, проф., академік НААН України, д-р техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **Є.К. Солових**, проф., д-р техн. наук, **Р.А. Осін**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет м. Кропивницький, Україна
e-mail: kul090455@gmail.com; krasotamv@ukr.net; r-t-v@mail.ua; ruslan_osin@ukr.net

Підвищення довговічності турбокомпресора внаслідок ремонтного впливу

Для відновлення деталей машин можуть застосовуватися різноманітні способи відновлення і зміцнення. Однак далеко не всі способи можуть забезпечити необхідний ресурс для відновлення і зміцнення деталей, що працюють в абразивному та корозійному середовищі середовищах. Одним із сучасних напрямків підвищення зносостійкості та іншими властивостями відновлювальних покриттів є використання композиційних матеріалів. В цій статті представлені результати досліджень щодо розробки нового способу відновлення і зміцнення деталей композиційними матеріалами заснованими на використанні хімічного парофазного осадження металів CVD - методу (Chemicikal Vapor Deposition) шляхом розкладання металоорганічних сполук. Показано, що розроблений композитний матеріал, отриманий CVD – методом розкладання металоорганічних забезпечує підвищення зносостійкості не менше ніж в 2,0...2,2 раз в порівнянні з новими деталями.

композиційний матеріал, парофазне осадження металів, Chemicikal Vapor Deposition – метод, розкладання металоорганічних сполук

Постановка завдання. Турбокомпресор призначений для примусової подачі в циліндри двигуна збільшеного заряду повітря. Це сприяє поліпшенню процесу згоряння палива, підвищенню середнього індикаторного тиску, об'ємній потужності і зменшенню питомої маси дизеля без істотної зміни його габаритних розмірів. Наддування є загально визнаним і найбільш раціональним напрямком форсування ДВЗ.

В дизелях з газотурбінним наддувом досягається часткове використання енергії газів, що відпрацювали, в результаті чого підвищується термічний ККД і потужність дизеля. За умови правильного вибору турбокомпресора і системи наддуву для даного дизеля забезпечується істотне підвищення економічності без зниження його ресурсу і надійності.

Турбокомпресор складається з відцентрового одноступінчатого компресора з лопатковим дифузоров і радіальною відцентровою турбіною.

Вал ротора турбокомпресора обертається в бронзовому підшипнику типу хитної втулки. Підшипник, встановлений в центральній бобищі середнього корпусу з визначеним зазором. Шар мастила в зазорі між підшипником, втулкою і центральною бобишкою середнього корпусу, подається під тиском 294...392 кПа. Підшипник турбокомпресора змащується мастилом, що надходить по каналу, просвердленому в середньому корпусі.

Звичайно турбокомпресор працює при високих частотах обертання - $n=20000...45000 \text{ хв}^{-1}$ та в умовах підвищених температур відпрацьованих газів – 400...500°C, які містять хімічно агресивні сполучення. Ці особливості накладають істотний відбиток на роботу спряжень турбокомпресора.

Так, попадання абразиву разом з мастилом в підшипниковий вузол через високу частоту обертання валу турбокомпресора, веде до виходу його з ладу внаслідок зносу, як самого вала так і підшипника та отвору в бобишці середнього корпусу.

Термічні напруги, що виникають при роботі турбокомпресора можуть привести до виникнення тріщин в корпусі турбіни. Пошкоджені ущільнення і попадання газів, що відпрацювали, в середній корпус веде до нагрівання підшипника і виходу його з ладу. Всі ці дефекти та пошкодження можуть привести до виходу турбокомпресора з ладу, експлуатація турбокомпресора при таких дефектах неприпустима.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі аналізу впливу ряду факторів: навантаження, частоти обертання, ступеня забруднення мастильного середовища, конструктивних особливостей вузлів, сполучень на інтенсивність зношування та динаміку накопичення втомних пошкоджень, а також з урахуванням накопиченого досвіду підвищення працездатності деталей та вузлів були проаналізовані можливі шляхи підвищення довговічності, деталей внаслідок рементного впливу.

Необхідно відмітити, що абразивне зношування превалює над усіма іншими: близько 40% деталей мають чисто абразивне зношування і 50% – абразивне зношування в комбінації з іншими видами зношування й руйнувань поверхневого шару [1].

Постановка проблеми. Поступовий знос в процесі експлуатації характерний для валу турбокомпресора, підшипника і центрального отвору бобишки середнього корпусу, ці поверхні найбільш піддаються зминанню і механічному стиранню.

Робоче колесо турбіни піддається, головним чином, газовій корозії. Для робочого колеса компресора більш характерним є абразивний знос частками, що попадають разом з повітрям, що нагнітається.

Таким чином, бачимо, що практично всі деталі турбокомпресора піддаються зносу. Найбільше зустрічається пошкодження середнього корпусу турбокомпресора.

Середній корпус турбокомпресора – деталь до якої кріпиться корпус турбіни і компресора, в якому монтуються підшипниковий вузол турбокомпресора.

Середній корпус компресора виготовляється з алюмінієвого сплаву АЛ-9 виливанням в кокіль з послідуною механічною обробкою.

Основними дефектами корпусу середнього є зношування отворів під втулку.

Причиною зношування отвору під втулку слідє рахувати зминання і механічне стирання, а при утворенні зазору достатньої величини превалюючим є абразивне зношування.

У випадку наявності абразивного зношування механічне пошкодження поверхневого шару відбувається в результаті мікрорізання і дряпання абразивними частинками [1].

Величина зношування центрального отвору під втулку, як правило, не перевищує 0,5...0,6 мм на діаметр, а в 80 % випадках складає 0,1...0,2мм. Зношування зовнішніх поверхонь середнього корпусу незначне, рідко перевищує 0,25...0,30 мм на діаметр.

Турбокомпресор є загалом швидкохідною машиною (частота обертання валу досягає 45000 хв⁻¹) що працює в умовах підвищених температур. Тому будь-які пошкодження його деталей, а особливо середнього корпусу суттєво впливають на працездатність турбокомпресора.

Так пошкодження проушин та різьби під шпильки може призвести до порушення герметичності, прориву відпрацьованих газів в середній корпус, що може викликати прискорене зношування його підшипникового вузла і виходу турбокомпресора з ладу.

З іншого боку зниження тиску масла призведе до швидкого виходу з ладу

підшипникового вузла, оскільки при недостатньому тиску масла, вал компресора буде безпосередньо контактувати з втулкою, що при таких обертах призведе до швидкого її нагрівання і зношування.

Зношування центрального отвору під втулку веде до порушення вихідної посадки спряження корпус-середній-втулка, що призводить до провертання втулки в корпусі, розігрівання підшипникового вузла до швидкого виходу з ладу, що призводить до аварійного виходу з ладу всього турбокомпресору.

Конструкційні матеріали, поверхні яких мали б одночасно високі характеристиками міцності, а також антифрикційні і антикорозійні властивості, можуть бути отримані шляхом нанесення спеціальних покриттів. Для нанесення покриттів із заданими фізико-механічними властивостями існують різні технології. Однією з найбільш перспективних в цій області можна визнати технологію хімічного парофазного осадження (CVD-метод). Даний метод практично не має обмежень за хімічним складом застосовуваних для нанесення матеріалів [2, 3].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка пропозицій щодо підвищення довговічності алюмінієвих деталей турбокомпресора під час їх відновного ремонту шляхом зміцнення найбільш відповідальних робочих поверхонь хімічним парофазним осадженням металів (Chemical Vapor Deposition).

Результати вирішення основних завдань. Реальний шлях підвищення довговічності отвору під втулку - отримання на поверхні зміцнюючого покриття із заданими фізико механічними властивостями. Отримувані покриття повинні добре чинити опір абразивному зношуванню.

Дослідженнями багатьох авторів було доведено, що для максимального підвищення зносостійкості з'єднань, що працюють в умовах корозійного, механічного і абразивного зношування поверхні деталей повинна бути хімічно інертними до хімічно агресивних компонентів і володіти мікротвердістю не нижче 17 ГПа. У цьому випадку вплив абразивних частинок на поверхню набуває характеру пружного відтискування, а не різання [4].

Одним з найбільш перспективних напрямків, в області отримання покриттів із заданими фізичними, хімічними і механічними властивостями, є спосіб «хімічного парофазного осадження» металів (Chemical Vapor Deposition). Цей метод дає можливість отримувати широкий спектр різних за хімічним складом, структурою та властивостями нано, мікро і макро покриттів. При цьому твердість отриманих покриттів може сягати значень, що суттєво перевищують 17 ГПа

Якщо порівняти CVD-процес з іншими методами отримання металевих покриттів, такими як гальванічне осадження, дифузійна металізація, газополуменового і плазмового напилення, лазерна і газопорошкового наплавлення та інші, то можна відзначити наступні переваги:

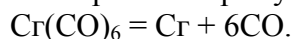
- висока швидкість металізації до 10 мкм / хв;
- висока щільність (беспористість) покриттів, що пояснюється особливим механізмом зростання шару (при термічному розпаді, атоми решітки металу розташовуються впритул один за одним, забезпечуючи майже теоретичну щільність незалежно від матеріалу деталі), що дозволяє отримувати шорсткість поверхні $R=2.5...0.32$ мкм;
- технологія CVD-процесу дозволяє здійснювати рівномірне осадження на поверхню підкладки, що забезпечує нанесення покриття на поверхню складної конфігурації;
- мікротвердість покриттів до 32,0 ГПа;
- міцність зчеплення покриття з матеріалом підкладки до 260 МПа;

- температурні інтервали ведення процесу від 70 до 650 °С;
- можливість металізації металів і неметалічних матеріалів (кераміки, пластмас, гуми та ін.);
- процес екологічно чистий проводиться по замкнутому циклу і легко піддається автоматизації [4, 5].

Суть методу термічного розкладання МОС в газовій фазі полягає в тому, що вихідна сполука, яка була в рідкому або твердому стані, перекладається в газоподібний шляхом випаровування або сублімації. Отримана газова суміш подається в реакційну камеру. При попаданні на парів МОС на поверхню деталі, яка нагрівається до температури розкладання використовуваної сполуки МОС відбувається металізація цієї поверхні.

Осадження покриттів може проводитися як у вакуумі, так і в середовищі транспортуючих газів. Механізм утворення покриттів CVD-методу полягає в термічному розкладанні МОС. При цьому металізуючи поверхню підкладки знаходиться в оточенні газової суміші, що включає в себе пари металоорганічних сполучень, молекули якого постійно перемішуються в усіх напрямках в обсязі реакційної камери, що дозволяє їм вступати в контакт з усіма поверхнями підкладки, що мають температуру, необхідну для розкладання даної сполуки.

Для відновлення і зміцнення деталей доцільно застосовувати хромові покриття, одержувані термічною дисоціацією гексакарбоніла хрому $\text{Cr}(\text{CO})_6$ в газовій фазі:



Це металорганічне сполучення на основі хрому дозволяє отримувати якісні хромові покриття із заданою мікротвердістю в межах від 12,0 до 20,0 ГПа. До основних технологічних параметрів процесу відносяться температура підігріву $\text{Cr}(\text{CO})_6$ і температура підкладки.

Встановлено що процес утворення хромових покриттів починається при температурі 290 °С максимальна швидкість росту покриття спостерігається при 300 °С. При подальшому підвищенні температури розкладання парів карбоніла хрому починається не на поверхні деталі, а в об'ємі камери, що є негативним явищем для якісної металізації поверхні деталі.

Вміст зміцнюючої фази карбіду хрому Cr_3C_2 із зростанням температури поступово знижується, що призводить до зниження мікротвердості покриття. Змінюючи режим CVD-процесу, можна задавати мікротвердість покриттів, яка постійна по перетину і не залежить від товщини покриття, в межах 12,0... 20,0 ГПа [4].

Дослідження міцності зчеплення покриття з основою показали, що при збільшенні температури процесу до 350 °С вона зростає. При подальшому підвищенні температури міцність зчеплення покриття суттєво знижується, що пояснюється утворенням в об'ємі камери дисперсного хромового порошку, який потрапляючи на підкладку він знижує адгезію.

Аналіз властивостей хромових покриттів, отриманих CVD-методом, дозволяє вважати їх придатними для зміцнення деталей, зокрема деталей турбокомпресора. Можливість вирішення питань зміцнення деталей шляхом впровадження технологічних процесів з використанням МОС дозволить значно знизити вплив абразивних частинок на поверхні деталей, що сполучаються і істотно підвищити довговічність.

Висновки:

1. Відновлені поверхні корпусу середнього турбокомпресора CVD-методом термічного розкладання МОС дозволяють успішно протистояти абразивному і гідро абразивному зношуванню, що суттєво, в 2,0...2,5. рази, підвищує зносостійкість зношених поверхонь під втулку підшипника.

2. Спосіб CVD-методу термічного розкладання МОС дає можливість отримувати широкий спектр різних за хімічним складом, структурою та властивостями покриттів. При цьому твердість отриманих покриттів може сягати значень, що суттєво перевищують 17 ГПа, а це дає змогу робочим поверхням втулок протистояти навіть абразивному зношуванню.

Список літератури

1. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
2. Ерохин М.Н., Чупятков Н.Н. Применение химического парового осаждения для повышения износостойкости прецизионных деталей гидравлических систем машин и оборудования в животноводстве. *Вестник ВНИИМ*. 2013. №4(12). С. 61- 64.
3. Козырева, Л.В. Получение металлических наноразмерных покрытий на волокнистых материалах. *Нанотехнологии – производству* - 2008: Труды Междунар. научн.-практ. конф. Москва: Концерн «Наноиндустрия». 2009. С. 158 – 161.
4. Козырева, Л.В. Ресурсосберегающие нанотехнологии на предприятиях технического сервиса: монография. Тверь: ТГТУ, 2010. 188 с.
5. Козырева Л.В. Применение CVD-метода металлоорганических соединений в технологиях изготовления и восстановления деталей подъемно - транспортирующих машин. *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ*. 2008. № 1. С. 104 -108.

References

1. Hrushhov, M.M., & Babichev, M.A. (1970). Abrazivnoe iznashivanie [Abrasive wear]. Moskow: Nauka [in Russian].
2. Erohin, M.N. & Chupjatov, N.N. (2013). Primenenie himicheskogo paraofaznogo osazhdeniya dlja povyshenija iznosostojkosti precizionnyh detalej gidravlicheskih sistem mashin i oborudovanija v zhivotnovodstve [The use of chemical vapor deposition to increase the wear resistance of precision parts of hydraulic systems of machinery and equipment in animal husbandry]. *Vestnik VNIIM – Bulletin VNIIM*. 2013. №4(12). S. 61- 64. [in Russian].
3. Kozyreva, L.V. (2009). Poluchenie metallicheskih nanorazmernyh pokrytij na voloknistyh materialah [Obtaining metallic nanoscale coatings on fibrous]. *Nanotechnology - manufacturing – 2008. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Moskva: Koncern «Nanoindustrija». 2009. S. 158 – 161. [in Russian].
4. Kozyreva, L.V.(2010). Resursosberegajushhie nanotehnologii na predpriyatijah tehničeskogo servisa [Resource-saving nanotechnology at technical service enterprises] . Tver': TGTU [in Russian].
5. Kozyreva, L.V. (2008). Primenenie CVD-metoda metalloorganicheskikh soedinenij v tehnologijah izgotovlenija i vosstanovlenija detalej podmno - transportirujushhij mashin. [Application of CVD-method of organometallic compounds in technologies of manufacturing and restoration of parts of lifting and transporting machines]. *Vestnik FGOU VPO MGAU – Bulletin FSEI HPE MSAU*, 1, 104 -108 [in Russian].

Yuriy Kuleshkov, Prof., Dsc., **Mikhail Chernovol**, Prof., Academician of the NAAS of Ukraine, DSc., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mikhail Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yevhenii Solovykh**, Prof., Dsc., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improve the Durability of a Turbocharger as a Result of Repair Work

A turbocharger is a unit of modern internal combustion engines designed to boost it. Since a drive of the turbocharger is most often carried out from the energy of the exhaust gases, the conditions of its operation can not be called favorable: the temperature of the exhaust gases sometimes reaches 700⁰C, high chemical activity of the exhaust gases, high speed of rotation of the turbine. The consequence of difficult operating conditions is the wear of its elements. One of the main causes of wear of the active elements of the turbocharger is abrasive wear.

Various methods of restoration and strengthening can be used to restore machine parts. However, not all methods can provide the necessary resource for the restoration and strengthening of parts working in abrasive and corrosive environments. One of the modern directions of increasing the wear resistance and other properties of reducing coatings is the use of composite materials. This article presents the results of research on the development of a new method for restoring and strengthening parts with composite materials based on the use of chemical vapor deposition of metals CVD - method (Chemical Vapor Deposition) by decomposition of organometallic compounds. It is shown that the developed composite material obtained by the CVD-method of decomposition of organometallic compounds provides an increase in wear resistance of at least 2.0...2.2 times in

comparison with new parts composite material. Vapor-phase deposition of metals, Chemicikal Vapor Deposition-method, decomposition of organometallic compounds.

composite material, vapor phase deposition of metals, Chemicikal Vapor Deposition method - decomposition of organometallic compounds

Одержано (Received) 24.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 29.10.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 621.74:669.15

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.174-181>

В.К. Аветісян, доц., канд. техн. наук, **Н.М. Колпаченко**, доц., канд. екон. наук,
В.Л. Маніло, асист., **Д.П. Ащаулов**, асп.

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

О.В. Сайчук, проф., д-р техн. наук, **О.І. Біловод**, доц., канд. техн. наук, **Ю.Б. Скоряк**, асист.

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

e-mail: oleksandra.bilovod@pdaa.edu.ua

Аналіз якості структуроутворення виливків корпусних деталей з сірого чавуну

Виконано статистичний аналіз якості корпусних деталей в умовах виробництва. У якості критерію використовували магнітний метод неруйнівного контролю якості за коерцитивною силою. Статистичну оцінку проводили на двох типах деталей: корпусах роздавальної коробки передач і корпусах коробки зміни передач які виготовлені із чавунів СЧ15, СЧ18 і СЧ20 відповідно. Обидва типи деталей характеризуються близькою товщиною стінок.

корпусні виливки, пластинчастий графіт, коерцитиметр, мікрорентгеноспектральний аналіз, термоелектронна емісія, сірий чавун

Постановка проблеми. Серед номенклатури деталей, що виготовляються, важливе місце займають корпусні – із сірого чавуну. Аналіз показав, що немає ні однієї сільськогосподарської машини, яка не мала б таких деталей. Частка таких виробів у кількісному співвідношенні для різних одиниць сільськогосподарської техніки становить 3,5-45%, що у більшості випадків визначає ресурс машини. Особливо це відноситься до корпусних деталей, відсоток яких становить від 1,7-24%. Ці вироби відрізняються значною різноманітністю: масою, складною геометрією, об'ємом, умовами роботи.

Широке використання деталей із сірого чавуну обумовлена низкою факторів: технологічністю матеріалу (гарні ливарні властивості і оброблюваність різанням), експлуатаційними властивостями та достатньою надійністю. Технологія плавки чавуну це важлива частина конструкторсько-технологічної підготовки виготовлення корпусних деталей. Удосконалення систем контролю технологічного процесу плавки спрямоване на отримання високоякісного сплаву з поліпшеними фізико-механічними характеристиками. Контроль процесу, відповідно до критеріїв оцінки показників роботи засобів автоматизації у контурах регулювання температури, дають змогу визначити відхилення від заданого температурного режиму плавлення за складом шлаку [1].

Аналіз основних досліджень і публікацій. Як відомо, робота деталей сільськогосподарської техніки відрізняється досить різноманітними умовами експлуатації. Мають місце статичні, динамічні та ударні навантаження, фактично всі види зношування, корозійні впливи, вплив залишкових, монтажних і робочих напружень (особливо в корпусних виливках).

Вироби із сірого чавуну відносяться до класу важко відновлюваних деталей. Це значною мірою зв'язане зі специфічністю властивостей сірого чавуну (наявністю пластинчастого графіту) у порівнянні зі сталлю. Наявність вуглецю у вільному стані ускладнює одержання покриттів і заварювання тріщин. Процеси термічної обробки і пластичне деформування (поверхнєве та об'ємне), хоча і забезпечують підвищення твердості, але в той же час створюють досить високі залишкові напруження, які сприяють зниженню міцності матеріалу в цілому.

Умови експлуатації чавунних деталей і специфіка властивостей цього матеріалу обумовлюють появу дефектів. Причому на одній і тій же деталі їх може бути кілька різних типів.

Постановка завдання. Основною метою роботи є провести статистичні дослідження аналізу якості структуроутворення виливків корпусних деталей.

Виклад основного матеріалу. Статистичні дослідження вимірювань коерцитивної сили на деталях із сірого модифікованого чавуну виконані на корпусах роздавальної коробки, (71 вимірювання) і корпусах коробки зміни передач (148 вимірювань), проведених в умовах ВАТ «ХТЗ».

Перша група деталей виготовлена із чавуну СЧ15, де підвищена сумарна концентрація вуглецю і кремнію, що призвело до збільшення частки графіту та фериту. Такий чавун характеризується більш низькими показниками коерцитивної сили [2].

Друга група деталей виготовлена із чавуну марки СЧ20, де підвищена коерцитивна сила і знижена частка графіту та фериту (основа металевої матриці – перлітна складова).

Обидва типи деталей мають близьку товщину стінок, що характеризує формування подібних умов кристалізації.

Із статистичного аналізу випливає, що стабільній і якісній структурі металу відповідають показники коерцитивної сили на рівні 7,0-9,0 А/см. Відхилення нижче нижньої межі показань може бути пов'язане зі збільшеною часткою фериту та наявністю скупчень графіту. Це особливо характерно за коерцитивної сили 4,3-6,0 А/см.

При показниках коерцитивної сили вище верхньої межі $\geq 8,0$ А/см у структурі може з'являтися вільний цементит. Виявлені відхилення в сірому чавуні супроводжуються появою дефектів: піщаних включень і газових ситоподібних порожнин, тріщин, які виявлені на «зразках-свідках» з коерцитивною силою рівною ≥ 10 А/см (табл. 1).

Таблиця 1 – Лита «проба-свідок»

№ п/п	Зони вимірювання								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10,1	10,9	9,3	8,9	8,4	8,4	8,6	8,4	7,8
2	9,8	10,0	9,0	8,8	8,6	8,4	8,4	7,9	8,3
3	10,4	10,6	9,4	8,6	8,4	8,4	8,2	8,0	8,3
4	10,2	10,6	8,9	8,6	8,4	8,4	8,1	7,9	8,0
Середнє значення	10,13	10,53	9,15	8,73	8,45	8,4	8,33	8,05	8,1

Джерело: розроблено автором

Вимірюваннями коерцитивної сили на першому етапі оцінювали ступінь впливу показань на анізотропію властивостей різних поверхонь виливків, їх конструктивних відмінностей і дефектів, які тільки їм відповідають.

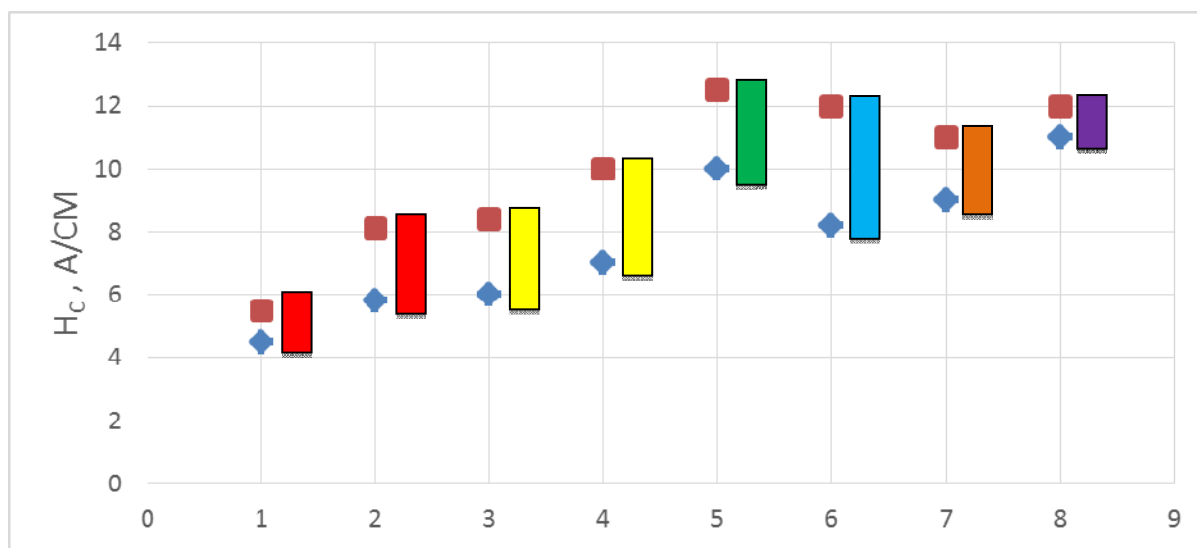
Результати вимірювань коерцитивної сили дозволяють оцінити якість корпусів роздавальної коробки передач і корпусів коробки зміни передач і зробити висновок, що анізотропія властивостей у них практично відсутня. Це характерно як для зовнішньої, так і внутрішньої поверхні виливків, а також конструктивних особливостей вимірюваних зон. Тому при подальших дослідженнях вимірювання робили тільки в одному напрямку.

Середні показники H_c по зовнішній поверхні корпусів роздавальної коробки зміни передач становлять 4,8 А/см, (4,2-5,6 А/см), а внутрішньої 6,38 А/см (5,2-8,0 А/см). Така відмінність у неоднорідності властивостей обумовлена різною схильністю до формування дефектних зон при кристалізації.

У зонах з дефектами (неслітин) коерцитивна сила підвищується. Найбільше підвищення [3] відмічається в зонах, що близько розташовані до неслітин і в них самих.

У зонах розташування неслітин коерцитивна сила стабільно висока 10,4 ÷ 11,3 А/см, що дозволяє, виходячи з досвіду контролю, судити про істотне порушення суцільності в такій зоні.

На рис. 1 наведені граничні показання коерцитивної сили вимірювань в різних зонах і якості, що відрізняється. Наявність дефектів збільшує не тільки розкид показань, а і їх рівень, де H_c змінюється до 10-50 %. При цьому максимальні показники характерні для зон з тріщинами і неслітинами, що дозволяє ідентифікувати ці дефекти. Високі показники характерні і для зони заварювання дефектів ($H_c = 9,6-10,1$ А/см) [4].



1, 2 – зовнішня і внутрішня поверхні без дефектів відповідно; 3, 4 – теж саме в зонах ребер;

5 – неслітин; 6 – тріщин; 7 – газових порожнин; 8 – зонах зварювання

Рисунок 1 – Граничні показники зміни коерцитивної сили в залежності від якості корпусних деталей з сірого чавуну

Джерело: розроблено автором

Аналогічна картина неоднорідних показників коерцитивної сили була виявлена і у литій пробі з такого чавуну ($\varnothing 30$ мм, $L = 25$ мм), де коливання H_c складали 7,8-10,9 А/см. (табл. 1 і рис. 1).

Статистичним аналізом, виливок корпусних деталей із сірого чавуну було

встановлено, що від плавки до плавки структура формованого металу може суттєво мінятися. Це характерно і для різних зон виливків з однієї плавки.

Для з'ясування причин відхилень проведені спеціальні дослідження з використанням мікрорентгеноспектрального аналізу відібраних проб, що відрізняються за рівнем коерцитивної сили (8,5 – 10,5).

Порівняння проводили на двох пробах з різними показниками магнітної характеристики. Як показав аналіз ці проби відрізнялися як формою графіту, так і співвідношенням фаз (перліту, фериту та графіту).

Результати спектрального аналізу досліджуваних проб наведені в (табл. 2-5).

Таблиця 2 – Спектральний аналіз проби зі зниженим рівнем коерцитивної сили (8,5 А/см) у поверхні виливка

Елемент	Ваговий %	Атомний %	O ₂ – min P – підвищений Ti, V – мікродобавки
C K	19,87	52,20	
O K	1,17	2,31	
Si K	1,35	1,52	
P K	0,25	0,25	
Ti K	0,01	0,01	
V K	0,11	0,07	
Mn K	0,68	0,39	
Fe K	76,56	43,25	
Підсумок	100,00	100,00	

Джерело: розроблено автором

Ці проби суттєво відрізнялися за рівнем H_c, яка перебувала в різних зонах виливка в межах 8,5-10,5 А/см відповідно (табл. 2-5).

Аналізом встановлено, що в першому виливку в поверхні виявлена підвищена концентрація фосфору (0,25%) і незначна частка присадок, що модифікують, Ti і V (0,01 – 0,11% відповідно). Кількість кисню становить 1,7%. У центральній зоні корпусного виливка товщиною 30 мм не змінилася частка графіту і концентрація кисню в порівнянні з поверхневою зоною виливка. Інші компоненти перебувають у межах припустимих технічними умовами на виливок.

Таблиця 3 – Спектральний аналіз проби з підвищеним рівнем коерцитивної сили (10,5 А/см) у поверхні виливка

Елемент	Ваговий %	Атомний %	Високий вміст сірки
C K	18,47	48,36	
O K	3,41	6,70	
Si K	1,42	1,59	
P K	0,09	0,09	
S K	0,27	0,26	
Cr K	0,11	0,06	
Mn K	0,81	0,46	
Fe K	75,42	42,46	
Підсумок	100,00	100,00	

Джерело: розроблено автором

Таблиця 4 – Спектральний аналіз проби зі зниженим рівнем коерцитивної сили (8,5 А/см) у центральній частині виливка

Елемент	Ваговий %	Ваговий %	Атомний %	Підвищена концентрація Mn (в 4 рази) V = 0,41% Ti = 0,16% Дуже висока S.
C K	18,81	0,29	50,44	
O K	1,15	0,13	2,31	
Si K	1,63	0,05	1,87	
P K	0,15	0,04	0,16	
S K	0,19	0,03	0,19	
Ti K	0,05	0,04	0,03	
V K	0,12	0,04	0,08	
Mn K	0,88	0,06	0,51	
Fe K	77,02	0,31	44,41	
Підсумок	100,00	0,99	100	

Джерело: розроблено автором

Таблиця 5 – Спектральний аналіз проби з підвищеним рівнем коерцитивної сили (10,5 А/см) у центральній частині виливка

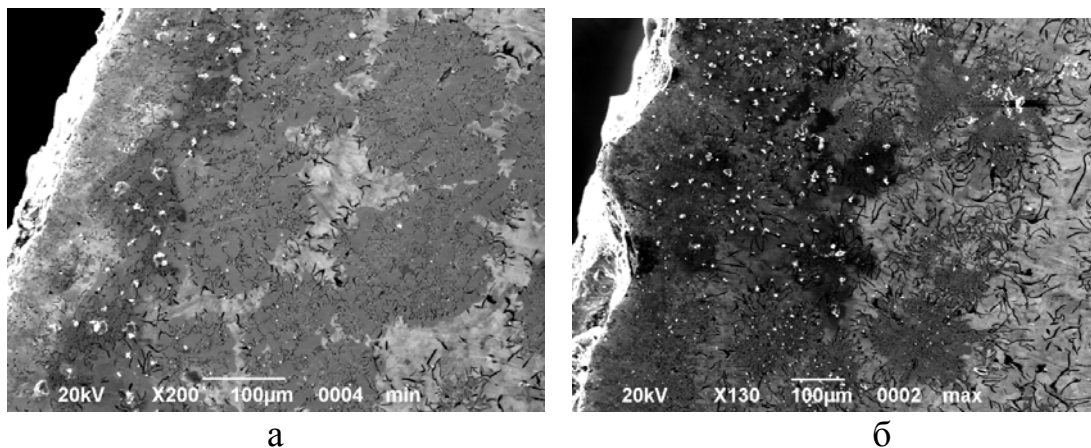
Елемент	Ваговий %	Атомний %	Модифікуючі добавки V, Ti
C K	24,48	58,73	
O K	1,17	2,11	
Si K	1,37	1,41	
S K	0,16	0,15	
Ti K	0,05	0,03	
V K	0,09	0,05	
Cr K	0,08	0,04	
Mn K	0,83	0,44	
Fe K	71,76	37,04	
Підсумки	100,00	100,00	

Джерело: розроблено автором

Вироби з підвищеною коерцитивною силою (10,5 А/см) частка графіту у поверхні виливка суттєво не змінилася в порівнянні з попереднім варіантом, однак суттєво виросла концентрація кисню (у три рази до 3,41%) і сірки (до 0,27%). Модифікуючі присадки Ti і V відсутні. У центральній зоні перетину виробу трохи підвищена частка графіту (на ~ 6%). Незважаючи на те, що в цій зоні насиченість киснем зменшена, однак, його концентрація відповідає показникам виливка з мінімальною коерцитивною силою. Інші компоненти відповідають вимогам нормативно-технічної документації.

Рентгеноспектральний аналіз виявив підвищену частку кисню.

Встановлено, що його поява пов'язана з формуванням оксидів, концентрація яких була підвищена особливо біля стінок виливків. Це може бути результатом поганої підготовки форм для виливка виробів (рис. 2).



а – з мінімальними показниками H_c ; б – з максимальними показниками H_c .

Рисунок 2 – Оксиди біля поверхні виливків

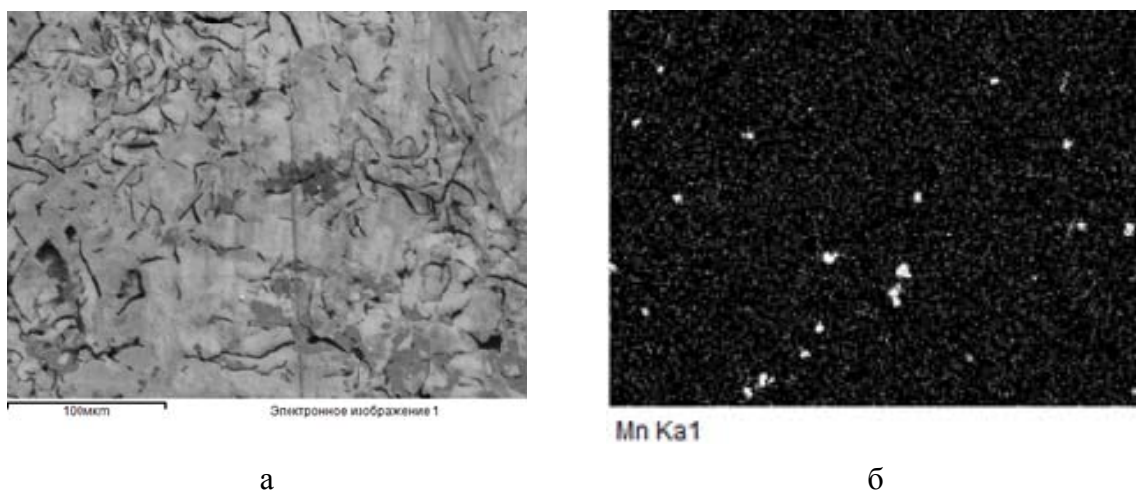
Джерело: розроблено автором

Методом мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено, що такі включення є складними з'єднаннями, що містять до 13% кисню. Вони так само містять 1,16-2,08% Si і 0,39-0,62% Mn. (рис. 3).

Їх можна віднести до з'єднань метасилікату $MnSiO_3$ ($MnOSiO_2$) і ортосилікату Mn_2SiO_4 ($2MnOSiO_2$).

За допомогою термоелектронної емісії також встановлено, що крім складних окислів метал містить значну кількість сульфідів марганцю, а також характеризується формуванням зон локальної ліквідації цих компонентів [4].

Спостережуване пов'язане з відхиленнями в способі введення модифікатора (силікомарганцю) і нерівномірним його засвоєнням у всій масі металу. Так, по даним локального рентгеноспектрального аналізу концентрація розподілу цих елементів особливо неоднорідна у виливках з більш високим рівнем коерцитивної сили (0,07-2,09% Si і 0,04-2,15 Mn). Форма включень однакова при різних H_c .



а

б

а – електронне зображення, б – термоелектронна емісія

Рисунок 3 – Аналізований складний за складом оксид

Джерело: розроблено автором

Незважаючи на досить близьку концентрацію в розподіл основних компонентів по перетину виливків встановлено, що причиною різних показань, отриманих при

вимірюванні коерцитивної сили, є збільшена частка графітових включень, оксидів і сульфідів. Використання такого неруйнівного методу контролю дозволить виявити зони у виробках з відхиленнями за структурою та більш ретельно аналізувати в них можливість формування дефектів (поро – та тріщиноутворення).

Висновки. Виконано статистичний аналіз якості корпусних деталей в умовах виробництва. В результаті досліджень встановлено, що для перших групи деталей виготовлених із чавуну СЧ15 показник змінюється в межах 4,3-8,0 А/см, а для других із чавуну марки СЧ20 – 5,0-9,4 А/см.

Список літератури

1. Stanovska, I., Duhanets, V., Prokopovych, L., & Yakhin, S. Classification rule for determining the temperature regime of induction gray cast iron. *eureka: Physics and Engineering*, 2021, P. 60-66. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001604>
2. Изготовление и обработка корпусных деталей из чугуна / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Ресурсозберігаючі матеріали та обладнання в ремонтному виробництві»*. 2015. Вип. 158. С. 126-133.
3. Скобло Т.С., Сидашенко О.І., Сайчук О.В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: монографія ; під ред. дів. проф. Скобло Т.С. Харків: Діса плюс, 2019. 282 с.
4. Применение неразрушающего контроля для оценки качества отливок из серого чугуна / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Сайчук А.В. и др. *Агротехника и энергообеспечение: научно-практ. журнал*, 2015. №4 (8). С. 15-25.
5. Сайчук А.В. Отклонения в структурообразовании при производстве корпусных деталей. *Компрессорное и энергетическое машиностроение: научно-техн. и произв.-ный. журнал*. 2014. №4 (38). С. 53-55.
6. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Москва: 2012. №6 (78) . С.35-42.
7. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Белкин Е.Л. Эффективная технология восстановления корпусных деталей из серого чугуна методом заварки дефектов. *Сварочное производство: ежемес. научно-техн. и производств. журнал*. 2017. 12 (997). С. 33-39.
8. Печенкина Л.С. Влияние содержания структурообразующих компонентов на твердость малоуглеродистых белых чугунов. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2017. С. 134-138.
9. Чайкин В.А., Каргинов В.П., Чайкина Н.В. Сравнительный анализ высокопрочных чугунов, полученных различными способами. *Теория и практика металлургических процессов при производстве отливок из чёрных сплавов: сб. докладов Литейного консилиума №2*. Челябинск: Челябинский Дом печати, 2007. С. 100.
10. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Saichuk O.V. *Materials Science*, 2020. P.347–358.
11. Оценка степени деградации металла изделий в процессе эксплуатации / Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Рыбалко И.Н., Марченко А.Ю., Тихонов А.В. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів: міжн. наук. журнал*. 2018. №11. С. 49-59.

References

1. Stanovska, I., Duhanets, V., Prokopovych, L., & Yakhin, S. (2021). Classification rule for determining the temperature regime of induction gray cast iron. *eureka: Physics and Engineering*, P. 60-66 [in English].
2. Sidashenko, O.I. et al. (2015). Yzghotovlenye y obrabotka korpusnykh detalej yz chuhuna [Fabrication and processing of cast iron body parts]. *Visnyk KhNTUSH im. Petra Vasylenka : zb. nauk. pr. Seriia : Resursozberihaiuchi materialy ta obladnannia v remontnomu vyrobnytstvi»* – Bulletin of KhNTUSG them. P. Vasylenko "Resource-saving materials and equipment in repair production, Issue 158, 126-133 [in Russian].
3. Skoblo, T.S., Sidashenko, O.I. & Sajchuk O.V. (2019). *Housing parts made of cast iron and their quality indicators*. Skoblo T.S. (Ed.). Xarkiv: Disa plus [in Ukrainian].
4. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Sajchuk A.V. i et al. (2015). Primenenie nerazrushajushhego kontrolja dlja ocenki kachestva otlivok iz serogo chuguna [Application of non-destructive testing to assess the quality of gray iron castings]. *Agrotehnika i jenergoobespechenie: Nauchno-prakt. zhurnal – Agricultural technology and energy supply: scientific and practical journal*, №4 (8), 15-25 [in Russian].

5. Sajchuk, A.V. (2014). Otkloneniya v strukturoobrazovanii pri proizvodstve korpusnyh detalej [Deviations in structure formation in the production of body parts]. *Kompressornoe i jenergeticheskoe mashinostroenie : Nauchno-tehn. i proizvodstv. zhurnal – Compressor and power engineering: scientific, technical and industrial journal*, №4 (38), 53-55 [in Russian].
6. Skoblo, T.S., Klochko, O.Y. & Belkin, E.L. (2012). Primenenie komp'yuternogo analiza metallograficheskikh izobrazhenij pri issledovanii struktury vysokohromistogo chuguna [Application of computer analysis of metallographic images in the study of the structure of high-chromium cast iron]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnosis of materials*, 6 (78), 35-42. [in Russian].
7. Skoblo, T.S., Sidashenko, A.I. & Belkin, E.L. (2017). Jeffektivnaja tehnologija vosstanovlenija korpusnyh detalej iz serogo chuguna metodom zavarki defektov [Effective technology of restoration of case details from gray cast iron by a method of welding of defects]. *Svarochnoe proizvodstvo: ezheмес. nauchno-tehn. i proizvodstv. zhurnal – Monthly scientific-technical and production magazine "Welding production"*, 12 (997), 33-39. [in Russian].
8. Pechenkina, L.S. (2017). Vlijanie soderzhanija strukturoobrazujushhih komponentov na tverdosť malouglerodistykh belyh chugunov [Influence of the content of structure-forming components on the hardness of low-carbon white cast irons]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta – Pechenkina LS Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 134-138. [in Russian].
9. Chaikin, V.A., Karginov, V.P. & Chaikina, N.V. (2007). Sravnitel'nyj analiz vysokoprochnykh chugunov, poluchennykh razlichnymi sposobami [Comparative analysis of high-strength cast irons obtained in different ways]. *Teoriya i praktika metallurgicheskikh processov pri proizvodstve otlivok iz chjornykh splavov: sb.dokladov Litejnogo konsiliuma – Theory and practice of metallurgical processes in the production of castings from ferrous alloys: Col. of reports of the Foundry Council*, 2, Chelyabinsk: Chelyabinsk Printing House [in Russian].
10. Skoblo T.S., Sidashenko O.I. & Saichuk O.V. (2020). Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron. *Materials Science*, P347–358 [in English].
11. Skoblo, T.S., Sidashenko, A.I., Rybalko, I.N., Marchenko, A.Yu. & Tikhonov, A.V. (2018). Ocenka stepeni degradacii metalla izdelij v processe jekspluatacii [Assessment of the degree of degradation of metal products during operation]. *Tehničnij servis agropromislovogo, lisovogo i transportnogo kompleksiv: mizhn. nauk. zhurnal – Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: International scientific journal*. Kharkiv: KhNTUSG, 11, 49-59 [in Russian].

Viktor Avetisyan, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nadia Kolpachenko**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., Ph.D., assoc., **Vadym Manilo**, Assistant, **D. Ashchaulov**, post-graduate

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Olexandr Saichuk, Prof., DSc., **Olexandra Bilovod**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Yuliya Skoriak**, Assistant
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Analysis of the Quality of Structure Formation of Castings of Body Parts From Gray Cast Iron

The purpose of this article is to carry out a statistical analysis quality of structure formation of castings of body parts made of gray cast iron.

The magnetic method of non-destructive quality control of the coercive force was used as a criterion for the analysis of the quality under production conditions was carried out. The evaluation was carried out on two types of parts: transfer case housings and gear change housings made of SCH15, SCH18 and SCH20 cast irons, respectively. Both types of parts have similar wall thickness.

The observed phenomenon is associated with deviations in the method of injection the modifier (silicomanganese) and its uneven assimilation throughout the mass of the metal. Thus, according to local X-ray spectral analysis, the distribution concentration of these elements is especially inhomogeneous in castings with a higher level of coercive force (0,07...2.09% Si and 0,04...2.15% Mn). The shape of the inclusions is the same for different Hc. Despite the close concentration in the distribution of the main components over the cross-section of the castings, we found that the reason for the difference between multiple readings obtained when measuring the coercive force is an increased proportion of graphite inclusions, oxides and sulfides. The use of such a non-destructive control method will make it possible to identify zones in products with deviations in structure and to more thoroughly analyze the possibility of defect formation (pore and crack formation).

body castings, lamellar graphite, coercitimeter, micro-X-ray spectral analysis, thermoelectron emission, gray cast iron

Одержано (Received) 12.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 18.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 621.891

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.182-187>**М.М. Студент**, ст. наук. співр., д-р техн. наук*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна**e-mail: student.phmi@gmail.com***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: markob0@ukr.net;***В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*e-mail: gvosdetcki@gmail.com***Х.Р. Задорожна**, наук. співр., канд. техн. наук**І.В. Ковальчук**, мол. наук. співр., канд. техн. наук**Ю.В. Дзьоба**, гол. інж.*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна*

Зносостійкість оксидних шарів сформованих методом твердого анодування (hard anodic coatings) при зміцненні деталей агропромислової техніки

Синтез анодованого шару на сплаві алюмінію виконували у 20 % розчині сірчаної кислоти за температури $-8 \dots -^{\circ}\text{C}$. Під час анодування густина струму становила 5 А/дм^2 . Час анодування становив 60, 120 та 180 хв. Проводили металографічні дослідження та фазовий аналіз анодованих шарів. Зменшення вмісту води проводили за температури 400°C впродовж 60 хв. Встановлено, що оксидний шар ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) під час твердого анодування на алюмінієвих сплавах формують не лише йони кисню, які утворюються внаслідок розкладу води, а також його нейтральні атоми, які формуються з розчину. Виявлено, із збільшенням часу анодування зростає мікротвердість та товщина шару. Після термічної обробки кількість молекул води зменшується і мікротвердість зростає. Підвищення мікротвердості сприяє зростанню опору абразивному зношуванню.

тверде анодування, алюміній, анодований шар, пори, зносостійкість

Постановка проблеми. В останні роки у агропромисловому виробництві відбувається тенденція на заміну чавунних деталей на деталі із алюмінієвих сплавів при несенні на поверхню зміцнюючого шару [1-4]. Виробництво чавуну супроводжується викидом великої кількості вуглекислого газу в атмосферу. Заміна чавунних деталей на алюмінієві зменшить кількість викидів вуглекислого газу в атмосферу, та суттєво зменшить вагу конструкцій [5-8].

Тверде анодування застосовується практично в усіх галузях промисловості: авіаційна та автомобільна промисловості; пневматика і гідравліка; електроніка; нагрівальні платформи та плитки; медичні прилади.

Особливо велику кількість шківів використовують на комбайнах, при експлуатації яких хмари з пилу, відіграючи роль абразиву, суттєво зменшують їх ресурс. Однак деталі із алюмінієвих сплавів мають малу абразивну зносостійкість, що може суттєво обмежити їх експлуатаційний ресурс.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед деталей, що виготовляються із алюмінієвих сплавів є поршні, зубчаті передачі, шків та шестерні рис.1, рис.2. Для захисту від абразивного зношування алюмінієвих сплавів використовують методи

газотермічного нанесення захисних покриттів, гальванічне нанесення хромового покриття, а в останні роки метод плазмоелектролітного оксидування та холодного анодування (Hard Anodic Coatings).



Рисунок 1 – Шестерні з нанесеним керамічним шаром методом твердого анодування

Джерело: розроблено авторами

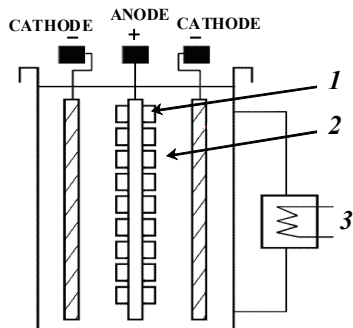


Рисунок 2 – Вигляд анодованого та не анодованого шків колінвалу

Серед переваг холодного анодування алюмінієвих сплавів є використання екологічно чистих електролітів, технологічно нескладний та енергетично-економний процес. Однак суттєвим недоліком є порівняно мала мікротвердість – 400...450 HV, а відповідно і зносостійкість анодованих шарів.

Постановка завдання. Підвищення механічні характеристик алюмінієвих сплавів методом формування анодованих шарів на їх поверхні. Змінити час анодування та склад анодованого шару для збільшення товщини анодового шару та підвищення мікротвердості. Визначити вплив часу формування анодованого шару на зміну його властивостей.

Виклад основного матеріалу. Процес твердого анодування проводили за температури $-8...-4^{\circ}\text{C}$ впродовж 60 хв. використовуючи установки наведену на рис. 3., електролітом слугував 20%-ий водний розчин H_2SO_4 . В процесі анодування підтримували густину струму 5 A/dm^2 . Зразки з технічного алюмінію АД0 (1011) (0,25 мас.% Si; 0,40 мас.% Fe; 0,05 мас.% Cu; 0,05 мас.% Mn; 0,05 мас.% Mg; 0,05 мас.% Ti; решта Al) розміром $20 \times 20 \times 5 \text{ мм}$ перед анодуванням знежирували віденським вапном (водний розчин суміші $\text{CaO} + \text{MgO}$) та промивали в холодній і теплій воді з наступним освітленням у водному розчині нітратної кислоти (400 g/l HNO_3). Після освітлення зразки просушували гарячим повітряним струменем впродовж 3...5 хв та, під'єднавши до анодної напруги, занурювали в електроліт.



1 – навіска з деталями; 2 – електроліт; 3 – рециркуляція та охолодження електроліту
Рисунок 3 – Схема установки для твердого анодування алюмінієвих сплавів

Джерело: розроблено авторами

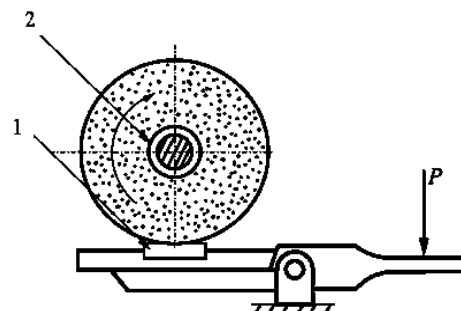


Рисунок 4 – Схеми випробування абразивним зносом при використанні жорстко закріпленого абразиву (1 зразок, 2 абразивний круг) Р-навантаження

Мікротвердість визначали по товщині анодованих шарів за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76). Структуру досліджували у характеристичному випромінюванні BSD на електронному мікроскопі EVO 40 XVP. Фазовий аналіз виконано на рентгенівському дифрактометрі BRUKER D8 DISCOVER. Абразивну зносостійкість визначали за використання абразивного круга рис.4.

Результати та їх обговорення. На рис. 5 показано схематичне зображення морфології пористої анодної плівки, яка складається з тонкого бар'єрного шару, розташованого на межі розділу метал/плівка, і зовнішньої пористої області, що містить циліндричні пори, які виходять з поверхні плівки до бар'єрного шару. Плівка має щільний набір стовпчастих шестикутних комірок, кожна з центральною, циліндричною, рівномірною порою. Бар'єрний шар на дні кожної комірки має напівсферичну форму.

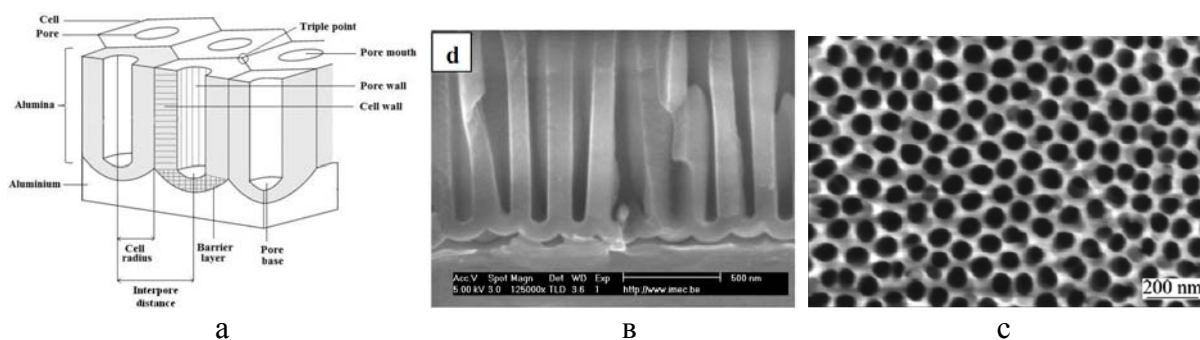
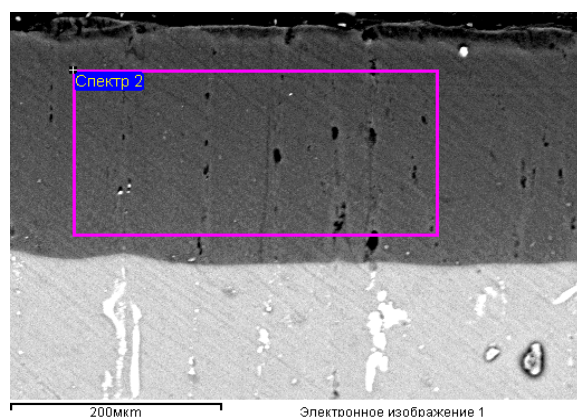


Рисунок 5 – Схематичне зображення структури анодного шару – а, реальне зображення анодного шару поперечний переріз – в, вид зверху – с

Джерело: розроблено авторами

У структурі анодних шарів присутні пори двох типів: крупні ($\leq 5 \mu\text{m}$) та нанометрової величини ($\leq 50 \text{ nm}$). Кількість пор в анодованому шарі зростає зі збільшенням тривалості анодування. Як правило, нанометрова поруватість анодованого шару не перевищує 11...13 об.%. Крупні пори, на наш погляд, виникають внаслідок витравлювання електролітом включень інтерметалідів заліза та міді. у структурі алюмінієвого сплаву, про що свідчить виділення міді на катоді. (рис. 6).



Элемент	Весовой %
O K	46.18
Mg K	0.57
Al K	45.58
S K	6.56
Cu K	1.11
Итого	100.00

Рисунок 6 – Структура та спектральний аналіз анодного шару на сплаві АД0 синтезованого впродовж 60 хв.

Джерело: розроблено авторами

Фазовим аналізом анодованих шарів визначено, що оксидний шар у своєму складі містить до трьох молекул води рис. 7, які суттєво знижують мікротвердість а значить і зносостійкість анодованого шару.

Відомо, що термічна обробка кристалогідратів приводить до втрати кристалічної води. Тому, досліджено вплив температури термічної обробки на зміну фазового стану, твердість та зносостійкість анодованих шарів. Показано, що нагрів вже при 100°C приводить до підвищення мікротвердості анодованого шару. Внаслідок зменшення молекул води в анодованому шарі від 3 до 1 (рис. 8.) при 400°C мікротвердість досягає свого максимуму -750 HV (рис. 9).

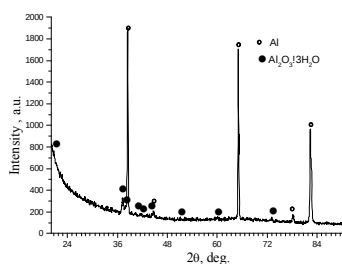


Рисунок 7 – Фазовий склад анодованого шару $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Джерело: розроблено авторами

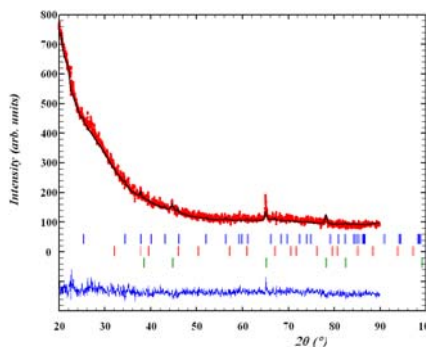


Рисунок 8 – Фазовий склад анодованого шару після ТО 400°C $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1\text{H}_2\text{O}$

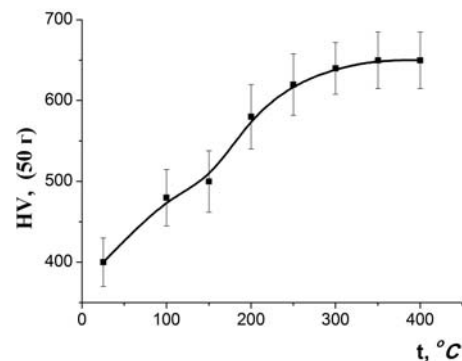


Рисунок 9 – Вплив термообробки на мікротвердість анодованого шару

Оксидні шари на алюмінієвих сплавах сформовані методом холодного анодування за низьких температур $-8...-2^{\circ}\text{C}$ суттєво підвищують абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву Д16. Збільшення часу формування оксидних шарів від 60 хв до 120 хв та термічна обробка за температури 400°C впродовж 1 години підвищує абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву до двох разів рис.10.

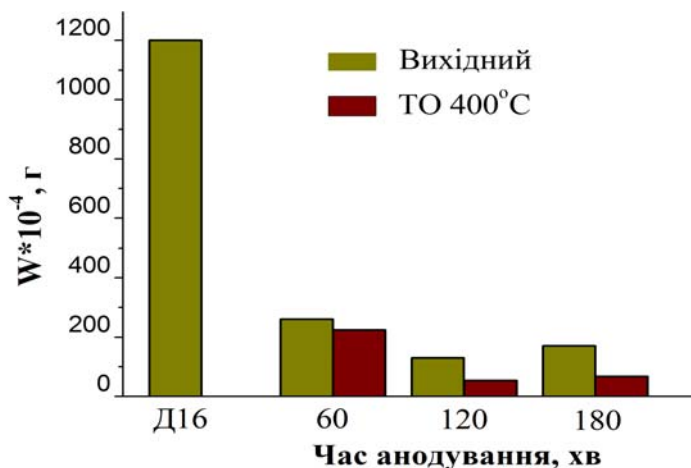


Рисунок 10 – Вплив температури термічної обробки на абразивну зносостійкість анодованого шару на технічному алюмінії АД0

Джерело: розроблено авторами

Висновки:

1. Оксидний шар у своєму складі містить до трьох молекул води, які суттєво знижують мікротвердість, а значить і зносостійкість анодованого шару.
2. Оксидні шари на алюмінієвих сплавах сформовані методом холодного анодування за низьких температур $-8...-4^{\circ}\text{C}$ до 6 раз підвищують абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву Д16.
3. Термічна обробка за температури 400°C впродовж 2 годин підвищує абразивну зносостійкість алюмінієвого сплаву на порядок.

Список літератури

1. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method / Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K. et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. 9(6). Pp. 16367–16377.
2. The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings during the Arc Spraying of Cored Wires, Student M.^a, Gvozdetzky V.^a, Student O.^a, Prentkovskis O.^b, Maruschak P.^cSend mail to Maruschak P., Olenyuk O.^d, Titova L., *Strojnický Casopis*, 2019, 69(4), pp. 133–146.
3. The properties of oxide-ceramic layers with Cu and Ni inclusions synthesizing by PEO method on top of the gas-spraying coatings on aluminium alloys, Hutsaylyuk, V., Student, M., Posuvailo, V., ...Maruschak, P., Veselivska, H., *Vacuum*, 2020, 179, 109514.
4. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method, Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K., ...Maruschak, P., Pokhmurska, H., *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6), pp. 16367–16377.
5. Tribological behavior of PEO layers synthesized on light alloy Student, M., Padgurskas, J., Dovhunyk, V., ...Posuvailo, V., Hvozdetzkyi, V., *Proceedings of 10th International Scientific Conference BALTTTRIB 2019*, 2019, pp. 268–273
6. Ning-ning Hu, Shi-rong Ge and Liang Fang. Tribological properties of nano-porous anodic aluminum oxide template. *J. of Central South University of Tech.* 2011. 18. P. 1004–1008.
7. Alaa M. Abd-Elnaiem, Gaber A. Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013. 13. P. 9741–9751.
8. Quang-Phu Tran, Tsung-Shune Chin Plasma electrolytic oxation coating on 6061 Al alloy using an electrolyte without alkali ions. *Journal of Science and Technology*. 2016. 54 (5A). P. 151-158.

References

1. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method, Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K., Student O.^b, Veselivska H.^b, Gvozdetzkyi V., Maruschak, P., Pokhmurska, H., (2020). *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), pp. 16367–16377.
2. The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings during the Arc Spraying of Cored Wires, Student M.^a, Gvozdetzky V.^a, Student O.^a, Prentkovskis O.^b, Maruschak P.^cSend mail to Maruschak P., Olenyuk O.^d, Titova L., *Strojnický Casopis*, 2019, 69(4), pp. 133–146.
3. The properties of oxide-ceramic layers with Cu and Ni inclusions synthesizing by PEO method on top of the gas-spraying coatings on aluminium alloys, Hutsaylyuk, V., Student, M., Posuvailo, V., ...Maruschak, P., Veselivska, H., *Vacuum*, 2020, 179, 109514.
4. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method, Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K., ...Maruschak, P., Pokhmurska, H., *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6), pp. 16367–16377
5. Tribological behavior of PEO layers synthesized on light alloy Student, M., Padgurskas, J., Dovhunyk, V., ...Posuvailo, V., Hvozdetzkyi, V., *Proceedings of 10th International Scientific Conference BALTTTRIB 2019*, 2019, pp. 268–273
6. Ning-ning Hu, Shi-rong Ge and Liang Fang. Tribological properties of nano-porous anodic aluminum oxide template // *J. of Central South University of Tech.* 2011. 18. P. 1004–1008.
7. Alaa M. Abd-Elnaiem, Gaber A. Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2013. – 13. – P. 9741–9751.
8. Quang-Phu Tran, Tsung-Shune Chin (2016). Plasma electrolytic oxation coating on 6061 Al alloy using an electrolyte without alkali ions // *Journal of Science and Technology*. 54 (5A). P. 151-158.

Mykhajlo Student, Dsc., Senior Researcher

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Volodymyr Hvozdetkii, PhD tech. sci., Senior Researcher

Khrystyna Zadorozhna, PhD tech. sci., Researcher

Igor Kovalchuk, Coll., Ph.D. tech. Science, Junior Research Fellow

Yurii Dzjoba, Chief Engineer

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Wearproofness of Layers of Oxide of Formed by Method of Hard Anodization (Hard Anodic Coatings) at Strengthening of Details of Agroindustrial Technique

In the last years in an agroindustrial production there is a tendency on replacement of cast-iron details on a detail from aluminium alloys at execution on поверхню of strengthening layer. An ironmaking is accompanied the extrass of plenty of carbon dioxide in an atmosphere. Substituting of cast-iron details by aluminium will decrease the amount of extrass of carbon dioxide in an atmosphere, and substantially will decrease weight of constructions. Hard anodization is used practically in all of industries of industry: avsup and motor-car industry; hydraulics; electronics; heater platforms and tiles; medical devices. This method will allow to promote mechanical descriptions of aluminium alloys the method of forming of the anodized layers on their surface.

The synthesis of the anodized layer on an aluminum alloy was performed in a 20% solution of sulfuric acid at a temperature of $(-8...-2\text{ }^{\circ}\text{C})$. During anodizing, the current density was 5 A / dm^2 . The anodizing times were 60, 120 and 180 minutes. Conducted metallographic studies and phase analysis of the layers. Reduction of moisture content was performed at a temperature of 400°C for 60 minutes. It was found that the oxide layer ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) during hard anodizing on aluminum alloys forms not only oxygen ions, which are formed due to the decomposition of water, but also its neutral atoms, which are formed from the solution. It was found that the microhardness and layer thickness increase with increasing anodizing time. After heat treatment, the number of water molecules decreases and the microhardness increases. Increasing the microhardness increases the resistance to abrasive wear.

Conclusions: The layer of oxide in the composition contains to three molecules of water, which reduce a microhardness, and and wearproofness of the anodized layer substantially. The layers of oxide on aluminium alloys are formed the method of cold anodization at low temperatures $-8...-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ to 6 time promote abrasive wearproofness of aluminium alloy of D16. Heat treatment for the temperatures of 400°C during 2 hours promotes abrasive wearproofness of aluminium alloy on an order.

hard anodizing, aluminum, anodized layer, pores, wear resistance

Одержано (Received) 12.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 18.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.8/681.5

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.188-194>

Р.М. Минайленко, доц., канд. техн. наук, **В.А. Резніченко**, викл., **О.К. Коноплицька-Слободенюк**, викл., **Л.І. Поліщук**, ст. викл.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: aron70@ukr.net, upsbilli@ukr.net*

Огляд методів балансування навантаження в хмарних системах

В статті проведено огляд методів балансування навантаження в хмарних системах. Показано, що існуючі методи балансування навантаження хмарних систем мають обмежене використання і на даний час універсальної системи балансування навантаження не існує. Крім того, ні один із розглянутих методів не враховує такі важливі складові систем як мережа і дискова підсистема. Методи балансування навантаження хмарних систем вимагають вдосконалення, метою якого повинна бути можливість повного моніторингу системи для задоволення вимог користувачів і розробників **хмарні системи, обчислювальні ресурси, балансування навантаження, продуктивність**

Постановка проблеми. Аналіз і розподіл навантаження в хмарних системах є доволі актуальним завданням, оскільки більшість хмарних систем з відкритим доступом використовують прості планувальники навантаження своїх фізичних серверів[1-3].

Проблема балансування навантаження вимагає вирішення не тоді, коли сервер неочікувано вийшов з ладу в процесі роботи над поставленим завданням, що у користувачів відбиває бажання використовувати такий продукт, а на самому початку створення проекту. На ранніх стадіях проектування цілком прийнятно нарощувати потужність з допомогою підключення нових серверів або застосовувати алгоритми оптимізації коду. Але при досягненні певної граничної межі цих заходів стає недостатньо[1,2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хмарні системи є на сьогоднішній день найбільш популярною концепцією інформаційних систем і є результатом еволюції цілого ланцюга методів їх побудови. Основним завданням хмарних технологій є створення віртуальної хмарної системи яка складається із віртуальних розподілених ресурсів. Ці ресурси забезпечують віддалене надання послуг доступу до хмарної системи з потрібним рівнем обслуговування користувача. Хмарні технології вирішують наступні завдання[3-5]:

- виконання додатків у хмарі;
- віртуалізація обладнання і обчислювальних ресурсів;
- забезпечення одночасної роботи великої кількості користувачів, причому кількість користувачів може змінюватись.

Коли йде мова про послуги (особливо платні) виникає завдання забезпечення високого рівня обслуговування користувачів. У випадку інформаційних технологій це означає, що система повинна забезпечувати швидкий обмін даними і доступ повинен

бути зрозумілим та зручним. Важливим фактором також є економічні аспекти, пов'язані з витратами на обчислювальні ресурси. Тому в хмарних системах часто існує проблема вирішення завдання пошуку оптимального співвідношення між потрібним рівнем обслуговування та економічними витратами на обчислювальні ресурси. Також існує проблема вибору методів балансування навантаження обчислювальних ресурсів, які б дозволяли гнучко змінювати об'єми реальних ресурсів в хмарній обчислювальній системі і значно збільшувати її продуктивність[1, 2-5].

Постановка завдання. Важливим завданням хмарних технологій є балансування навантаження обчислювальних ресурсів. Методи балансування навантаження переслідують наступне:

- рентабельність, тобто покращення продуктивності системи за розумну ціну;
- універсальність, тобто система має бути гнучкою, з можливістю масштабування і змінювати свої розміри та топологію. Причому алгоритм повинен залишатись працездатним при збільшенні навантаження;
- зменшення часу відгуку на запит і часу виконання запиту;
- забезпечення продуктивності, тобто всі сервери системи працюють з однаковою завантаженістю;
- розуміння алгоритму, тобто потрібно знати всі переваги та недоліки виконуваного алгоритму і розуміти як він працює.

Мета балансування навантаження:

- покращення роботи системи;
 - підтримка стабільності системи;
 - наявність резервного плану при виникненні критичних ситуацій в системі;
- можливість адаптування майбутніх модифікації системи.

Виклад основного матеріалу. На даний час існує декілька рівнів балансування навантаження: [6-9].

1. Метод кластеризації.

Даний метод дозволяє керувати декількома незалежними серверами як однією системою, що дозволяє значно спростити керування системою і зробити її універсальною. Схему балансування навантаження методом кластеризації показано на рис. 1:

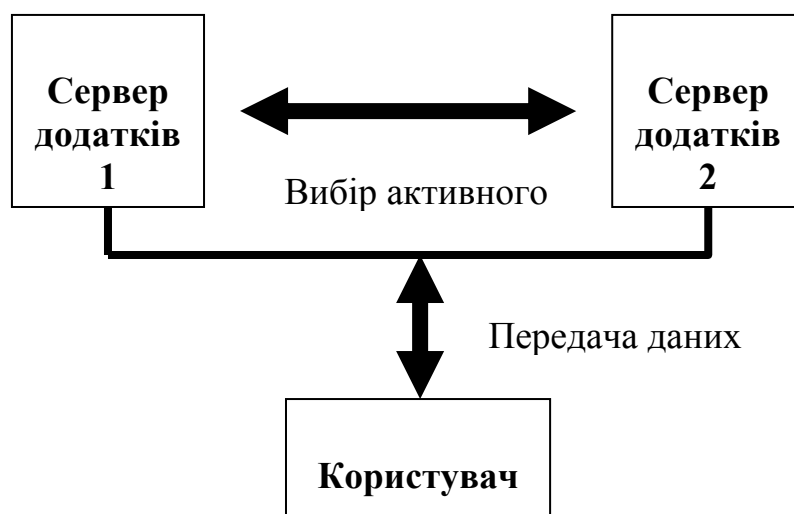


Рисунок 1 – Схема балансування навантаження методом кластеризації

Джерело: [6]

Даний метод забезпечує декілька способів балансування навантаження системи:

1. Адміністративний – адміністратор вирішує як розподілити навантаження між серверами.

2. За замовчуванням – навантаження серверів розподілене порівну між ними.

Всі запити користувачів розподіляються між вузлами, тим самим балансуючи навантаження під час видалення вузла кластера або додавання нового. При зміні навантаження на апаратну частину серверів розподілене навантаження не змінюється. Такий механізм розподілу навантаження показує найбільшу ефективність при використанні web-сервісів з великою кількістю клієнтів які продукують велику кількість коротких запитів при цьому забезпечується швидка реакція на зміну складу вузлів кластера.

Сервери кластера, якими керує механізм балансування навантаженням, через деякі проміжки часу обмінюються інформацією. При виявленні збоїв, коли один із серверів вийшов з ладу, вузли, що залишились розподіляють навантаження гарантуючи стабільну роботу системи і доступність до серверів, а сам збій відображується на роботі системи як невелика затримка відгуку на запит.

– Недоліки даного методу:

– Сервери повинні знаходитись в одному сегменті мережі.

– Кожний вузол потребує спеціального програмного забезпечення для функціонування кластера.

– Неможливість побудови мультиплатформеного кластера.

2. Метод балансування навантаження через один пристрій

В даному методі звертання користувача до хмари відбувається через визначений пристрій, котрий розподіляє навантаження за визначеними наперед правилами або орієнтується на час обробки запиту серверами, змінюючи встановлені параметри сесій. Причому зміни відбуваються і в заголовках сесій пакетів, що пересилаються. Схему балансування навантаження через один пристрій показано на рис.2:

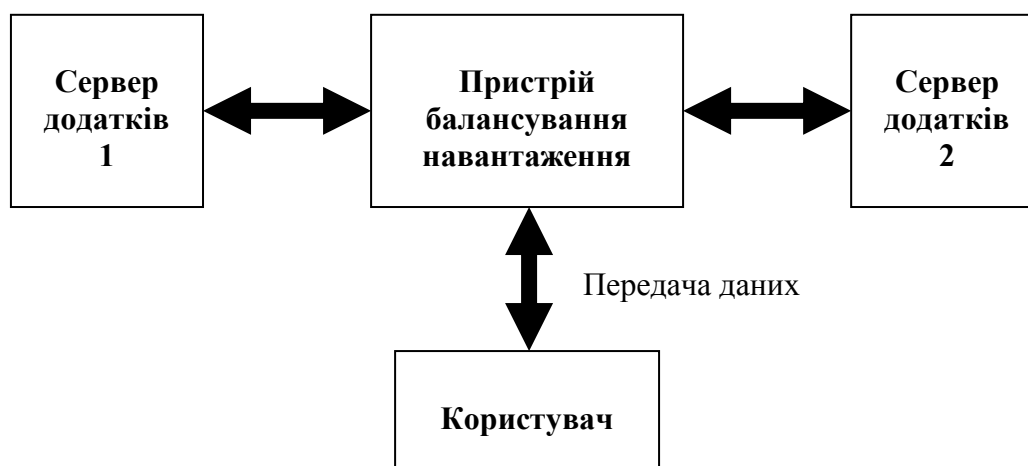


Рисунок 2 – Схема балансування навантаження через один пристрій.

Джерело: [6, 7]

Даний метод застосовується при відсутності потреби у створенні довготривалої сесії між сервером і користувачем.

3. Метод балансування навантаження з використанням проксі-сервера.

В даному методі балансування навантаження відбувається з допомогою змін заголовків на рівні вище транспортного. Запит користувача надходить на web-сервер,

де відбувається його обробка і відповідь надходить до користувача. Для збільшення продуктивності такої схеми обміну інформацією створюється проксі-сервер між користувачем і web-сервером. Схему балансування навантаження з використанням проксі-сервера представлено на рис.3:

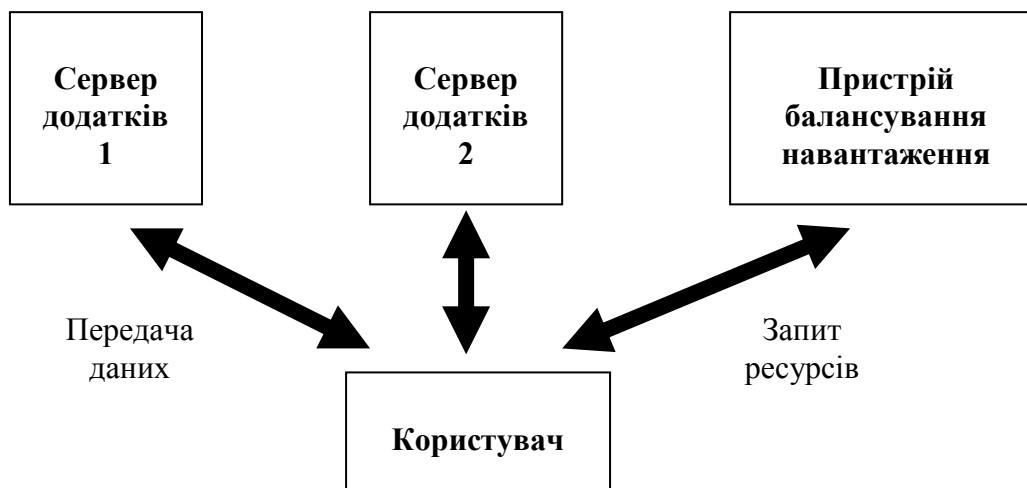


Рисунок 3 – Схема балансування навантаження з використанням проксі-сервера

Джерело: [6]

Розглянемо суть даного методу більш детально. Від користувача надходить запит на проксі-сервер, який пересилає запит на web-сервер. Web-сервер формує відповідь на запит користувача і пересилає її на проксі-сервер, де відбувається кешування відповіді від сервера. Збережена інформація передається у відповідь на всі інші запити користувача. Схему роботи проксі-сервера представлено на рис.4:

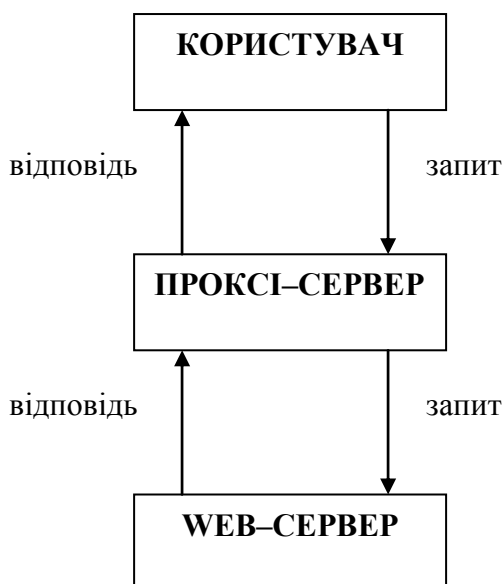


Рисунок 4 – Схема роботи проксі-сервера

Джерело: [9]

Крім того проксі-сервер балансує навантаження між web-серверами які працюють з різними областями додатків. В межах даного методу можна задавати наступні параметри:

- граничний час очікування відгуку сервера на запит;
- граничну кількість неуспішних запитів;
- можливість балансування додатків.

Недоліками даного методу балансування навантаження є:

- висока вартість апаратно-програмного комплексу який вирішує проблему балансування навантаження;
- наявність тільки одного пункту пропуску трафіка;
- використання універсальних апаратних платформ для балансування зменшує функціональні можливості і можливість масштабування системи;
- вузька галузь застосування при високих вимогах до продуктивності і надійності.

Інші методи, що не використовують пропускання трафіку через один пристрій ділять рівномірно або пропорційно запити між платформами, що входять в склад розподіленого сервера. І у випадку коли всі платформи мають різні обчислювальні потужності та різні встановлені додатки, розподіл додатків може призвести до перенавантаження одних платформ і недозавантаження інших. Навіть у випадку однорідності обчислювальних ресурсів не гарантовано, що кожний сервер буде виконувати запит однаково. В такому випадку звичайне зависання системи буде сприйматись користувачем негативно і він буде робити спробу відновити роботу з системою, що приводить до збільшення навантаження на сервер[1,2,8-14].

Крім того у хмарному середовищі на процес розподілу ресурсів можуть впливати наступні чинники:

- нерівномірна завантаженість системи;
- відсутність призначення ресурсів користувачем;
- використовувані ресурси не відповідають тим, на які створювався запит;
- відсутність інформації про реальне використання додатка в ресурсі;
- відмінність між ресурсів і класу обладнання;
- додатки використовують різні ресурси;

З метою урахування цих факторів в хмарних обчислювальних середовищах виникло декілька способів виділення і розподілення ресурсів:

- планування ресурсів диспетчером;
- кластеризація;
- призначення ресурсів вручну.

Але універсальної системи балансування навантаження все ж не існує і для кожної моделі обслуговування застосовується свій метод або множина методів[14].

Висновки. Проведений огляд показав, що існуючі методи балансування навантаження хмарних систем мають обмежене використання і на даний час універсальної системи балансування навантаження не існує. Крім того ні один із розглянутих методів не враховує такі важливі складові систем як мережа і дискова підсистема.

Методи балансування навантаження хмарних систем вимагають вдосконалення, метою якого повинна бути можливість повного моніторингу системи для задоволення вимог користувачів і розробників.

Список літератури

1. Карр Н. Великий переход: что готовит революция облачных технологий. / перевод. Андрей Баранов. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. URL: http://loveread.ec/view_global.php?id=66055/
2. Андреевский И.Л. Технологии облачных вычислений. СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2018. 79 с.
3. Caballer M., Blanquer I., Moltó G., de Alfonso C. Dynamic management of virtual infrastructures . *Journal of Grid Computing*. 2015. Vol. 13. No. 1. P. 53–70. Doi: 10.1007/s10723-014-9296-5
4. Giannakopoulos I., Konstantinou I., Tsoumakos D., Koziris N. Cloud application deployment with transient failure recovery . *Journal of Cloud Computing*. 2018. Vol. 7. No. 1. Art. no. 11. Doi: 10.1186/s13677-018-0112-9
5. Spanaki P., Sklavos N. Cloud Computing: Security Issues and Establish-ing Virtual Cloud Environment via Vagrant to Secure Cloud Hosts . *Computer and Network Security Essentials*. Springer, 2018. P. 539–553. Doi: 10.1007/978-3-319-58424-9_31
6. Hashimoto M. Vagrant: Up and Running: Create and Manage Virtualized Development Environments . O'Reilly Media Inc, 2013.
7. Mouat A. Using Docker: Developing and Deploying Software with Con-tainers . O'Reilly Media Inc, 2016.
8. Sammons G. Learning Vagrant: Fast programming guide – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.
9. Peacock, M. Creating Development Environments with Vagrant . Packt Publishing Ltd, 2015.
10. Iuhasz G., Pop D., Dragan I. Architecture of a scalable platform for monitoring multiple big data frameworks . *Scalable Computing: Prac-tice and Experience*. 2016. V. 17. No. 4. P. 313-321. Doi: 10.12694/scpe.v17i4.1203
11. Nikulchev E., Ilin D., Kolyasnikov P., Belov V., Zakharov I., Malykh S. Programming Technologies for the Development of Web-Based Platform for Digital Psychological Tools . *International journal of advanced computer science and applications*. 2018. Vol. 9. No. 8. P. 34-45. Doi:10.14569/IJACSA.2018.090806
12. Kashyap S., Min C., Kim T. Opportunistic spinlocks: Achieving virtual machine scalability in the clouds . *ACM SIGOPS Operating Systems Review*. 2016. Vol. 50. No. 1. P. 9-16. Doi: 10.1145/2903267.2903271.
13. Saikrishna P. S., Pasumarthi R., Bhatt N. P. Identification and multivari-able gain-scheduling control for cloud computing systems . *IEEE Trans. Control Sys. Technol.*, 2016, Vol.25, no.3, pp.792-807.
14. Савельев А.О. Введение в облачные решения Microsoft. Курс лекций. 2-е издание, исправленное. М.: НОУ Интуит, 2016.

References

1. Karr, N. (2014). Velikij perehod: Chto govorit revoliusia oblashnyh tehnologij Elektron. dan. M.: Mann, Ivanov i Ferber [in Russian].
2. Andreevskij, I.L. (2018). Tehnologii ooblachnyh vychislenij . Spb.: Sankt-Peterburjskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet [in Russian].
3. Caballer, M., Blanquer, I., Moltó, G. & de Alfonso C. (2015). Dynamic management of virtual infrastructures . *Journal of Grid Computing*. V. 13. No. 1. P. 53–70. Doi: 10.1007/s10723-014-9296-5 [in English].
4. Giannakopoulos I., Konstantinou I., Tsoumakos D. & Koziris N. (2018). Cloud application deployment with transient failure recovery . *Journal of Cloud Computing*. V. 7. No. 1. Art. no. 11. Doi: 10.1186/s13677-018-0112-9 [in English].
5. Spanaki, P. & Sklavos, N. (2018). Cloud Computing: Security Issues and Establish-ing Virtual Cloud Environment via Vagrant to Secure Cloud Hosts . *Computer and Network Security Essentials*. Springer, P. 539– 553. Doi: 10.1007/978-3-319-58424-9_31 [in English].
6. Hashimoto, M. (2013). Vagrant: Up and Running: Create and Manage Virtualized Development Environments – O'Reilly Media Inc. [in English].
7. Mouat A. (2016). Using Docker: Developing and Deploying Software with Con-tainers .O'Reilly Media Inc. [in English].
8. Sammons G. (2016). Learning Vagrant: Fast programming guide . CreateSpace Independent Publishing Platform. [in English].
9. Peacock, M. (2015). Creating Development Environments with Vagrant . Packt Publishing Ltd. [in English].

10. Iuhasz, G., Pop, D. & Dragan, I. (2016). Architecture of a scalable platform for monitoring multiple big data frameworks . *Scalable Computing: Prac-tice and Experience*. V. 17. No. 4. P. 313-321. Doi: 10.12694/scpe.v17i4.1203 [in English].
11. Nikulchev, E., Ilin, D., Kolyasnikov, P., Belov, V., Zakharov, I. & Malykh, S. (2018). Programming Technologies for the Development of Web-Based Platform for Digital Psychological Tools . *International journal of advanced computer science and applications*. V. 9. No. 8. P. 34-45. Doi:10.14569/IJACSA.2018.090806 [in English].
12. Kashyap, S., Min. C. & Kim. T. (2016). Opportunistic spinlocks: Achieving virtual machine scalability in the clouds . *ACM SIGOPS Operating Systems Review*. V. 50. No. 1. P. 9-16. Doi: 10.1145/2903267.2903271 [in English].
13. Saikrishna, P. S., Pasumorthy, R. & Bhatt, N. P. (2016). Identification and multivari-able gain-scheduling control for cloud computing systems *IEEE Trans. Control Sys. Technol.*, Vol.25, no.3, pp.792-807.
14. Saveljev A.O. (2016). *Introduction to Microsoft Cloud Solutions..* (2d ed.). Moskow :NOU Intuit [in Russian].

Roman Minailenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vitalii Reznichenko**, lecturer, **Oksana Konoplińska-Slobodenyuk**, lecturer, **Liudmyla Polishchuk**, Senior Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Overview of Load Balancing Methods in Cloud Systems

Cloud systems are currently the most popular concept of information systems and are the result of the evolution of a chain of methods for their construction. The main task of cloud technologies is to create a virtual cloud system consisting of virtual distributed resources. These resources provide remote provisioning of cloud access services with the required level of customer service

Analysis and load balancing in cloud systems is quite an urgent task, as most open access cloud systems use simple load schedulers for their physical servers.

The problem of load balancing requires a solution not when the server unexpectedly failed in the process of working on the task, which discourages users from using such a product, but at the very beginning of the project. In the early stages of design, it is acceptable to increase capacity by connecting new servers or using code optimization algorithms. But when a certain limit is reached, these measures become insufficient.

The article reviews the methods of load balancing in cloud systems. It is shown that the existing methods of load balancing of cloud systems have limited use and currently there is no universal load balancing system. In addition, none of the considered methods takes into account such important components of systems as network and disk subsystem. Load balancing methods for cloud systems require improvement, the purpose of which should be the ability to fully monitor the system to meet the requirements of users and developers.

cloud systems, computing resources, load balancing, performance

Одержано (Received) 27.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 04.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 621.3.019.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.195-202>

В.В. Смірнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук,
Ю.М. Пархоменко, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький,
Україна*

e-mail: swckntu@gmail.com

Бездротова локальна мережа класу Smart Home на базі модулів сплітерів-репітерів

Наведено опис архітектури бездротової локальної мережі розробленої для використання в житлових приміщеннях. Описано базові модулі, розроблені для забезпечення кластеризації і сегментації груп об'єктів мережі. Модулі дозволяють розподілити загальний трафік в мережі по різних каналах, що знижує ймовірність виникнення колізій. Описана концепція роботи бездротової мережі на основі кластеризації і сегментації. Наведено структуру експериментальної бездротової мережі з низьким рівнем випромінювання на частоті 2.4 GHz. Представлений результат порівняльної оцінки рівня випромінювання між трансиверами мережі і пристроями Wi-Fi, який підтверджує правильність технічних рішень, використаних при створенні мережі.

бездротова мережа, архітектура, контролер, кластер, спліттер, хаб, комутатор

Постановка проблеми. В даний час для створення бездротових локальних мереж в житлових приміщеннях з метою вирішення завдань домашньої автоматизації і управління побутовою технікою використовуються різні технології і мережеве обладнання.

Установка таких мереж в житлових приміщеннях на пострадянському просторі не є поширеним явищем у зв'язку з відносно високою вартістю технічного обладнання мереж і складністю їх установки.

Однак, існує велика кількість ентузіастів, які проектують і встановлюють локальні мережі в домашніх умовах.

Як правило, архітектура мереж побудована на використанні серверів і протоколів MQTT, а в якості мережевого обладнання використовуються модулі Arduino і Raspberry P, чіпи ESP8266, ESP32 і BlueTooth, модулі GSM і трансивери 2.4 GHz.

Недоліком MQTT взаємодії об'єктів мережі слід вважати його залежність від можливості доступу об'єктів мережі до MQTT сервера.

Одним з найважливіших факторів при експлуатації бездротової домашньої мережі є безпека для людини. Пристрої Wi-Fi є джерелами електромагнітного випромінювання в НВЧ діапазоні 2,4 GHz і 5 GHz.

В процесі установки бездротової мережі фактор безпеки далеко не завжди враховується і житловий простір в приміщеннях перенасичений пристроями Wi-Fi.

Тому існують проблеми:

- проблема установки бездротової мережі класу Smart Home користувачами без відповідної кваліфікації;
- проблема обмеженого вибору архітектури та технічного обладнання мережі;
- проблема безпечної експлуатації бездротової мережі в житлових приміщеннях.

Аналіз досліджень і публікацій. Існує ряд стандартів для бездротових мереж. На їх основі реалізуються мережеві архітектури на базі різних технологій.

Мережеві стандарти IEEE 802.11 реалізується технологією Wi-Fi [1,2].

Мережа на основі Wi-Fi працює в діапазонах 2,4 і 5 GHz і забезпечує високу пропускну здатність. До недоліків технології можна віднести обмежену кількість одночасних з'єднань, відносно великий час встановлення з'єднання (до 10 секунд) і відносно великий струм споживання.

Мережевий стандарт IEEE 802.15.4 реалізується технологією ZigBee для маршрутизованих радіомереж. Розроблено групою ZigBee Alliance [3-6].

Стандарт визначає два типи вузлів мережі: повнофункціональний пристрій Full-Function Device (FFD) і пристрої з полегшеними функціями Reduced-Function Device (RFD). Пристрій FFD є координатором мережі і може виконувати функції загального вузла. Пристрій RFD є простим пристроєм і не може виконувати функції координатора.

Мережа на основі ZigBee може бути одноранговою з топологією peer-to-peer (P2P), або мати топологію «зірка». Мережа повинна мати мінімум один FFD.

Мережі P2P можуть створювати довільні структури з'єднань і є основою для мереж, здатних до самоврядування і організації. Однак ZigBee не реалізує ці функції, що є перешкодою для застосування технології ZigBee.

Мережа Z-Wave на основі ITU-T G.9959 [7-8] дозволяє створювати комірчасті мережі, що самоорганізуються. Однак, для створення контролерів мережі необхідно мати сертифікат союзу Z-Wave Alliance на правах члена Full Member.

Мережевий стандарт IEEE 802.16 реалізується технологією WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [9-10]. У цій технології реалізується концепція множинного доступу з поділом за часом (TDMA).

Однак, технологія вимагає використання базових станцій, абонентських станцій і обладнання для організації зв'язку між базовими станціями.

Це не відповідає концепції створення локальної мережі малої вартості для будинку або невеликих господарських об'єктів.

Постановка задачі. Авторами розроблений варіант реалізації бездротової мобільної мережі [11,12], але для мережі класу Smart Home він є надмірним. Тому необхідно розробити полегшену версію мережі класу Smart Home, яка повинна забезпечити:

- стабільну взаємодію об'єктів мережі при зміні її топології;
- обмін даними між об'єктами мережі без локального MQTT сервера;
- безпечний для людини сумарний рівень випромінювання передавачів трансиверів і мінімальний рівень перешкод в діапазоні 2.4 MHz;
- можливість установки, настройки і експлуатації мережі силами некваліфікованого користувача.

Для вирішення цих завдань необхідно розробити відповідну архітектуру, мережеве обладнання та системне програмне забезпечення бездротової локальної мережі.

Виклад основного матеріалу. У локальних бездротових мережах Smart Home обмін даними між об'єктами мережі реалізується через локальний MQTT сервер.

Така архітектура мережі має два недоліка. Один полягає в тому, що при відмові або недоступності локального MQTT сервера вся мережа стає непрацездатною, а об'єкти мережі - некерованими.

Другий недолік полягає в тому, що при зміні положення об'єкта мережі в просторі, об'єкт може втратити зв'язок з MQTT сервером і також стати некерованим.

Для того, щоб цього не сталося, трансивер вузла мережі повинен забезпечити підвищену потужність передавача.

Тому архітектура розробленої мережі не передбачає використання MQTT сервера в якості засобу обміну даними між вузлами мережі.

Архітектура мережі також передбачає кластеризацію, сегментування груп об'єктів і механізм маршрутизації пакетів в мережі. Функції маршрутизатора виконують координатори кластерів, підмереж і сегментів мережі. Координатором групи може стати будь-який об'єкт мережі з більшим логічним номером в групі об'єктів.

Обмін інформацією в мережі здійснюється на основі методу CSMA / CD, тобто в умовах постійного конфлікту за доступ до середовища передачі, що значно знижує трафік в мережі.

Розв'язана задача ефективного використання загального трафіку в мережі шляхом логічного поділу всіх об'єктів мережі на групи, кожна з яких працює на різних каналах, не втручаючись у трафік сусідньої групи.

Ширина смуги пропускання кожного каналу - 1MHz, кількість каналів - 128.

Точки доступу Wi-Fi мають смугу пропускання 20-40 MHz і відповідно, меншу кількість каналів. Тому об'єкту мережі з пропускнуою здатністю 1MHz легше знайти вільний канал, ніж вузлу Wi-Fi.

Завдання зменшення колізій між об'єктами мережі вдалося вирішити шляхом створення спеціального обладнання на базі чіпа Beken 2461 [13]. На базі двох трансиверів створений модуль спліттера (роздільника) каналів обміну даними, який також виконує функцію репитера (повторювача) (рис. 1).

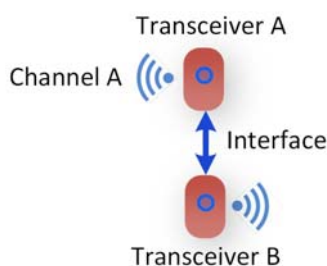


Рисунок 1 – Модуль спліттера - репитера

Джерело: розроблено авторами

За допомогою спліттера-репитера (S / R) можна збільшити фізичну протяжність мережі і з'єднати як окремі об'єкти мережі (рис. 2), так і сукупність об'єктів, організованих в кластери, сегменти і підмережі (рис. 3).

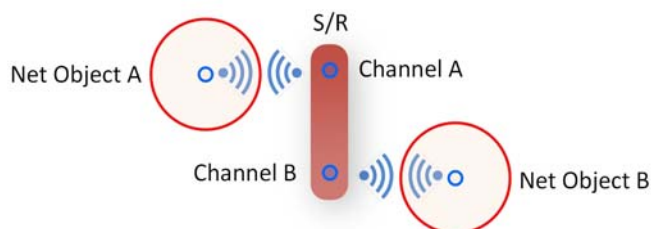


Рисунок 2 – З'єднання двох об'єктів мережі за допомогою спліттера-репитера

Джерело: розроблено авторами.

Розподіл каналів (Ch_A ... Ch_D) необхідно для виключення впливу різних груп мережевих об'єктів на загальний канал передачі даних.

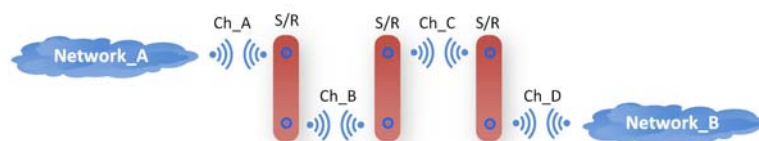


Рисунок 3 – З'єднання груп об'єктів за допомогою ланцюжка сплітерів-репітерів

Джерело: розроблено авторами.

Для забезпечення гнучкості архітектури бездротової мережі розроблені модулі дротового (Wired) і бездротового (Wireless) хабів (HUB) і комутаторів (Switch). Структура модулів дротового і бездротового хабів представлена на рис. 4.

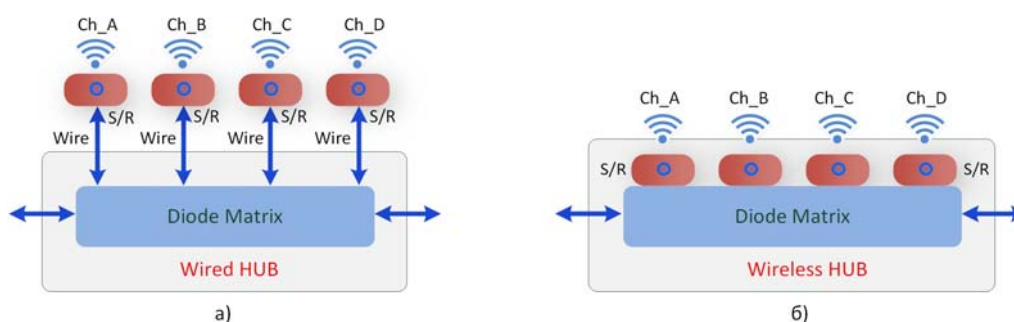


Рисунок 4 – Модулі дротового а) і бездротового б) хабів

Джерело: розроблено авторами.

Модулі сплітерів-репітерів з'єднуються з хабом за допомогою дротового з'єднання, що дозволяє розподілити окремі сегменти мережі по різних приміщеннях крізь перешкоди, що викликають загасання сигналу на частоті 2.4 GHz, таких, як залізобетонні стіни, металеві покриття і перегородки, водні резервуари і т.д.

Бездротовий хаб відрізняється від дротового тим, що сплітери-репітери конструктивно інтегровані в корпус хаба і є цілісною конструкцією. Модуль бездротового хаба призначений для об'єднання координаторів сегментів мережі в єдиний адресний простір у межах області дії трансиверів.

Модулі хабів об'єднують всі підключені сегменти мережі в загальний адресний простір, при цьому можлива ситуація конфлікту координаторів сегментів мережі за доступ до середовища передачі.

В умовах невисокого трафіку в мережі застосування хабів цілком достатньо для вирішення завдань автоматизації і управління об'єктами мережі.

Однак, якщо трафік між сегментами мережі досить високий, доцільно забезпечити їх з'єднання з поділом загального потоку трафіку на кілька незалежних потоків по різних каналах передачі даних.

Для вирішення цього завдання був створений дротовий і бездротовий модуль комутатора (рис.5).

На відміну від хаба, комутатор включає в себе контролер, який комутує модулі сплітерів-репітерів відповідно до адреси пакета даних.

Призначення і застосування дротового і бездротового варіанту модулів комутатора аналогічно області застосування хабів. Тобто, при наявності перешкод, що викликають велике загасання сигналу мережі або при великому видаленні сегментів

мережі в умовах недостатньої потужності передавачів трансиверів, доцільно використання застосування дротового модуля комутатора.

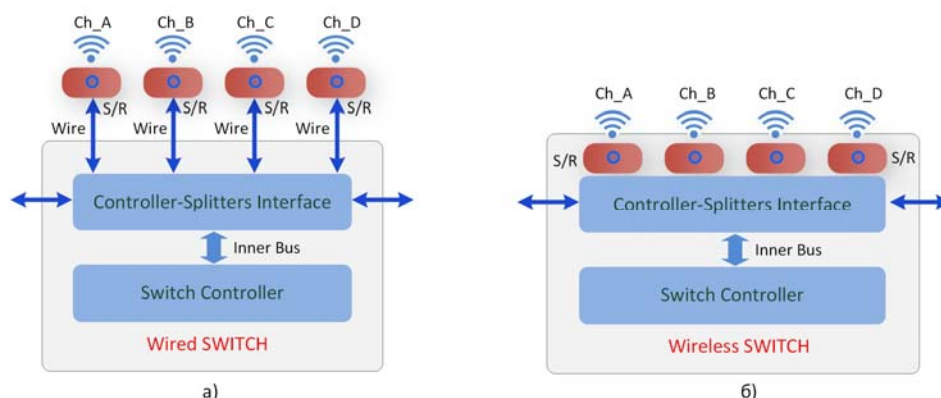


Рисунок 5 – Модулі дротового а) і бездротового б) комутатора

Джерело: розроблено авторами.

Для перевірки правильності архітектурних, алгоритмічних і схемотехнічних рішень, використаних при розробці мережевих модулів була створена експериментальна бездротова локальна мережа Smart Home.

Локальна мережа включає в себе 30 об'єктів, які згруповані в чотири кластери і дві підмережі, об'єднані двома комутаторами і одним сплиттером-репитером (рис 6).

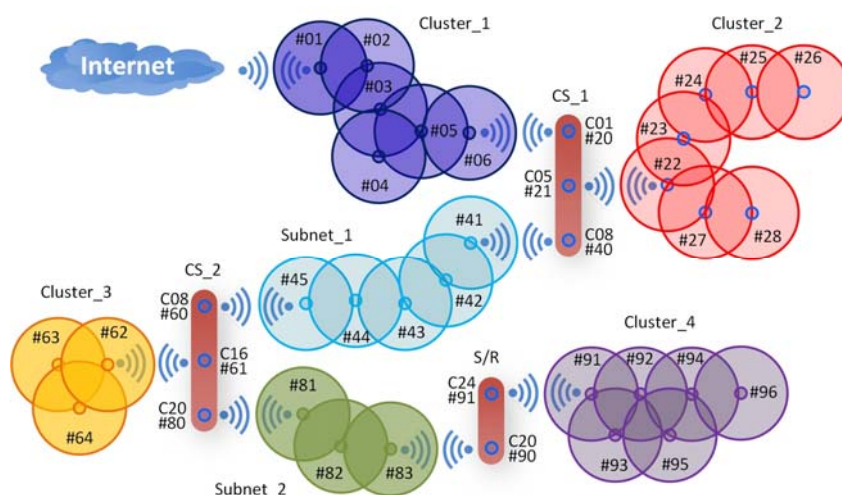


Рисунок 6 – Експериментальна бездротова локальна мережа Smart Home

Джерело: розроблено авторами.

У процесі моніторингу мережі будь-яких збоїв і порушень в роботі мережі не спостерігалось. При значному збільшенні загального трафіку мережі в тестовому режимі відзначалися невеликі затримки в передачі мережевих пакетів тривалістю до 10 мс.

Затримки обумовлені як завантаженістю радіоканалу перешкодами від об'єктів Wi-Fi, так і конфліктами об'єктів мережі в межах кластерів і підмереж.

Також була створена спеціальна програма для оцінки параметрів бездротової мережі.

Оцінка рівнів сигналів в діапазоні 2.4 GHz показує, що сумарне випромінювання від 30 об'єктів мережі Smart Home на 35 dB менше, ніж від 5 Wi-Fi об'єктів (рис. 7).

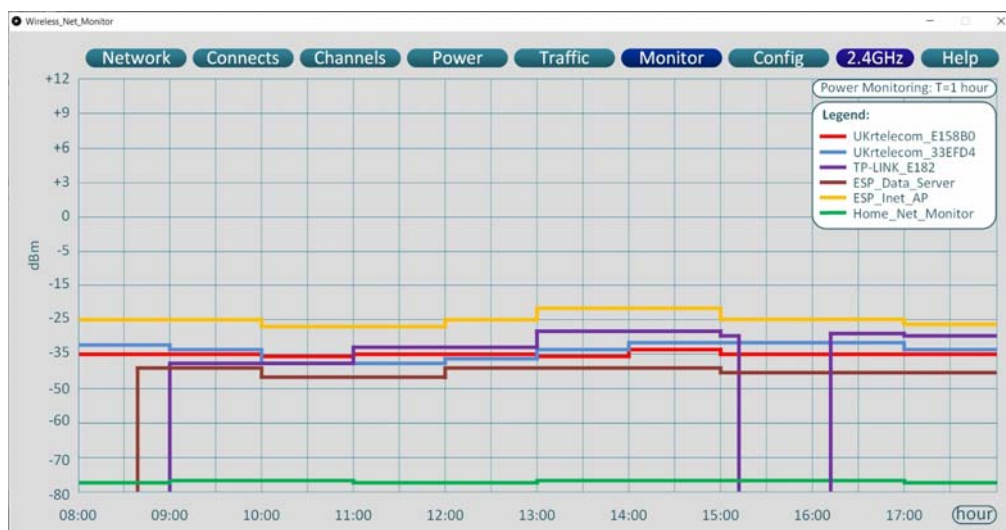


Рисунок 7 – Оцінка рівнів СВЧ випромінювання через бездротову локальну мережу Smart Home
Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Встановлено, що архітектура бездротової мережі, заснована на кластеризації і сегментації груп об'єктів мережі і поділ каналів середовища передачі даних сприяє підвищенню якісних характеристик мережі.

Зменшено кількість колізій, обумовлених властивостями методу доступу до середовища передачі CSMA / CD, тим самим знижені тимчасові затримки в процесі обміну даними між об'єктами мережі.

Розроблені модулі сплітерів-репітерів є основою для побудови модулів хабів і комутаторів. Використання цих мережевих модулів дає можливість створювати бездротову мережу Smart Home з довільною топологією.

Невисока вартість і простота установки мережі сприяє її широкому розповсюдженню в секторі автоматизації побутових пристроїв в рамках концепції Smart Home.

Низький рівень випромінювання в діапазоні 2.4 GHz є необхідною умовою для безпечної експлуатації бездротової локальної мережі в житлових приміщеннях.

Таким чином, при створенні бездротової мережі Smart Home з використанням технічних рішень на основі модулів сплітерів-репітерів вирішені поставлені завдання:

- забезпечена стабільна взаємодія об'єктів мережі при зміні її топології;
- реалізований обмін даними між об'єктами мережі без локального MQTT сервера;
- досягнутий безпечний для людини сумарний рівень випромінювання передавачів трансиверів і мінімальний рівень перешкод в діапазоні 2.4 MHz;
- реалізована можливість установки, настройки і експлуатації мережі силами некваліфікованого користувача.

Список літератури

1. Brian Verenkoff Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology. July 2011. 8 p. URL: https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf (дата звернення: 30.09.2020).

2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6. URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> (дата звернення: 30.09.2020).
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата звернення: 30.09.2020).
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2003.06.12. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html (дата звернення: 30.09.2020).
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата звернення: 30.09.2020).
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. Jan. 2020. URL: <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> (дата звернення: 30.09.2020).
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices. Vesternet Ltd. 28.01.2020. URL: <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> (дата звернення: 30.09.2020).
8. Recommendation G.9959. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> (дата звернення: 30.09.2020).
9. WiMAX Forum. URL: <http://wimaxforum.org> (дата звернення: 30.09.2020).
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (дата звернення: 30.09.2020).
11. Смірнов В.В., Смірнова Н.В. Архітектура контролера вузла адаптивної мобільної мережі з аморфною топологією. Центральнотехнічний науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. праць. 2020. Вип. 3(34). С. 12-21. URL : <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10422>
12. Смірнов В.В., Смірнова Н.В. Архітектура адаптивної бездротової локальної мережі для управління об'єктами і пристроями *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 50. С. 219-229. URL : <http://zborniksgm.kntu.kr.ua/pdf/50/28.pdf>
13. BK2461 Datasheet - FLIP51 MCU+RF : Beken Corporation. 95 p. URL :<http://www.bekencorp.com/index/goods/detail/cid/6.html> (дата звернення: 10.06.2021).

Referencis

1. Brian Verenkoff. (July 2011). Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology : website. *lmi.net*. Retrieved from https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf [in English].
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6 (n.d.) : website. *wi-fi.org*. Retrieved from <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> [in English].
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks (2003.06.12). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html [in English].
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques (Jan. 2020) : website. *libris.kb.se*. Retrieved from <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> [in English].
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices (28.01.2020). *Vesternet Ltd.* : website. *vesternet.com*. Retrieved from <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> [in English].
8. Recommendation G.9959 (n.d.) : website. *itu.int*. Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> [in English].

9. WiMAX Forum (n.d.) : website. *wimaxforum.org*. Retrieved from <http://wimaxforum.org> [in English].
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems (29 May 2009) : website. *legal.vvv.enseirb-matmeca.fr*. Retrieved from <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> [in English].
11. Smirnov, V.V. & Smirnova, N.V. (2020). Arkhitektura kontrolera vuzla adaptivnoyi mobil'noyi merezhi z amorfnoyu topolohiyeyu [Adaptive mobile network with amorphous topology node controller architecture]. *Tsentrал'noukrayins'kyi naukovy visnyk. Tekhnichni nauk: Zb. nauk. prats' – Central ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. Vol. 3(34).* 12-21. Retrieved from : <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10422> [in Ukrainian].
12. Smirnov, V.V. & Smirnova, N.V. (2020). Arkhitektura adaptivnoyi bezdrotovoi lokal'noyi merezhi dlya upravlinnya ob'ektamy i prystroyamy [Adaptive wireless LAN architecture for object and device management]. *Konstruiuvannya, vyrobnyctvo ta ekspluatatsiya sil'skohospodars'kykh mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 50.* 219-229. Retrieved from : <http://zborniksgm.kntu.kr.ua/pdf/50/28.pdf> [in Ukrainian].
13. BK2461 Datasheet (2015). FLIP51 MCU+RF : Beken Corporation. 95 p. Retrieved from : <http://www.bekencorp.com/index/goods/detail/cid/6.html> [in English].

Volodymyr Smirnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Smirnova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Yuriy Parkhomenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Wireless Smart Home LAN Based on Splitters-repeater Modules

The purpose of the article is develop a wireless local area network for residential use. The article contains a description of the created channel splitter modules. The module also acts as a repeater. On the basis of repeater splitter module designed network modules hubs and switches. The hub and switch has two versions: wired and wireless. The wired version is used in conditions of a large amount of interference and a large signal attenuation.

Smart Home wireless LAN is built on the splitters-repeaters modules basis, hubs and switches. The network does not support the MQTT protocol. The network is divided into clusters and segments and supports packet routing.

The protocol stack is minimized. The functionality of the host and the network object is completely separated. The topology of the mobile network is not deterministic, amorphous and changes when the network objects move in space. In this case, some connections are lost and others arise. The routing tables are constantly updated.

The network in accordance with the laid down algorithm, is able to build the necessary topology and organize the necessary connections in order to complete the task with a many objects. The network is capable of building packet retransmission chains for remote network objects. Thus, the wireless network implementation at its low cost allows solving a certain range of tasks. The performer can be either a separate object associated with the operator through a many repeaters.

In order to increase the efficiency of the formation of routing tables and minimize the cluster structures in a wireless network. The local wireless network is designed to control an Internet of Things objects.

wireless network, architecture, controller, cluster, splitter, hub, switch

Одержано (Received) 04.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 09.10.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 681.542.35

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.203-210>

В.О. Кондратець, проф., д-р техн. наук, **О.М. Сербул**, доц., канд. техн. наук,
О.К. Дідик, доц., канд. техн. наук, **А.М. Мацуй**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна*

e-mail: serbulan@ukr.net

Система автоматичного регулювання співвідношення тверде/рідке в млинах з циркулюючим навантаженням

В статті приведені проміжні результати розробки і випробування системи автоматичного регулювання співвідношення тверде/рідке в кульових млинах, що працюють зі спіральними механічними класифікаторами в замкнутому циклі. **вимірювання співвідношення тверде/рідке, оптимізації вибору вимірювальних засобів, області зміни коливальних параметрів на вході млина**

Постановка проблеми. Найбільше розповсюдження при збагаченні залізних руд отримали схеми мокрого подрібнення, до складу яких входить кульовий млин, що працює в замкнутому циклі зі спіральним класифікатором. Робота даного агрегату залежить від розрідження пульпи в ньому, яке характеризується співвідношенням тверде/рідке. Подача на вхід кульового млина одночасно руди і пісків класифікатора, а також зміна циркулюючого навантаження в широких межах сильно ускладнюють визначення даного технологічного параметра. Така ситуація призвела до того, що співвідношення тверде/рідке у млинах, які працюють в таких умовах не можливо автоматично регулювати, в свою чергу, відхилення розрідження пульпи від необхідного значення приводить до значних збитків.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Задача автоматичного регулювання співвідношення тверде/рідке ускладнюється ще й тим, що в таких умовах циркулююче навантаження здебільшого змінюється в межах 50 – 150 % [1]. Невелике значення циркулюючого навантаження не дає можливості виміряти його із достатньою точністю. Регулювання співвідношення тверде/рідке лише по вихідному живленню рудою і піскам додатково збільшує результуючу похибку у $\sqrt{2}$ разів [2].

Постановка завдання. При розв'язанні даної технічної задачі основною перешкодою є те, що не можливо здійснити вимірювання параметрів, зв'язаних з пісковим потоком саме з тією точністю, якої вимагає технологічний процес. Похибка стабілізації співвідношення тверде/рідке, наприклад, може бути прийнята на рівні $\pm 3,0$ % [1], при цьому похибка визначення параметрів пісового потоку може складати $\pm 5,0$ %, а іноді і більше. Розв'язання вказаної задачі ускладнює ще й те, що млин, як керований об'єкт по каналу співвідношення тверде/рідке не досліджувався, не досліджувались його комунікації як об'єкт визначення розрідження пульпи, а практика автоматичного регулювання цього параметра не досліджувалася, окрім випадку роботи агрегату в розімкнутому циклі.

Виклад основного матеріалу. Розв'язання даної задачі виконувалось в кілька етапів.

Дослідження кульового млина як керованого об'єкта по каналу розрідження пульпи показало, що він описується рівнянням

$$T_m \frac{dM}{dt} + M = T_m \cdot \delta_p \cdot Q_{vp} + T_m \cdot \delta_g \cdot Q_{vg}, \quad (1)$$

де M – маса матеріалу у млині;

$T_m = \frac{F_m \cdot l}{Q_{vl}}$ – стала часу кульового млина;

δ_p, δ_g – густина руди і води відповідно;

Q_{vp}, Q_{vg} – об'ємні витрати руди та води відповідно;

F_m – площа поперечного перерізу матеріалу в агрегаті;

l – довжина барабана кульового млина;

$Q_{vl} = Q_{vp} + Q_{vg}$ – сумарні витрати матеріалу.

Розв'язок рівняння (1) дає можливість охарактеризувати зміну маси матеріалу в млині в часі за умови подачі на вхід ступінчастого діяння – об'ємних витрат води або руди. Незмінне значення маси матеріалу в млині однозначно буде характеризувати відповідне співвідношення тверде/рідке.

Рівняння (1) дає можливість отримати перехідні і частотні характеристики керованого об'єкта. Динамічні характеристики досліджувалися на прикладі млина МШЦ при зміні витрат руди на вході від 220 т/год до 260 т/год, циркулююче навантаження при цьому змінювалося в межах 100 – 200 %. Отримані дані показують, що стала часу млина може бути в межах від 125 до 159 с. Млин, виведений з рівноваги вхідним діянням ступінчастого виду, по розрідженню пульпи приходить у новий рівноважний стан за різний час. Більш тривалишим перехідний процес буде у випадках зменшення об'ємних витрат матеріалу. Найменша тривалість перехідного процесу складає 500 с, а найбільша – 640 с.

$T_m \delta_p$ і $T_m \delta_g$ – коефіцієнт підсилення регульованого об'єкта, тому він є змінною величиною. Якщо враховуємо змінність в широких межах сталої часу та коефіцієнтів підсилення, приходимо до висновку, що по каналу розрідження пульпи млин є регульованим об'єктом зі змінними параметрами.

При регулюванні завантаження млина рудою в автоматичному режимі створюватимуться керуючі впливи по об'ємним витратам твердого Q_{vp} , які є близькими до ступінчастих. На вході кульового млина такі ж діяння будуть і при автоматичному регулюванні розрідження пульпи, змінюватись лише будуть Q_{vg} – витрати води. А значить, важливим є дослідження фільтруючих можливостей об'єкта керування, оскільки керуючі діяння по воді та збурюючі діяння по руді можуть суттєво змінювати розрідження пульпи в окремих ділянках млина.

Фільтруючі можливості млина можливо дослідити за його амплітудними частотними характеристиками (АЧХ), які показали, що при малих колових частотах АЧХ залежить від режиму роботи млина – величини циркулюючого навантаження та витрат вихідної руди. При частотах, вищих $0,015 \text{ с}^{-1}$, фільтруючі властивості об'єкта керування не залежать від режиму його роботи. Цей факт дає можливість стверджувати, що при колових частотах, вищих $0,015 \text{ с}^{-1}$, об'єкт керування пригнічує коливання, його режим роботи можна не враховувати.

На вході кульового млина коливальні процеси приводять до відносних коливань маси матеріалу

$$\Delta_M, \% = \frac{\dot{M}}{M} 100\% \quad (2)$$

де $\dot{M}$, M – змінне та постійне значення маси матеріалу в млині відповідно.

Оскільки

$$\dot{M} = A_p(\omega) \cdot \dot{Q}_{vp}, \quad (3)$$

де $A_p(\omega)$ – АЧХ керованого об'єкта;

$\dot{Q}_{vp}$ – змінна складова об'ємних витрат руди, коливання маси матеріалу в млині залежатимуть від амплітуди і частоти коливань на вході.

Тобто, ΔM є функцією двох змінних. З використанням обчислювальної техніки отримані просторові діаграми відносного коливання маси матеріалу в млині від амплітуди і від частоти впливів на його вході по руді і по воді. Такі діаграми для типового режиму роботи млина наведені на рис. 1, з якого видно, що як по воді, так і по твердому найнебезпечнішими є коливання із занадто малою частотою і зі значними амплітудами. Однак, слід зазначити, що і при проміжних значеннях вхідних коливань виникають значні відносні відхилення маси матеріалу в млині. Комп'ютерна обробка масиву даних дала можливість отримати області зміни коливальних параметрів на вході млина по воді і по твердому, при яких відносні відхилення маси матеріалу в млині не перевищують 3,0 %, а це гарантує нормальний хід процесу. На рис. 2 приведені області зміни коливальних параметрів. Якщо амплітуди і частоти коливань на вході млина по руді і по воді не будуть виходити за межі вказаних областей, то розрідження пульпи і відхилення маси в технологічному агрегаті будуть зберігатись в допустимих межах. Межі знайдених областей зміни технологічних параметрів на вході млина при реалізації автоматичного керування повинні слугувати обмеженнями.

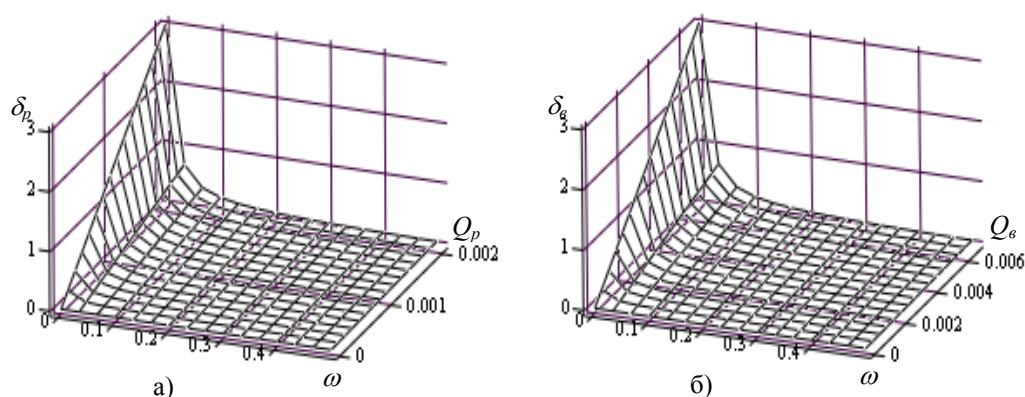


Рисунок 1 – Просторові діаграми коливання маси матеріалу в млині від амплітуди і від частоти діянь на вході по руді (а) та воді (б)

Джерело: розроблено авторами

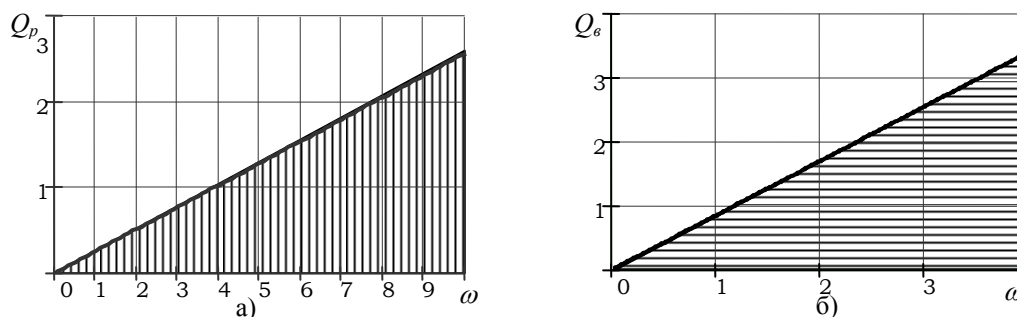


Рисунок 2 – Области зміни коливальних параметрів на вході млина по руді (а) та по воді (б), при яких відношення зміни маси матеріалу в агрегаті не перевищує 3,0 %

Джерело: розроблено авторами

Вхідні матеріальні комунікації млина включають потоки руди, води, пісків класифікатора та додаткової води в пісковий жолоб класифікатора. Аналіз показує, що дані потоки містять великий обсяг інформації, яку доцільно використати при ідентифікації співвідношення тверде/рідке в кульовому млині. Отже, вхідні матеріальні комунікації млина можуть виступати в якості об'єкта ідентифікації розрідження пульпи.

Практично всі вхідні потоки млина можуть мати запізнювання. Особливо велике запізнювання може бути в магістралі подачі води в пісковий жолоб класифікатора, а це ускладнює регулювання розрідження пульпи в автоматичному режимі. Стабілізацією витрати води в жолоб класифікатора можна ліквідувати цей недолік об'єкта керування.

У вхідних комунікаціях млина найбільш складним перетворюючим елементом є завитковий живильник. В процесі досліджень знайдена його математична модель, яка має вигляд

$$T_{\text{жс}} \frac{dH}{dt} + H = d \cdot C \cdot Q_n + d \cdot B \cdot Q_{\text{вжс}}, \quad (4)$$

де $T_{\text{жс}} = \frac{S_{\text{жс}}}{k_2}$ – постійна часу завиткового живильника;

H – рівень пульпи в приймальному пристрої завиткового живильника;

$S_{\text{жс}}$ – площа поперечного перерізу приймального пристрою;

k_2 – константа, що характеризує завитковий живильник;

$$B = \frac{1}{\delta_6}, \quad d = \frac{1}{k_2}, \quad C = \left(\frac{1}{\delta_p} + \frac{k_n}{\delta_6} \right);$$

де k_n – відносний вміст води в пісках за масою;

Q_n – масові витрати пісків;

$Q_{\text{вжс}}$ – масові витрати води в пісковий жолоб класифікатора.

Якщо $Q_{\text{вжс}} = \text{const}$, рівняння (4) прийме вигляд

$$T_{\text{жс}} \frac{dH}{dt} + H = d \cdot C \cdot Q_n. \quad (5)$$

В жолобі класифікатора створюється потік пульпи хвилеподібної форми. Якщо наближено вважати хвильовий рух пульпи синусоїдальним, то можна стверджувати, що він характеризується амплітудою $H_{\text{нм}}$ та періодом T_o . До того ж амплітуда $H_{\text{нм}}$ залежить від циркулюючого навантаження, а швидкістю обертання спіралей класифікатора визначається колова частота. Враховуючи, що спіралі здійснюють 3 об/хв, колова частота буде дорівнювати $\omega_o = 0,628 \text{ с}^{-1}$. Дослідженнями фільтруючих властивостей завиткового живильника встановлено, що рівень пульпи в ньому характеризується хвильовим процесом з амплітудою, рівень якої складає 23,8 % від рівня вхідних коливань. Ці ж коливання передаються і на вхід млина. Враховуючи, що амплітуда $H_{\text{нм}}$ в жолобі не перевищує 10 см, у приймальному пристрої живильника – 2,5 см, а загальний вплив на вхід млина за ефектом дії можна розкласти на витрати руди і витрати води, зміна вхідних діянь за амплітудою тоді буде незначною. З діаграм, приведених на рис. 2 видно, що при $\omega_o = 0,628 \text{ с}^{-1}$, впливи з боку живильника і жолоба класифікатора не виходитимуть за встановлені обмеження. А значить, завитковий живильник не змінює стану млина по каналу розрідження пульпи.

Прийнявши $Q_{\text{вжс}} = \text{const}$, слід дослідити зміну густини пульпи в пісковому жолобі класифікатора при різних значеннях циркулюючого навантаження. При $Q_{\text{вжс}} = 24,3$ т/год густина пульпи буде змінюватись в допустимих межах, а витрати води в млин при цьому повинні зростати при збільшенні циркулюючого навантаження.

Умову $Q_{\text{вж}} = \text{const}$ можна забезпечити, якщо використати систему автоматичного регулювання витрат води з використанням витратоміра, однак це рішення відрізнятиметься складністю, великою вартістю і низькою точністю підтримання заданого значення технологічного параметра. Тому теоретичні дослідження дали можливість створити просту гідравлічну інваріантну систему автоматичної стабілізації витрат води в пісковий жолоб. Вона захищена патентами України на спосіб [3] і пристрій [4]. Її випробування на стенді в різних температурних режимах і в умовах коливання тиску води в магістралі показали, що відносна похибка дозування води складає $\pm 0,85\%$.

Для реалізації автоматичного регулювання розрідженням пульпи доцільно ідентифікувати співвідношення тверде/рідке, адже воно безпосередньо не вимірюється. Авторами статті розроблений алгоритм ідентифікації, який дає змогу розв'язати задачу за умов низької точності визначення одного з технологічних параметрів. Алгоритм має такий вигляд

$$K_{m/p} = \frac{A \cdot (Q_{n1} - Q_{\text{вж}}) + Q_p}{\delta_g \cdot Q_{\text{вж}} + \delta_g \cdot Q_{\text{вж}} + k_n \cdot A \cdot (Q_{n1} - Q_{\text{вж}})}, \quad (6)$$

де $K_{m/p}$ – співвідношення тверде/рідке;

$A = \frac{\delta_p \cdot \delta_g}{(\delta_g + k_n \cdot \delta_p)}$ – постійний коефіцієнт;

Q_{n1} – об'ємні витрати пульпи в жолобі класифікатора – вимірюються з низькою точністю;

Q_p – масові витрати руди в млин.

Дослідженням чутливості $K_{m/p}$ до вимірюваних параметрів встановлено, що відносна чутливість має різні значення. Чутливість до витрат води в млин особливо велика, значно менша чутливість до витрат руди і пульпи у пісковому жолобі.

Дослідженнями підтверджено, що як похибки визначення параметрів технологічного процесу, так і самі параметри, по-різному впливають на результуючу помилку співвідношення тверде/рідке. Результуюча помилка $K_{m/p}$ завжди є меншою від помилки вимірювання характерного параметра. Особливість впливу помилок параметрів на помилку $K_{m/p}$ не змінюється при різних значеннях циркулюючих навантажень і завантаженнях млина. Результуюча помилка співвідношення тверде/рідке визначається і величиною, і знаком помилок вимірювання параметрів технологічного процесу. Для досягнення необхідної точності визначення $K_{m/p}$ можна використовувати менш точні засоби вимірювання технологічних параметрів.

В процесі оптимізації вибору вимірювальних засобів за точністю можливо отримати найкращі результати. В даній задачі критерієм оптимальності слід взяти відносну похибку ідентифікації співвідношення тверде/рідке $\delta_{K_{m/p}}, \% \leq 3,0\%$.

Оптимізація блока ідентифікації з використанням методу динамічного програмування показала, що при визначенні витрат руди з похибкою $\pm 1,0\%$, витрат води з похибкою $\pm 1,0\%$, витрат пульпи з похибкою $\pm 4,0\%$, похибка визначення $K_{m/p}$ складає $1,51\%$. Таким чином, $\delta_{K_{m/p}} = 1,51\%$, що менше допустимого значення в $3,0\%$. Це означає, що керування можна організувати і при більших похибках вимірювання витрат пульпи.

Визначений параметр $K_{m/p}$ дає можливість організувати управління формуванням розрідження пульпи на вході у млин в автоматичному режимі. Блок-схема системи автоматичного регулювання (САР) співвідношення тверде/рідке наведена на рис. 3. Магістраль подачі води у млин є регульованим об'єктом. Узагальнений регульований об'єкт містить відрізок труби подачі води (РОПВ), датчик

витрат води D_v і регулювальний орган PO . Блок ідентифікації співвідношення тверде/рідке ($БІС$) отримує інформацію з датчиків та задавачів $D_{вж}$, D_p , D_r , D_v , k_p , δ_p і формує вимірний параметр $K_{(т/р)в}$. На вході у млин формується його фактичне значення $K_{(т/р)ф}$. Задавачем $З$ вводиться задане значення $K_{(т/р)з}$. У разі невідповідності $K_{(т/р)з}$ і $K_{(т/р)в}$ в системі формується керуюче діяння $\Delta K_{т/р}$, яке приводить до змін в подачі води у млин.

В системі, наведеній на рис. 3 сигнали витрат руди і витрат пульпи є випадковими процесами. В ході теоретичних досліджень визначено, що єдиним підходом забезпечення необхідної точності визначення співвідношення тверде/рідке в цих умовах є фільтрація сигналів перед подачею на вхід $БІС$. Умовам функціонування даного блоку відповідають цифрові фільтри. Розрахунок середнього поточного значення сигналу на оптимальному часовому інтервалі їх згладжування вибрано в якості алгоритму фільтрації.

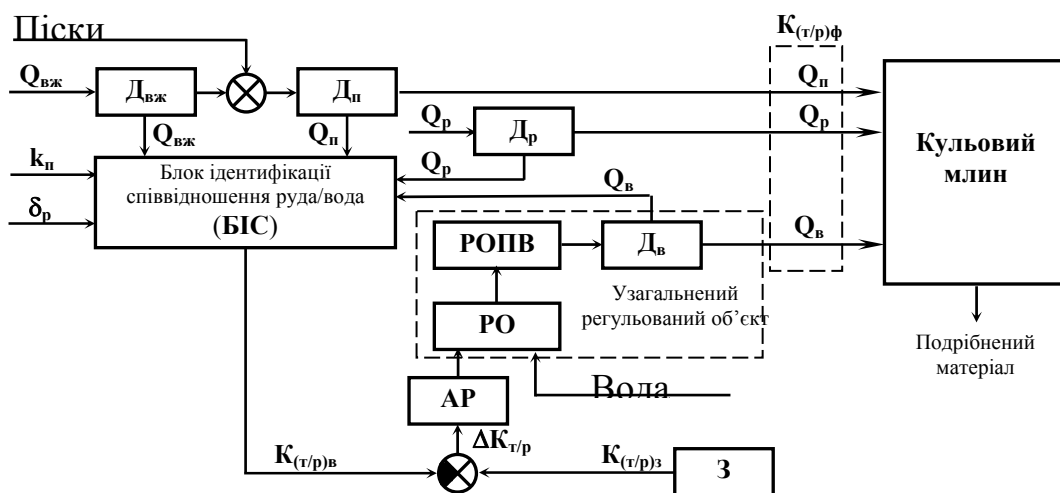


Рисунок 3 – Блок-схема системи автоматичного регулювання співвідношення тверде/рідке на вході у млин

Джерело: розроблено авторами

При реалізації цифрового фільтра на вході $БІС$ випадкові процеси переводяться у невідповідності функції часу, а значить, система автоматичного регулювання буде під впливом не випадкових, а ступінчастих сигналів, які циклічно змінюються в часі. Враховуючи характер керуючих впливів, невідповідність $K_{(т/р)в}$ і $K_{(т/р)ф}$ на вході у млин, перехідні процеси у млині та класифікаторі, особливості зміни сигналів, які впливають на стан розрідження пульпи, представлену систему автоматичного регулювання слід розглядати як оптимальну. В даній системі критерієм оптимальності є абсолютне значення відхилення від заданого значення співвідношення тверде/рідке в матеріалі, що надійшов до млина за встановлений обмежений проміжок часу, яке має бути мінімальним. Критерій оптимальності можна записати наступним чином

$$|\pm \Delta K_{(р/в)ф}| \rightarrow \min. \quad (7)$$

Слід відмітити, що критерій оптимальності змінюється в залежності від неконтрольованих факторів-впливів на характер руху пульпи в жолобі класифікатора, завантаження руди на конвеєр, розвантаження пісків, коливання крупності руди у вихідній руді та твердого у пісках.

Як обмеження на вхідні діяння, прикладені до млина, виступають області зміни їх амплітуди і їх частоти як по руді, так і по воді, які визначені з умов коливань маси матеріалу в агрегаті, що не виходять за технологічні межі $\pm 3,0 \%$.

Представлений спосіб керування розрідженням пульпи захищений патентом України [5].

Висновки. Таким чином, система автоматичного регулювання співвідношення тверде/рідке на вході у млин реалізована на мікропроцесорних засобах. Її експлуатація на лабораторному випробувальному стенді, виконаному на мікроконтролері, показала високу точність стабілізації технологічного параметра, надійність в різних умовах зміни характеристик вхідних сигналів.

Список літератури

1. Гончаров Ю.Г., Давидкович А.С., Гейзенблазен Б.Е., Гуленко Г.В. Автоматический контроль и регулирование технологических процессов на железорудных обогатительных фабриках. М.: Недра, 1968. 227 с.
2. Авторское свидетельство СССР № 388790, кл. В 03 В 11/00. Устройство для автоматического контроля загрузки и стабилизации разжижения пульпы в мельнице /Дегтярёв Ф.Н., Мерзляков А.А., Кондратец В.А., Новохатько В.И., Кучма Н.И., Гуленко Т.И. - № 1420849/29-33; заяв. 30.03.1970; опубл. 5.07.1973, Бюл. № 29.
3. Патент України № 62627, G 05 D 7/01, В 03 В 11/00. Спосіб автоматичної стабілізації витрат рідини /Кондратець В.О., Сербул О.М. - № 2003043482; заяв. 17.04.2003; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.
4. Патент України № 74393, G 05 D 9/02, G 05 D 7/01. Пристрій автоматичної стабілізації витрат рідини /Кондратець В.О., Сербул О.М. - № 2003043879; заяв. 25.04.2003; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.
5. Патент України № 59644, В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням /Кондратець В.О., Сербул О.М. - № 2002118758; заяв. 5.11.2002; опубл. 15.04.2005, Бюл. № 4.

References

1. Goncharov, Ju.G., Davidkovich, A.S., Gejzenblazen, B.E. & Gulenko, G.V. (1968). *Avtomaticheskij kontrol' i regulirovanie tehnologicheskikh processov na zhelezorudnyh obogatitel'nyh fabrikah* [Automatic control and regulation of technological processes at iron ore processing plants]. Moscow: Nedra [in Russian].
2. Author's certificate. 388790 USSR, MPK V03V 11/00. *Ustrojstvo dlja avtomaticheskogo kontrolja zagruzki i stabilizacii razzhizhenija pul'py v mel'nice* [The device for automatic control of loading and stabilization of pulp liquefaction in the mill]. No. 1420849/29-33; stated. March 30, 1970; has been published July 5, 1973, Bul. No. 29. [in Russian].
3. Pat. 62627, Ukraine, MPK G05D7/01, V03V11/00. *Sposib avtomatichnoi stabilizatsii vytrat ridyny* [The method of automatic stabilization of fluid flow]. No. 2003043482; stated. April 17, 2003; has been published July 15, 2005, Bul. No. 7. [in Ukrainian].
4. Pat. 74393, Ukraine, MPK G05D9/02, G05D7/01. *Prystrij avtomatichnoi stabilizatsii vytrat ridyny* [The device for automatic stabilization of fluid flow]. No. 2003043879; stated. April 25, 2003; has been published December 15, 2005, Bul. No. 12. [in Ukrainian].
5. Pat. 59644, Ukraine, MPK V03V11/00, V02S25/00. *Sposib avtomatichnoi stabilizatsii rozridzhennia pul'py v mlynakh z tsyrkuliuiuchym navantazhenniam* [Method of automatic stabilization of pulp rarefaction in mills with circulating load]. No. 2002118758; stated. November 5, 2002; has been published April 15, 2005, Bul. No. 4. [in Ukrainian].

Vasily Kondratets, Prof., DSc., **Oleksandr Serbul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Didyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anatolii Matsui**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

System of Automatic Control for Solid/liquid Ratio in Mills with Circulating Load

The operation of a ball mill operating in a closed loop with a spiral classifier depends on the vacuum of the pulp in it, which is characterized by a solid / liquid ratio. Supply to the entrance of the ball mill at the same time ore and sand classifier, as well as changes in the circulating load in a wide range greatly complicate the definition of this technological parameter. This situation has led to the fact that the solid / liquid ratio in mills operating in such conditions can not be automatically adjusted, in turn, the deviation of the pulp vacuum from the required value leads to significant losses.

The study of the ball mill as a controlled object on the pulp vacuum channel made it possible to describe it using the mathematical expression given in the article. The solution of this expression makes it possible to characterize the change in the mass of the material in the mill over time, provided that a stepwise action is introduced at the entrance - the volume flow of water or ore. A constant value of the mass of material in the mill will clearly characterize the corresponding solid/liquid ratio. It has been found that it is important to study the filtering capabilities of the control object, as control actions on water and disturbing actions on ore can significantly change the vacuum of the pulp in some areas of the mill. The filtering capabilities of the mill can be investigated by its amplitude frequency characteristics, which showed that at low circular frequencies the amplitude frequency characteristics depend on the mode of operation of the mill - the magnitude of the circulating load and the cost of the source ore. Using computer technology, spatial diagrams of the relative oscillations of the mass of material in the mill from the amplitude and frequency of influences at its entrance through the ore and water.

In the course of theoretical research it was determined that the only approach to ensure the required accuracy of determining the solid / liquid ratio in these conditions is to filter the signals before applying to the input of the identification unit of the ratio. Thus, the system of automatic control of the solid/liquid ratio at the entrance to the mill is implemented on microprocessor means. Its operation on the laboratory test bench made on the microcontroller showed high accuracy of stabilization of technological parameter, reliability in various conditions of change of characteristics of input signals.

measurement of the solid/liquid ratio, optimization of the choice of measuring instruments

Одержано (Received) 25.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 03.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 62.505

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.210-215>

С.І. Осадчий, проф., д-р техн. наук, **О.К. Дідик**, доц., канд. техн. наук, **О.М. Сербул**, доц., канд. техн. наук, **В.М. Каліч**, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: didyk_s79@ukr.net

Метод синтезу оптимального багатовимірного фільтру для виділення регулярного сигналу на фоні випадкових перешкод

В даній статті приводиться дослідження можливості застосування комплексування вимірювальної інформації в умовах, коли корисна інформація являє собою вектор регулярних сигналів, а завади вимірювання – багатовимірний стаціонарний випадковий процес.

вимірювання, фільтрація, сигнал, перешкоди, випадковий процес, метод синтезу

Постановка проблеми. Створення сучасних інтелектуальних систем прийняття рішень, систем автоматичного управління рухомими об'єктами потребують високоточної вимірювальної інформації. Джерелом такої інформації є інформаційно-вимірювальні комплекси, якість роботи яких визначається точністю одержання оцінок параметрів, що вимірюються. В свою чергу точність оцінки залежить від рівня виробництва систем даного класу та алгоритмів обробки результатів вимірювання. Причому, значного виграшу можливо досягти при застосуванні нових оптимальних алгоритмів обробки результатів вимірювання [1, 2].

Аналіз основних досліджень і публікацій. Одним з методів підвищення точності оцінки параметрів вимірювання є багатоканальне вимірювання фізичної величини з подальшою оптимальною фільтрацією. Задача визначення структури та параметрів оптимального багатовимірної, багатоканального фільтра отримала назву задачі комплексуювання [1, 3]. В роботі [1] наведений алгоритм рішення цієї задачі при умові, що і корисний сигнал і перешкода є багатовимірний стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним сподіванням. При цьому доведена висока ефективність запропонованого оптимального фільтра. В даній статті пропонується дослідити можливість застосування комплексуювання в умовах, коли корисна інформація є вектор регулярних сигналів, а перешкода вимірювання – багатовимірний центрований стаціонарний випадковий процес.

Постановка завдання. В термінах роботи [1] сформулюємо задачу синтезу комплексованої системи виділення корисного регулярного сигналу.

Нехай необхідно багатовимірним стаціонарним фільтром найкраще обробити вхідну інформацію про один і той же регулярний сигнал $r(t)$, яку отримують кількома “неідеальними” вимірювачами, а результат передати на систему оцінювання.

Виклад основного матеріалу. Будемо вважати заданою багатоканальну систему вимірювання (рис. 1), яка підключена на вхід багатовимірної системи передачі даних, динаміка якої описується системою лінійних диференціальних рівнянь вигляду:

$$Px = Mu + \psi, \quad (1)$$

де x – n -вимірний вектор вихідних координат;

u – m -вимірний вектор управляючих координат;

ψ – n -вимірний вектор збурень з нульовими математичними сподіваннями і відомою дробово-раціональною матрицею спектральних щільностей $S_{\psi\psi}$;

P та M – поліноміальні матриці відповідної розмірності ($\det(P)$ – стійкий).

На вхід вимірювальної системи надходить n -вимірний вектор вимірюваних сигналів $r(t)$, компонентами якого є детерміновані функції. Вектор $r(t)$ надходить до основної групи „неідеальних” вимірювачів (основний канал вимірювання має матрицю передаточних функцій K розмірності $n \times n$). Вектор $\varphi(t)$ – n -вимірний вектор перешкод, які супроводжують вимірювання, що являє собою випадковий стаціонарний процес із нульовим математичним сподіванням і відомою дробово-раціональною матрицею спектральних щільностей $S_{\varphi\varphi}$. Паралельно вектор $r(t)$ вимірюється q додатковими каналами, кожний з яких має відому матрицю передаточних функцій K_i розмірності $\nu_i \times n$ і ν_i -вимірний вектор перешкод вимірювань $\varphi_i(t)$, який являє собою векторний стаціонарний випадковий процес із нульовим математичним сподіванням і відомою дробово-раціональною матрицею спектральних щільностей $S_{\varphi_i\varphi_i}$. Нехай нумерація каналів упорядкована і дотримується умови

$$n \geq \nu_1 \geq \nu_2 \geq \dots \geq \nu_i \geq \nu_q \geq 1, \quad \nu = \sum_{i=1}^q \nu_i. \quad (2)$$

За аналогією з [1], були введені позначення: сигнали на вході i -го вимірювального каналу

$$\nu_i = L_i r + \varphi_i, \quad (3)$$

де $L_i = [K_i, O_{\nu_i \times (n-\nu_i)}]$,

$O_{n \times m}$ – нульова матриця розмірності $n \times m$;
матриця передаточних функцій вимірювачів

$$K_O = [K', L']', \quad L = [L_1', L_2', \dots, L_q']'; \quad (4)$$

вектор шумів вимірювачів

$$\varphi_O = [\varphi', \varphi_1', \dots, \varphi_q']'; \quad (5)$$

матриця передаточних функцій каналів фільтра

$$G_O = [G, G_1, \dots, G_q]_{m \times (n+v)}; \quad (6)$$

матриця бажаних перетворень сигналу $r(t)$

$$\Phi_O = [\Phi K^{-1}, O_{n \times v_1}, \dots, O_{n \times v_q}], \quad (7)$$

в якій матрична передаточна функція Φ визначає зв'язок між вектором на вході основного вимірювача і сигналом на виході ідеальної системи.

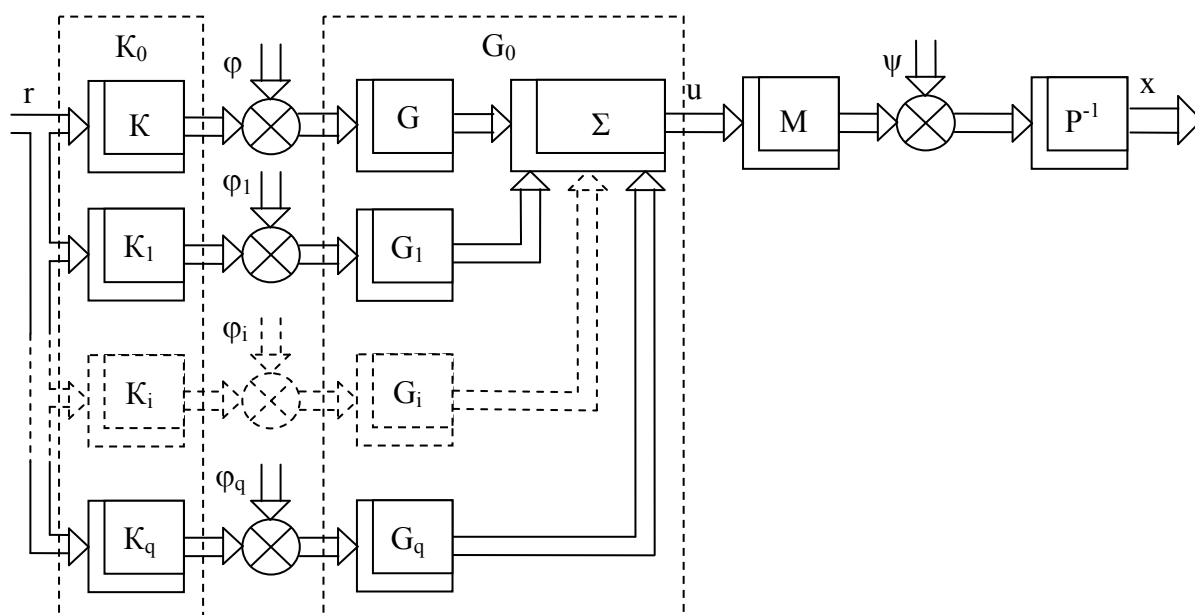


Рисунок 1 – Структурна схема системи вимірювань

Джерело: розроблено авторами

Виходячи з цього, управляючий $u(t)$, вихідний $x(t)$ та бажаний $i(t)$ сигнали системи визначаються рівняннями

$$u = G_O(\rho_O + \varphi_O), \quad (8)$$

$$x = P^{-1}MG_O(\rho_O + \varphi_O) + P^{-1}\psi, \quad (9)$$

$$i = \Phi_O\rho_O, \quad (10)$$

в яких $\rho_O = K_O r$, а помилка в системі, яка являє собою відхилення реального сигналу $x(t)$ від бажаного, має дві складові – регулярну ε та випадкову ζ а саме такі, що

$$\varepsilon = (-\Phi_O + P^{-1}MG_O)\rho_O, \quad (11)$$

$$\zeta = P^{-1}MG_O\varphi_O + P^{-1}\psi. \quad (12)$$

Тоді, інтегральним показником якості роботи системи є сума певним чином зважених інтегральної квадратичної помилки оцінювання регулярного сигналу (11) та дисперсії випадкової складової помилки (12)

$$I_o = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left\{ A \varepsilon \varepsilon_* + 2\pi\lambda^2 A S_{\zeta\zeta}' \right\} ds, \quad (13)$$

де $\text{tr} \{ \}$ - знак знаходження сліду матриці;

"*" - знак Ермітового спряження;

A - вагова матриця, елементи якої узгоджують вагу окремих координат в загальному критерії якості;

λ - коефіцієнт, який визначає обмеження на дисперсію випадкової складової помилки;

$S_{\zeta\zeta}$ - матриця спектральних щільностей вектора ζ ;

"'" - знак транспонування.

Враховуючи прийняті припущення, задача синтезу оптимальної багатовимірної, багатоканальної системи комплексованого оцінювання регулярних сигналів на фоні багатовимірних стаціонарних перешкод полягає в тому, щоб за відомими матрицями M , P , K_o та Φ_o , які характеризують динаміку заданої частини системи, спектром потужності регулярного сигналу $\rho_o \rho_o^*$ і матрицями спектральних щільностей збурень $S_{\psi\psi}'$ та шумів вимірювачів $S_{\varphi\varphi}'$, знайти таку стійку та фізично реалізуєму матрицю передаточних функцій оптимального фільтра G_o , щоб функціонал якості (13) досягав мінімуму.

Припустимо, що сигнали φ_o та ψ некорельовані, в такому разі для розв'язання поставленої задачі розглянемо окремо доданки підінтегрального виразу функціоналу (13)

$$A \varepsilon \varepsilon_* = A \left[(-\Phi_o + P^{-1} M G_o) \rho_o \rho_o^* (-\Phi_o^* + G_o^* M_* P_*^{-1}) \right] = A \Phi_o \rho_o \rho_o^* \Phi_o^* - \\ - A \Phi_o \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1} - A P^{-1} M G_o \rho_o \rho_o^* \Phi_o^* + A P^{-1} M G_o \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1}; \quad (14)$$

$$2\pi\lambda^2 A S_{\zeta\zeta}' = 2\pi\lambda^2 A P^{-1} M G_o S_{\varphi_o \varphi_o}' G_o^* M_* P_*^{-1} + 2\pi\lambda^2 A P^{-1} S_{\psi\psi}' P_*^{-1}. \quad (15)$$

В результаті підстановки виразів (14), (15) у функціонал якості (13) маємо

$$I_o = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left\{ A \Phi_o \rho_o \rho_o^* \Phi_o^* - A \Phi_o \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1} - \right. \\ \left. - A P^{-1} M G_o \rho_o \rho_o^* \Phi_o^* + A P^{-1} M G_o \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1} + \right. \\ \left. + 2\pi\lambda^2 A P^{-1} M G_o S_{\varphi_o \varphi_o}' G_o^* M_* P_*^{-1} + 2\pi\lambda^2 A P^{-1} S_{\psi\psi}' P_*^{-1} \right\} ds. \quad (16)$$

Мінімізація функціоналу (16) виконувалась методом Вінера-Колмогорова. Згідно з процедурою методу знайдена перша варіація функціоналу (16)

$$\delta I_o = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left\{ \delta G_o \left[-M_* P_*^{-1} A \Phi_o \rho_o \rho_o^* + M_* P_*^{-1} A P^{-1} M G_o \rho_o \rho_o^* + \right. \right. \\ \left. \left. + 2\pi\lambda^2 M_* P_*^{-1} A P^{-1} M G_o S_{\varphi_o \varphi_o}' \right] + \left[-\rho_o \rho_o^* \Phi_o^* A P^{-1} M + \right. \right. \\ \left. \left. + \rho_o \rho_o^* G_o^* M_* P_*^{-1} A P^{-1} M + 2\pi\lambda^2 S_{\varphi_o \varphi_o}' G_o^* M_* P_*^{-1} A P^{-1} M \right] \delta G_o \right\} ds, \quad (17)$$

де δG_0 – аналітична лише в правій півплощині комплексної змінної s варіація функції G_0 .

Введемо позначення:

$$\Gamma_* \Gamma = M_* P_*^{-1} A P^{-1} M; \quad (18)$$

$$D D_* = \rho_0 \rho_{0*} + 2\pi \lambda^2 S'_{\varphi_0 \varphi_0}, \quad (19)$$

$$N = N_0 + N_+ + N_- = \Gamma_*^{-1} M_* P_*^{-1} A \Phi_0 \rho_0 \rho_{0*} D_*^{-1}, \quad (20)$$

де Γ і D – матриці, одержані в результаті факторизації відповідних виразів, аналітичні лише в правій півплощині (ППП) комплексної змінної s ;

Γ_* і D_* – матриці, аналітичні лише в лівій півплощині (ЛПП);

N_0 – матриця, одержана в результаті сепарації [4] виразу (20), всі елементи якої – поліноми аргументу s ;

N_+ – матриця, всі елементи якої – правильні дроби аргументу s , що мають полюса тільки в ЛПП;

N_- – матриця, всі елементи якої – правильні дроби аргументу s , що мають полюси тільки в ППП.

З урахуванням виразів (18-20) варіація (17) набула вигляду:

$$\begin{aligned} \delta I_0 = & \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \{ \delta G_0 \Gamma_* [\Gamma G_0 D - (N_0 + N_+ + N_-)] D_* + \\ & + D [D_* G_0 \Gamma_* - (N_0 + N_+ + N_-)_*] \Gamma \delta G_0 \} ds. \end{aligned} \quad (21)$$

В результаті умова, при якій варіація (21) тотожно рівна нулю, визначається наступним чином:

$$G_0 = \Gamma^{-1} (N_0 + N_+) D^{-1}. \quad (22)$$

Висновки. Таким чином, одержано новий алгоритм синтезу комплектованої оптимальної системи виділення регулярного сигналу на фоні багатовимірної стаціонарної випадкової перешкоди, який дозволяє знайти структуру і параметри багатовимірного оптимального фільтра з урахуванням динаміки системи передачі інформації.

Список літератури

1. Блохин Л.Н. Оптимальные системы стабилизации. К.: Техника, 1982. 144 с.
2. Азарсков В.Н., Блохин Л.Н. и др. Робастные методы оценивания идентификации и адаптивного управления. К.: НАУ, 2004. 500 с.
3. Технологии конструирования современных конкурентоспособных комплексов управления стохастическим движением объектов: монография / Л.Н. Блохин, С.И. Осадчий, А.К. Дидык, Г.И. Рудюк. Кировоград: Лисенко В.Ф., 2015. 284 с.
4. Блохин Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: підручник. К.: НАУ, 2003. 208 с.

References

1. Blohin, L.N. (1982). *Optimalnye sistemy stabilizatsii [Optimal stabilization systems]*. Kyiv: Tehnika [in Russian].
2. Azarskov, V.N., Blohin L.N. et al (2004). *Robastnye metody otsenivaniia identifikatsii i adaptivnogo upravleniia [Robust estimation methods for identification and adaptive control]*. Kyiv: NAU [in Russian].

3. Blohin, L.N., Osadchiy, S.I., Didyk, A.K. & Rudiuk, G.I. (2015). *Tehnologii konstuirovaniia sovremennykh konkurentnosposobnykh kompleksov upravleniia stohasticheskim dvizheniem obektiv* [Technologies for designing modern competitive control systems for stochastic movement of objects]. Kirovograd: Lysenko V.F. [in Russian].
4. Blohin, L.N. & Burychenko, M.U. (2003). *Statystychna dynamika system ypravlinnia* [Statistical dynamics of control systems]. Kyiv: NAU [in Ukrainian].

Serhii Osadchiy, Prof., DSc., **Oleksandr Didyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Serbul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Kalich**, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Method of Synthesis of an Optimal Multidimensional Filter for Extracting a Regular Signal Against a Background of Random Noise

In terms of [1] we formulate the problem of synthesis of a complex system of allocation of a useful regular signal. Suppose that a multidimensional stationary filter best processes the input information about the same regular signal $r(t)$, which is obtained by several "non-ideal" meters, and the result is transmitted to the evaluation system.

In this article, a multi-channel measurement system, which is connected to the input of a multidimensional data transmission system, the dynamics of which is described by a system of linear differential equations. The input of the measuring system receives an n -dimensional vector of measured signals $r(t)$, the components of which are deterministic functions. The vector $r(t)$ belongs to the main group of "non-ideal" meters. Measurements are accompanied by interference, which is a random stationary process with zero mathematical expectation and a known fractional-rational matrix of spectral densities. An integral indicator of the quality of the system is the sum of the weighted integral quadratic error of the regular signal estimation and the variance of the random component of the error.

Thus, a new algorithm for the synthesis of a complete optimal regular signal extraction system against the background of a multidimensional stationary random interference is obtained, which allows to find the structure and parameters of a multidimensional optimal filter taking into account the dynamics of the information transmission system.

measurement, filtering, signal, noise, random process, synthesis method

Одержано (Received) 25.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 03.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

УДК 629.7.02+004.056.5

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.216-226>

Є.В. Мелешко, проф., д-р техн. наук, **О.О. Майданик**, магістрант, **О.Г. Собінов**, викл.,
Р.М. Минайленко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: elismeleshko@gmail.com, maidanyksmail@gmail.com, sagcob14@gmail.com,
aron70@ukr.net

Метод шифрування трафіку квадрокоптерів через аналоговий тракт впродовж моніторингу сільськогосподарських наземних об'єктів

Метою даної роботи є розробка методу шифрування трафіку квадрокоптерів через аналоговий тракт під час моніторингу стану сільськогосподарських наземних об'єктів. Використання безпілотних літальних пристроїв квадрокоптерного типу для моніторингу наземних об'єктів у сільському господарстві стає все більш поширеною практикою та дозволяє ефективно вирішувати велике коло задач, зокрема, використовуючи аерофотозйомку відеозйомку, тепловізійну зйомку, лазерне сканування тощо. В той же час квадрокоптери дуже вразливі до різних кібератак, що зумовлює необхідність розробки дієвих методів їх інформаційного захисту. У цій роботі для захисту даних, якими дрон обмінюється з іншими пристроями, запропоновано використовувати шифр Вернама та генерацію ключів шифрування на основі математичного більярду Сіная. Було розроблено відповідні алгоритми та програмне забезпечення для шифрування даних, а також створені робочі макети пристроїв для проведення експериментів. Для створення макету обрано модуль на основі мікроконтролера STM32F103C8T6, дані між пристроями передавалися через радіомодуль.

шифрування, генерація ключів, трафік, квадрокоптер, аналоговий тракт, моніторинг, сільськогосподарські наземні об'єкти

Постановка проблеми. Використання безпілотних літальних пристроїв квадрокоптерного типу для моніторингу наземних об'єктів у сільському господарстві стає все більш поширеною практикою та дозволяє ефективно вирішувати велике коло задач. В той же час квадрокоптери вразливі до інформаційних атак, що можуть здійснюватися з різними цілями, зокрема, для крадіжки дрону, використання його у мережі ботів для атак на інші пристрої, або для перехвату інформації, яку він збирає для оператора пристрою. Це все зумовлює необхідність розробки дієвих методів інформаційного захисту дронів від кібератак.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання дронів у сільському господарстві для вирішення задач моніторингу наземних об'єктів – один із найперспективніших напрямів, на який активно зростає попит. Технологічно оснащені безпілотники у сільському господарстві здатні виконувати різноманітні операції моніторингу [1-4], зокрема: аерофотозйомку відеозйомку, тепловізійну зйомку, лазерне сканування тощо. Такий моніторинг дозволяє здійснювати оцінку якості посівів та виявляти факти пошкоджень чи загибелі культур, виявляти дефекти посіву та проблемні зони, аналізувати ефективність заходів для на захисту рослин, перевіряти відповідності планам сівозміни, виявляти відхилення та порушення у процесі агротехнічних робіт, аналізувати рельєф та створювати карти, проводити аудит та інвентаризацію земель, здійснювати охоронні заходи та збирати інформацію для служби безпеки тощо.

Кіберзлочинці часто зламують дрони та використовують їх у своїх цілях, у тому числі для злому інших пристроїв [5]. Безпілотники сповнені вразливостей, які використовують зловмисники. Захоплення одного безпілотника за допомогою іншого значно розширює потенціал загрози. Ботнети з приватних пристроїв, захоплених зловмисниками, можуть здійснювати різні атаки, наприклад, інформаційні атаки DDOS. Чим більше незахищених дронів у небі – тим більшу небезпеку вони становлять. Також зловмисники можуть перехоплювати дані, які дрон передає на базову станцію, наприклад, відеозапис, що транслюється на контролер системою First Person View (FPV). Часто виробники звичайних дронів, які продаються в магазинах, не захищають їх шифруванням, а незашифровані дані – легкий здобуток для зловмисників [5]. Тому інформацію, якою обмінюється дрон з іншими пристроями треба обов'язково захищати шифруванням.

У даній роботі пропонується метод шифрування трафіку квадрокоптерів через аналоговий тракт для захисту даних, якими він обмінюється з іншими пристроями, а також передає оператору. Особливу увагу при розробці методу шифрування було приділено методу генерації ключів шифрування, адже саме на них базується стійкість будь-якого алгоритму шифрування. Найчастіше при генерації ключів шифрування використовують генератори псевдовипадкових чисел (ГПВЧ). Дуже часто ГПВЧ є найбільш слабким місцем у системах шифрування. Послідовності, отримані в результаті роботи ГПВЧ повинні бути непередбачуваними та мати довгий період, щоб їх можна було використовувати в криптографічних системах захисту інформації [6-7].

У 1976 році відомий математик Сінай Ю.Г. довів, що поведінка більярдної кулі у динамічному більярді, яка визначається детермінованим рівнянням, та поведінка більярдної кулі, яка керується процесом Маркова першого порядку, нерозрізнимі [8]. Оскільки марковський процес першого порядку є ймовірнісним процесом, який залежить тільки від попереднього зіткнення з перпоною, то він є як недетермінованим, так і непередбачуваним. Системи динамічного більярду виявили добре розвинену хаотичну поведінку [9]. Незважаючи на хороші характеристики, ці системи ще не застосовуються у криптографії. Головною причиною є складність вираження рівняння руху частинок в явній формі, але тим не менш таке використання є можливим [10].

Постановка завдання. Таким чином, метою даної роботи є створення методу шифрування трафіку квадрокоптерів через аналоговий тракт з використанням генератора випадкових чисел на основі математичного більярду Сіная для захисту даних під час здійснення моніторингу сільськогосподарських наземних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. В даній роботі було створено апаратні пристрої з безпроводним каналом зв'язку та програмне забезпечення для шифрування даних на мікроконтролерах (МК).

Для реалізації програмного забезпечення, яке повинне виконуватися на мікроконтролері було обрано середовище розробки STM32CubeIDE від компанії STMicroelectronics – вдосконалену платформу розробки C/C++ [11] з периферійною конфігурацією, генерацією коду, складанням коду та налагодженням для мікроконтролерів та мікропроцесорів STM32.

Для побудови розроблюваної системи створено робочі макети пристроїв. Для створення макету обрано модуль на основі мікроконтролера STM32F103C8T6 [12]. Модуль має:

- Виводи портів A0-A12, B0-B1, B3-B15, C13-C15.
- Micro-USB через який можна живити плату. На платі присутній стабілізатор напруги на 3.3В. Живлення 3.3В або 5В можна подавати на відповідні виводи на платі.

- Кнопку RESET.
- Два перемички BOOT0 і BOOT1. Використовувати під час прошивки через UART.
- Два кварци 8МГц і 32768Гц. У мікроконтролера є множник частоти, тому на кварці 8 МГц можливо досягти максимальної частоти контролера 72МГц.
- Два світлодіоди. PWR - сигналізує про подачу живлення. PC13 - підключений до виходу C13.

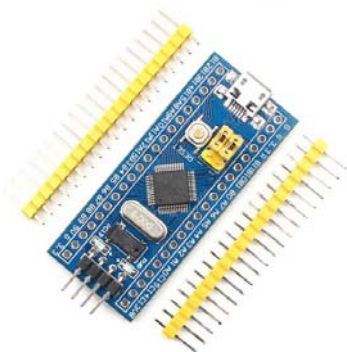


Рисунок 1 – Модуль на основі мікроконтролера STM32F103C8T6

Джерело: розроблено автором

Важливою частиною пристрою є радіомодуль. Вирішено використовувати радіомодуль JDY-40. Так як цей модуль має низьку ціну та відносно просте керування.

Модуль JDY-40 [13] дуже компактний і можна його живити від будь-якого літій-іонного акумулятора на 3,7 В, що дозволяє вбудувати його в будь-які моделі. Радіус дії радіомодуля до 120 метрів в прямій видимості, що для більшості пристроїв цілком достатньо, якщо потрібна велика дальність то можна застосувати зовнішню антену.

Для обміну даними з мікроконтролером модуля JDY-40 здійснюється по UART інтерфейсу з максимальною швидкістю 19200 біт. Для підключення периферії до модулю є 8 портів введення-виведення. На рис. 2 зображено модуль зв'язку JDY-40.

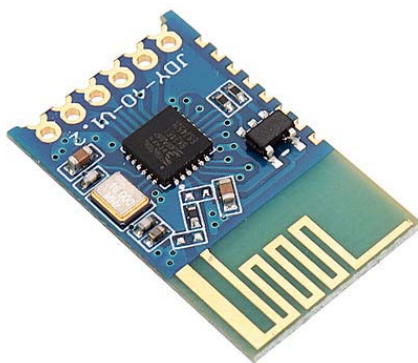


Рисунок 2 – Радіомодуль JDY-40

Джерело: розроблено автором

На основі модулів JDY-40 та макетної плати розроблено робочі макети пристроїв. На рис. 3 зображено макети пристроїв для передачі даних по радіоканалу.

На рис. 3 присутні програматори та логічний аналізатор, за допомогою яких здійснювалася наладка схеми. Обидва пристрої підключені до ПК, на якому відкрито два термінали. В кожному із терміналів необхідно обрати відповідний номер COM порту та відкрити його. Після відкриття COM порту можна передавати данні від ПК до мікроконтролера, який в свою чергу передасть їх на радіомодуль.

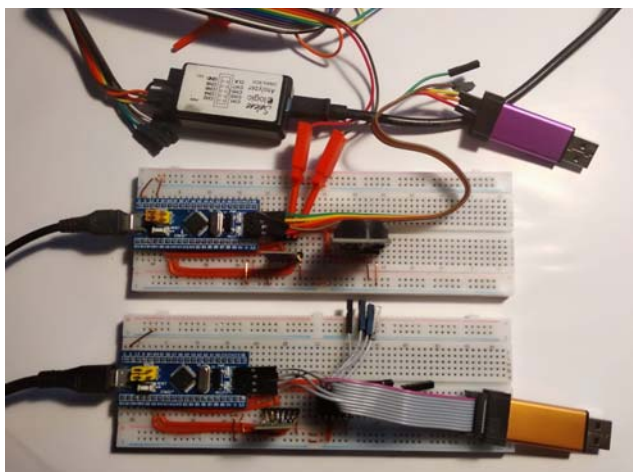


Рисунок 3 – Робочі макети пристроїв для передачі даних по радіоканалу

Джерело: розроблено автором

Для шифрування даних було використано шифр Вернама. А у якості ключа шифрування псевдовипадкову послідовність, що генерувалася за допомогою математичного більярду Сіная.

Розглянемо використану математичну модель генератора псевдовипадкових чисел на основі більярду Сіная.

Програма моделювання руху кулі у більярді Сіная базується на твердженнях, що рух кулі здійснюється без втрати швидкості (тертя відсутнє) та кут падіння дорівнює куту відбиття. Таким чином приймаємо, що рух кулі має швидкості по координатах $V_x = \cos(\alpha)$; $V_y = \sin(\alpha)$. Звідси $V_{x2} + V_{y2} = 1$. Приймаємо для побудови алгоритму руху кулі наступні вхідні параметри:

- напрямок руху кулі $-V = \{V_x, V_y\}$,
- початкове положення кулі у більярді $-P = \{P_x, P_y\}$.

Для розробки алгоритму побудуємо математичну модель руху математичної точки в полі опуклого більярду Сіная.

Точка частинки рухається по більярду з постійною швидкістю v . Коли вона досягає кордону поля більярда, зазнає пружного зіткнення з дзеркальним відображенням відповідно до закону відбиття, кут падіння дорівнює куту відбиття. Між двома зіткненнями точка рухається прямим шляхом. Спочатку точка орієнтована під кутом $\theta_0 = (\vec{i}, \vec{v}_0)$, де $\vec{i}$ одиничний вектор осі x .

З цього маємо: $\vec{v}_0 = \cos(\theta_0)\vec{i} + \sin(\theta_0)\vec{j}$

Після зіткнення маємо рівняння (1):

$$(\vec{i}, \vec{v}_{new}) = (\vec{i}, \vec{v}_{old}) + (\vec{v}_{old}, \vec{N}) + (\vec{N}, \vec{v}_{old}) \bmod 2\pi. \quad (1)$$

Після правила зіткнення маємо: $(\vec{N}, \vec{v}_{new}) = (-\vec{v}_{old}, \vec{N})$.

Також є:

$$(-\vec{v}_{old}, \vec{N}) = (-\vec{v}_{old}, \vec{v}_{old}) + (\vec{v}_{old}, \vec{N}) \bmod 2\pi = \pi + (\vec{v}_{old}, \vec{N}) \bmod 2\pi.$$

Тому рівняння (1) стає:

$$(\vec{i}, \vec{v}_{new}) = (\vec{i}, \vec{v}_{old}) + 2(\vec{v}_{old}, \vec{N}) + \pi \bmod 2\pi. \quad (2)$$

При $(n + 1)$ зіткненні, де $n \geq 0$, приймаємо $\theta_0 = (\vec{i}, \overrightarrow{v_{new}})$ і отримуємо:

$\theta_{n+1} = (\vec{i}, \overrightarrow{v_{new}})$ і тому рівняння (2) стає:

$$\begin{aligned}\theta_{n+1} &= \theta_n + 2(\overrightarrow{v_n}, \overrightarrow{N_{n+1}}) + \pi \bmod 2\pi, \\ \overrightarrow{v_n} &= \cos(\theta_0)\vec{i} + \sin(\theta_0)\vec{j},\end{aligned}\quad (3)$$

де $\overrightarrow{N_{n+1}}$ одиничний нормальний вектор на кордоні до $(n + 1)$ зіткнення. Після геометричної форми маємо більярд:

$$\overrightarrow{N_{n+1}} = \begin{cases} -\frac{x_{n+1}}{|x_{n+1}|}, & \text{якщо } |x_{n+1}| = a \\ -\frac{y_{n+1}}{|y_{n+1}|}, & \text{якщо } |y_{n+1}| = a \\ -\frac{x_{n+1}\vec{i} + y_{n+1}\vec{j}}{\sqrt{x_{n+1}^2 + y_{n+1}^2}}, & \text{інакше} \end{cases} \quad (4)$$

Вважаємо $A_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ точкою $(n + 1)$ зіткнення, тому A_{n+1} належить до перетину траєкторій точок з більярдною межею Γ . Визначимо f , функцію переходу від (A_n, θ_n) до (A_{n+1}, θ_{n+1}) , таких як:

$$(x_{n+1}, y_{n+1}, \theta_{n+1}) = f(x_n, y_n, \theta_n).$$

Генератор заснований на системі хаотичного більярду, тому створюються послідовності, які усядковують хаос і непередбачуваність більярду.

Чутливість до невеликої зміни початкових параметрів є однією з основних властивостей даного генератора псевдовипадкових чисел. Ця властивість робить генератор високо захищеним від статистичних та диференціальних атак.

За математичною моделлю генерації ключів шифрування на основі більярду Сіная розроблено алгоритм. Реалізація математичної моделі виконана мовою Python в середовищі Visual Studio Community з математичною бібліотекою Matplotlib. На рис. 4 зображено візуалізацію руху математичної точки в більярді Сіная при двох ітераціях.

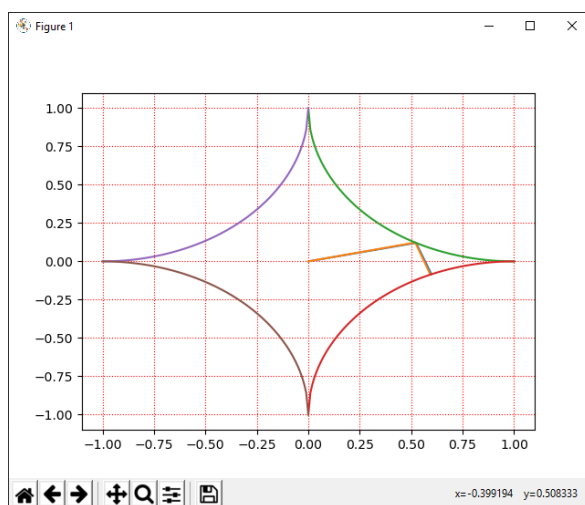


Рисунок 4 – Візуалізація руху математичної точки в більярді Сіная при 2-х ітераціях під час генерації ключа шифрування

Джерело: розроблено автором

З рис. 4 видно, що математичні частинки починають свій рух від центру поля в бік початкового кута, який задається на початку розрахунків. Далі частинка в точці перетину відбивається по закону кутів та рухається до іншої точки перетину. Саме в цих точках перетину ї є число, яке генерується як випадкове. Для кращого розуміння розглянемо рис. 5, зображено візуалізацію руху математичної точки в більярді Сіная при 12-ти ітераціях.

На рис. 5 видно, що на полі рухаються дві математичні частинки. Це зроблено для порівняння розбіжності їх траєкторій при невеликій різниці початкового кута. Початковий кут частинок відрізняється всього лише на 0,3 градуси. При цьому видно, що така незначна різниця дає дуже велику розбіжність. Це пояснюється високою хаотичністю даного математичного більярду. Тому генератор ключів шифрування на основі такого математичного більярду буде мати високу надійність.

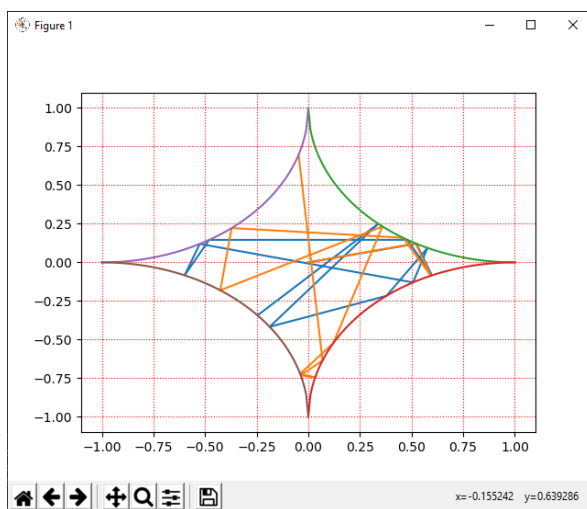


Рисунок 5 – Візуалізація руху математичної точки в більярді Сіная при 12-х ітераціях під час генерації ключа шифрування

Джерело: розроблено автором

На рис. 6 зображено візуалізацію руху математичної точки в більярді Сіная при 200-та ітераціях.

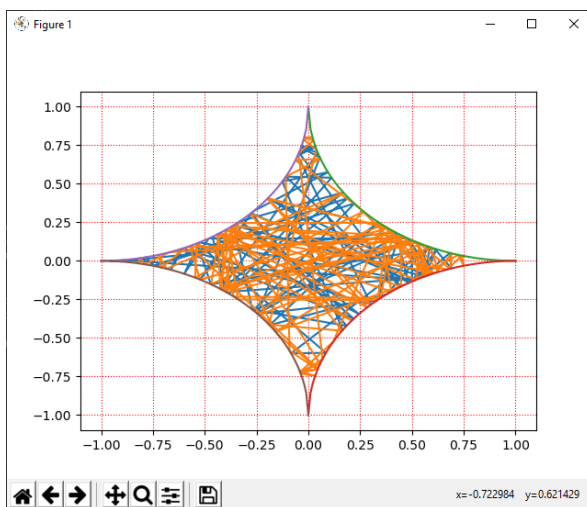


Рисунок 6 – Візуалізація руху математичної точки в більярді Сіная при 200-х ітераціях під час генерації ключа шифрування

Джерело: розроблено автором

При використанні запропонованого методу шифрування через канал зв'язку не передається ніякої інформації про ключі. Початкові параметри ключа записуються на квадрокоптер перед стартом, а ключі генеруються на кожному із пристроїв самостійно на основі початкових параметрів.

Всі програми для мікроконтролерів починаються з ініціалізації. Спочатку треба ініціалізувати тактовий генератор мікроконтролера з вказаними джерелами тактового сигналу, множенням тактового сигналу для ядра та діленням для периферії та системних шин. Після цього ініціалізується потрібна для роботи периферія мікроконтролера. А саме: GPIO – порти вводу виводу, UART – послідовний асинхронний порт та USB – універсальна системна шина.

Зазвичай першими ініціалізують порти вводу виводу (GPIO) [14]. GPIO - general-purpose input output pin або ж порт вводу виводу. Порт вводу виводу – це контакт загального призначення. Може працювати як на вхід так і на вихід. Тобто має можливість або читати логічний стан контакта або навпаки задавати логічний рівень (рівень напруги). Також деякі групи контактів мають можливість працювати в аналоговому режимі при вимірах аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Потім треба послідовну шину UART.

UART – це універсальна асинхронна послідовна шина [15]. Шина UART дуже гнучка та дозволяє підключати багато різних пристроїв (мікросхем модулів). Сама шина є повністю дуплексною. Тобто дозволяє передавати данні в обидві сторони як від ведучого пристрою так і від веденого пристрою.

Ініціалізація UART починається з тактування. Після ініціалізації тактування UART необхідно налаштувати контролер NVIC який відповідає за події та вектори переривання.

NVIC (Nested vectored interrupt controller) – модуль контролю переривань [16]. Він виконує наступні функції:

- Дозволяє або забороняє переривання.
- Назначає пріоритет переривань (від 0 до 15. 0 - максимальний пріоритет, 15 - мінімальний пріоритет).
- Автоматично зберігає дані при виконанні одиноких чи вкладених переривань.

При використанні промислового зразка розробленої системи потрібно мати комп'ютерний пристрій, який може передавати цифровий сигнал.

Пристрій повинен бути оснащений засобами Bluetooth, Wi-Fi або радіомодулем. Апаратно програмний модуль як група, що складається з двох об'єктів які пов'язаних між собою або загальним пін кодом або вписаними у програмний код однаковими початковими даними:

- Початкова точка відліку координати по x, y.
- Напрямок куту напрямку руху.

Пристрій повинен бути оснащений модулем RTC, який здійснює синхронізацію прийому та передачі пакетів.

Для захисту прошивки від зчитування хакерами при завантаженні керуючої програми необхідно встановити біт захисту від зчитування. В разі спроби читання програми мікроконтролер очистить всю пам'ять програм.

Перевірка здійснення шифрування та дешифрування виконується за допомогою зовнішнього персонального комп'ютера, через який послідовно за таймером передаються повідомлення однакового змісту від пристрою до пристрою. Після чого повідомлення перевіряються на помилки.

Впровадження у виробництво можливе у декількох варіантах:

- Продаж запрограмованого мікроконтролера з встановленим бітом захисту від

зчитування керуючої програми.

- У вигляді невеликого модуля, який виступає UART – UART мостом.
- У вигляді модуля, який має в собі радіомодуль з підключенням до схеми користувача по UART або USB інтерфейсу.
- У вигляді модуля з аналоговим входом та аналоговим виходом.

Розглянемо функціональну схему варіанта використання у вигляді запрограмованого мікроконтролера з захищеною пам'яттю програми. На рис. 7 зображено функціональну схему МК, який виступає мостом між різними інтерфейсами.

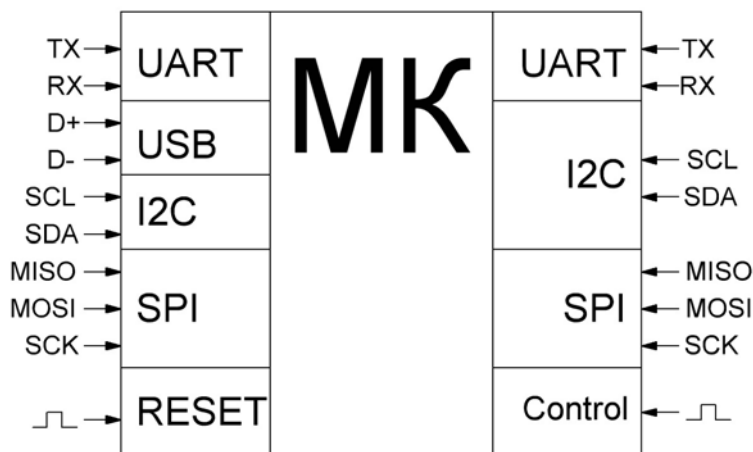


Рисунок 7 – Функціональна схема моста на основі МК

Джерело: розроблено автором

Такий міст повинен шифрувати та розшифровувати трафік даних, який проходить через нього. З рис. 7 видно, що мікроконтролер має декілька вхідних та декілька вихідних інтерфейсів передачі даних. Це дозволяє з легкістю адаптувати мікроконтролер з алгоритмом шифрування у будь-яку систему передачі даних. Також на схемі вказано сигнал контролю, за допомогою якого користувач матиме змогу вибирати потрібні йому інтерфейси. Отже такий варіант виступає у вигляді моста між декількома інтерфейсами. Але якщо користувач потребує одразу здійснити передачу даних через радіоканал, то необхідно використати варіант модуля з МК радіомодуля. Такий варіант одразу передбачає передачу даних між двома пристроями через радіоканал, що на сьогоднішній день є дуже актуальним. Функціональна схема модуля МК з радіомодулем зображена на рис. 8.

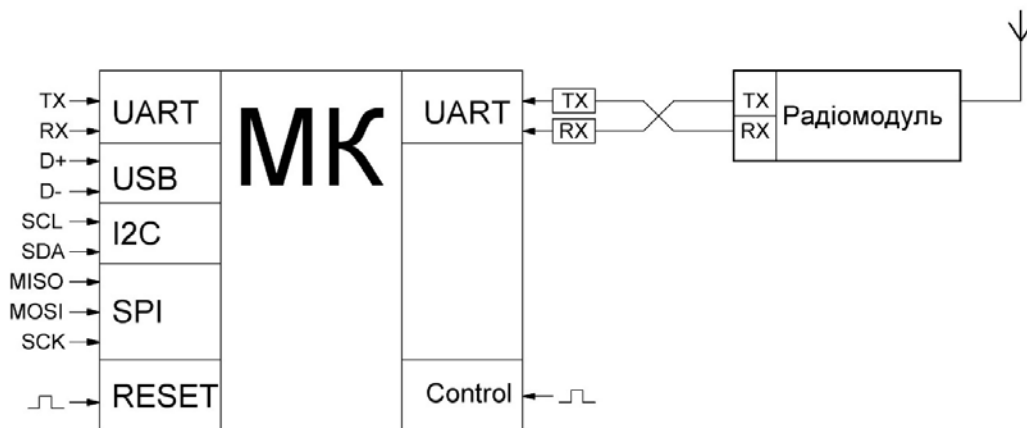


Рисунок 8 – Функціональна схема модуля на основі МК та радіомодуля

Джерело: розроблено автором

Але якщо потрібна шифрована передача даних на основі старих аналогових комунікацій можливий варіант передачі даних через модуль який сприймає аналоговий сигнал відцифровує його через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) шифрує та перетворює в аналоговий сигнал через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Функціональна схема модуля з аналоговим вводом та виводом зображена на рис. 9.



Рисунок 9 – Функціональна схема модуля з аналоговим вводом та виводом

Джерело: розроблено автором

Проведено тестування працездатності розробленого програмного та апаратного забезпечення, що підтвердило можливість його використання у квадрокоптерах під час моніторингу сільськогосподарських наземних об'єктів. Було успішно здійснено обмін шифрованими даними між двома пристроями по радіоканалу. Після шифрування на одному пристрої, дані були успішно дешифровані на іншому пристрої.

Висновки. У даній роботі було запропоновано метод шифрування трафіку квадрокоптерів через аналоговий тракт під час моніторингу сільськогосподарських наземних об'єктів.

Розроблене програмне та апаратне забезпечення системи шифрування трафіку квадрокоптера, що дозволяє шифрувати дані, якими квадрокоптер обмінюється з комп'ютером оператора.

Для шифрування даних було використано шифр Вернама. А у якості ключа шифрування псевдовипадкову послідовність, що генерувалася за допомогою математичного більярду Сіная. Було запропоновано покращену математичну модель генерації ключів шифрування на основі більярду Сіная. На основі запропонованої математичної моделі було розроблено програмне забезпечення та створені робочі макети пристроїв для проведення експериментів. Для створення макету обрано модуль на основі мікроконтролера STM32F103C8T6, дані між пристроями передавалися через радіомодуль. Проведено тестування працездатності розробленого програмного та апаратного забезпечення, що підтвердило можливість його використання у квадрокоптерах.

Список літератури

1. Agarwal A., Shukla V., Singh R., Gehlot A., Garg V. (2018), "Design and Development of Air and Water Pollution Quality Monitoring Using IoT and Quadcopter", In: Singh R., Choudhury S., Gehlot A. (eds) Intelligent Communication, Control and Devices, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 624, Springer, Singapore, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2_49
2. "Unmanned aerial vehicles in agriculture" (2019), Website of the Company "GEOMIR", Modern technologies for agribusiness, URL: <https://www.geomir.ru/publikatsii/bespilotniki-v-selskom-khozyaystve/> (in Russian)
3. Duggal V., Sukhwani M., Bipin K., Reddy G.S., Krishna K.M. (2016) "Plantation monitoring and yield estimation using autonomous quadcopter for precision agriculture", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5121-5127, doi: 10.1109/ICRA.2016.7487716, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7487716>
4. Zubarev Ju.N., Fomin D.S., Chashhin A.N., Zabolotnova M.V. (2019), "The use of unmanned aerial vehicles in agriculture", Bulletin of the Perm Federal Research Center, №2. URL:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-selskom-hozyai-stve> (in Russian)
5. Главное о безопасности дронов. Веб-сайт фирмы «Лаборатория Касперского». URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/threats/can-drones-be-hacked> (дата обращения: 27.10.2021)
 6. Eastlake, D.E., Schiller, J.I., & Crocker, S. (2005). Randomness Requirements for Security. RFC, 4086, 1-48.
 7. Barker, E. and Kelsey, J. (2015), Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators, Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-90Ar1> (Accessed November 29, 2021)
 8. Sinai Y.G. Dynamical systems with elastic reflections . *Russian Mathematical Surveys*.1970. Vol. 25, no. 2. Pp. 137-189.
 9. Ганапольский Е.М. О природе квантового хаоса в рассеивающей бильярдной K-системе . *Доповіді Національної академії наук України*. 2012. № 3. С. 85-91.
 10. Собінов О.Г. Простий генератор псевдовипадкової послідовності . *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*: зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Кіровоград, 4 груд. 2014 р. Кіровоград: КНТУ, 2014. С. 184.
 11. STM32CubeIDE. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>.
 12. STM32F103C8 . URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>.
 13. JDY-40 2.4G wireless serial port transmission transceiver and remote communication module . URL: <https://sunhokey.cn/collections/wifi-module/products/jdy-40-2-4g-wireless-serial-port-transmission-transceiver-and-remote-communication-module>.
 14. GPIO internal peripheral . URL: https://wiki.st.com/stm32mpu/wiki/GPIO_internal_peripheral.
 15. AN2582 Application note. URL: <http://read.pudn.com/downloads106/sourcecode/embed/437624/stm32/STM32F Documents/Application Note/STM32F10xxx USART application examples.pdf>.
 16. Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC) . URL: <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.dai0179b/ar01s01s01.html>

Referencis

1. Agarwal A., Shukla V., Singh R., Gehlot A., Garg V. (2018). "Design and Development of Air and Water Pollution Quality Monitoring Using IoT and Quadcopter", In: Singh R., Choudhury S., Gehlot A. (eds) Intelligent Communication, Control and Devices, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 624, Springer, Singapore, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2_49 [in English].
2. "Unmanned aerial vehicles in agriculture" (2019), Website of the Company "GEOMIR", Modern technologies for agribusiness. www.geomir.ru. Retrieved from <https://www.geomir.ru/publikatsii/bespilotniki-v-selskom-khozyaystve/> [in Russian]
3. Duggal V., Sukhwani M., Bipin K., Reddy G.S., Krishna K.M. (2016). "Plantation monitoring and yield estimation using autonomous quadcopter for precision agriculture", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5121-5127, doi: 10.1109/ICRA.2016.7487716. ieeexplore.ieee.org. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7487716> [in English].
4. Zubarev Ju.N., Fomin D.S., Chashhin A.N., Zabolotnova M.V. (2019). "The use of unmanned aerial vehicles in agriculture", Bulletin of the Perm Federal Research Center, №2. cyberleninka.ru. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-selskom-hozyai-stve> [in Russian].
5. Glavnoe o bezopasnosti dronov. Veb-sajt firmy «Laboratorija Kasperskogo» [The main thing about the safety of drones. Website of Kaspersky Lab]. www.kaspersky.ru. Retrieved from <https://www.kaspersky.ru/resource-center/threats/can-drones-be-hacked>
6. Eastlake, D.E., Schiller, J.I., & Crocker, S. (2005). Randomness Requirements for Security. RFC, 4086, 1-48 [in English].
7. Barker, E. and Kelsey, J. (2015). Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators, Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-90Ar1> (Accessed November 29, 2021) [in English].
8. Sinai, Y.G. (1970). Dynamical systems with elastic reflections . *Russian Mathematical Surveys*, Vol. 25, 2, 137-189. [in English].
9. Ganapol'skij, E.M. (2012). O prirode kvantovogo haosa v rasseivajushhej bil'jardnoj K-sisteme [On the nature of quantum chaos in a scattering billiard K-system]. *Dopovidi Nacional'noi akademii nauk Ukraini – Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*.]. 2012. № 3. S. 85-91.

10. Sobinov, O.H. (2014). Prostyj henerator psevdovypadkovoï poslidovnosti [A simple pseudo-random sequence generator]. *Information technology and computer engineering: naukovo-praktychna konferensia. (4 hrud. 2014 r.) – Scintific and Practical Conference.* (pp. 184). Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
11. STM32CubeIDE . *www.st.com*. Retrieved from <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>. [in English].
12. STM32F103C8 . *www.st.com*. Retrieved from <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html> [in English].
13. JDY-40 2.4G wireless serial port transmission transceiver and remote communication module . *sunhokey.cn*. Retrieved from <https://sunhokey.cn/collections/wifi-module/products/jdy-40-2-4g-wireless-serial-port-transmission-transceiver-and-remote-communication-module> [in English].
14. GPIO internal peripheral . *wiki.st.com*. Retrieved from https://wiki.st.com/stm32mpu/wiki/GPIO_internal_peripheral [in English].
15. AN2582 Application note . *read.pudn.com*. Retrieved from http://read.pudn.com/downloads106/sourcecode/embed/437624/stm32/STM32F10xxx_USART_application_examples.pdf [in English].
16. Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC) . *infocenter.arm.com*. Retrieved from <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.dai0179b/ar01s01s01.html> [in English].

Yelyzaveta Meleshko, Prof., DSc., **Oleksandr Maidanyk**, Master student, **Oleksandr Sobinov**, lecturer, **Roman Mynailenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

A Method of Encrypting the Traffic of Quadcopters Through an Analog Path During Monitoring of Agricultural Ground Objects

The purpose of this work is to develop a method for encrypting the traffic of quadcopters through an analog path throughout the monitoring of agricultural ground objects.

The use of unmanned aerial vehicles of a quadcopter type for monitoring ground objects in agriculture is becoming more and more common practice and allows you to effectively solve a wide range of tasks. Technologically equipped drones in agriculture are capable of performing various monitoring operations, in particular: aerial photography, video filming, thermal filming, laser scanning, etc. Such monitoring makes it possible to assess the quality of crops and identify the fact of damage or death of crops, identify crop defects and problem areas, analyze the effectiveness of plant protection measures, check compliance with crop rotation plans, identify deviations and violations in the process of agrotechnical work, analyze the relief and create maps, conduct audit and inventory of land, carry out security measures and collect information for the security service, etc.

At the same time, drones are vulnerable to information attacks, which can be carried out for different purposes, in particular, to steal a drone, use it in a network of bots to attack other devices, or to intercept information that it collects for a device operator. All this necessitates the development of effective methods of information protection of drones from cyberattacks.

In this work, the Vernam cipher was used to encrypt the data, and a pseudo-random sequence generated using the Sinai mathematical billiard was used as the encryption key. Thus, an improved mathematical model for generating encryption keys based on the Sinai billiards has been proposed. On the basis of the proposed mathematical model, software was developed and working models of devices for conducting experiments were created. To create a layout, a module based on the STM32F103C8T6 microcontroller was selected, data between devices was transmitted via a radio module.

encryption, key generation, traffic, quadcopter, analog path, monitoring, agricultural ground objects

Одержано (Received) 30.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 16.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.227-238>**О.М. Дреєв**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна**e-mail: drey.sanya@gmail.com***Б.Ю. Железняк**, студ.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна**e-mail: bzeleznak@gmail.com*

Аналіз комп'ютерних систем візуалізації з метою алгоритмізації обґрунтування щодо їх використання

Проектування програмного забезпечення передбачає використання кількох фреймворків, які хоч і скорочують час розробки програмного забезпечення, але мають свої можливості, недоліки та переваги. Використання фреймворка також накладає на проект певні архітектурні особливості, які залежать від обраного каркаса. Тому перед інженером-програмістом постає інтелектуальне завдання створення архітектури програмного забезпечення з вибором із ряду доступних фреймворків та з урахуванням їх впливу на функціонування системи в цілому. Результат проектування є важливим кроком, який може вплинути на успіх проекту. Тому в даній роботі розглядається проблема посилення об'єктивної складової у процесі вибору фреймворку, зокрема системи комп'ютерної візуалізації при створенні архітектури програмного забезпечення. В результаті запропоновано метод вибору системи візуалізації, який базується на аналізі завдань до системи візуалізації з виведенням вимог до побудованого зображення. Показано застосовність багатокритеріальної оптимізації для поділу застосовуваних систем візуалізації та вибору найкращої з них.

проекування, програмне забезпечення, прийняття рішення, комп'ютерна система візуалізації

Постановка проблеми. В роботі прийнято за термін «комп'ютерні системи візуалізації» приймати набір алгоритмів та програмних засобів в результаті використання яких ми отримуємо зображення. Введення даного терміну, який є близьким до терміну «комп'ютерна графіка», використано для відокремлення засобів отримання зображення від методів його зберігання, обробки та інших задач комп'ютерної графіки. Тому, тут і далі, «комп'ютерна система візуалізації» є частиною засобів «комп'ютерної графіки», яка відповідає за частину створення зображення на моніторі (проекторі або іншому пристрою виведення динамічної картини). В разі прийняття означення «комп'ютерні системи візуалізації», до комп'ютерної системи візуалізації будуть входити апаратні засоби побудови зображення та їх відображення, а також програмні засоби побудови цифрового зображення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існує багато методів побудови цифрового зображення (растерізація) з геометричного завдання об'єктів сцени, властивостей поверхонь цих об'єктів та параметрів освітлення в сцені [1, 2, 3, 4]. Також сюди входять і засоби створення сцен з врахуванням растрових шаблонів цифрового зображення (текстур) [18]. Всі ці методи є відмінними по якості створення зображення по критеріям стабільності, реалістичності, правильності а також мають

колосальні відмінності в часі створення окремого кадру цифрової сцени. Більш того, існують відмінності в розрізі одного програмного забезпечення, з однаковим набором алгоритмів побудови зображення, але з різними налаштуваннями, або при використанні іншої апаратної бази. Все це безумовно впливає на швидкість та якість побудованого зображення, і різноманіття засобів та налаштувань систем візуалізації призводить до ускладнення процесу визначення засобів і налаштування системи візуалізації для вирішення конкретних задач.

Постановка завдання. В результаті аналізування стану проектування програмного забезпечення, яке використовує системи комп'ютерної візуалізації, маємо об'єктивне протиріччя, коли з одного боку маємо велику кількість комп'ютерних систем візуалізації, а з іншого є потреба в швидкому та правильному виборі конкретної системи візуалізації з врахуванням вимог що до візуалізації для вирішення конкретних задач. Для вирішення визначеного протиріччя було поставлено наступну мету:

Мета статті полягає в створенні методу обрання системи комп'ютерної візуалізації з врахуванням вимог що до розв'язуваних задач.

Об'єктом дослідження є процес проектування систем, які використовують комп'ютерну візуалізацію.

Предметом дослідження є методи визначення систем комп'ютерної візуалізації, які б відповідали поставленим задачам.

Поставлена мета містить ряд невизначеностей, які потрібно вирішити розв'язавши наступні задачі:

- 1) Провести класифікацію вимог до систем візуалізації та пов'язати ці вимоги з задачею, яку поставлено до системи візуалізації.
- 2) Провести класифікацію систем комп'ютерної візуалізації з врахуванням визначених вимог.
- 3) Побудувати метод визначення комп'ютерних систем візуалізації, які задовольнятимуть визначеним вимогам.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до визначення вимог до задач, які повинна вирішувати система комп'ютерної візуалізації, потрібно провести насамперед класифікацію задач, які вирішує система візуалізації. В наш час комп'ютерні системи використовуються не лише в технічних областях, але вирішують задачі і в побуті, мають значну вагу в мультимедіа та використовуються для розваг та ігор. Відповідно, для кожної із задач, вимоги до системи візуалізації є суттєво різними. Наприклад, для мікроконтролерного пристрою, який надає кілька вимірних значень, може мати світлодіодний індикатор на кілька цифр, а система проектування повинна розгортати креслення з високою роздільною здатністю. Як показало дослідження, в більшості джерел [1, с.6; 2, с.20; 3, с.5; 4, с.3] використовують поділ комп'ютерної графіки не за класифікацією до вимог, що стоять до процесу утворення зображення, а по сферам людської діяльності, наприклад в [2] наведено класифікацію, яку відображає наступний список:

- 1) інженерна графіка;
- 2) автоматизовані системи наукових досліджень;
- 3) інформаційні системи;
- 4) системи ілюстративної та ділової графіки;
- 5) системи машинної геометрії;
- 6) анімаційні задачі;
- 7) комп'ютерні ігри;
- 8) відео тренажери;
- 9) мистецтво та видавнича діяльність.

Однак, в розрізі ділової графіки, необхідно враховувати засоби демонстрації графічних матеріалів. Наприклад, графік для зображення динаміки змін даних в часі для презентації матиме інші вимоги до системи візуалізації ніж фотографічне зображення планування жилого комплексу як і по роздільній здатності, так і в розрізі правильності передачі кольору. Більш детальна класифікація [1, с.6-7] містить опис специфічних вимог до систем візуалізації, але ці вимоги в одному пункті можуть мати протиріччя. Наприклад, за наведеною класифікацією інженерна графіка може вимагати моделювання в реальному часі та реалістичність візуалізації, що може привести до протиріччя вимог. Тому стає актуальним розв'язання задачі побудови класифікації вимог до систем візуалізації та розробки методики проекції поставлених задач діяльності на ці вимоги до систем візуалізації.

Пропонується використовувати для пошуку системи візуалізації, систему яка базується на вимогах до результату візуалізації. Тому за основу можна запропонувати наступні вимоги до комп'ютерних систем візуалізації:

- 1) швидкодія;
- 2) правильність побудови освітлення (накладання тіней повинно бути правильним, але їх зображення може бути схематичним);
- 3) реалістичність побудови освітлення (допускає порушення законів оптики, пропущення тіней, але будує якісні для ока зображення);
- 4) підтримка динамічного освітлення;
- 5) точність відображення кольорів;
- 6) врахування властивостей поверхні при розрахунку кольору пікселя (відблиски, розсіювання, поглинання, світіння, колір поверхні);
- 7) використання текстур;
- 8) використання мап рельєфу;
- 9) зображення синтезоване;
- 10) зображення натуральне;
- 11) допуск втрат інформації при стисненні або відтворенні зображення;
- 12) вимоги до складності сцени;
- 13) можливість змінювати метод зображення (показати лише вершини, ребра, ігнорування текстур або матеріалу або інші опції, які можна змінити в довільний момент);
- 14) можливість будувати стереоскопічні пари зображення сцени;
- 15) інші вимоги.

З точки зору виконавця технічного проекту, в якому використовуються системи візуалізації, формулювання вимог не є першим етапом, а в першу чергу формується задача, яку потрібно розв'язати за допомогою системи візуалізації. Приклади таких задач показано в наступному переліку:

- 1) плакати;
- 2) ділова графіка;
- 3) публікація в Інтернеті;
- 4) 3D графіка, художня;
- 5) графіка для динамічних ігор;
- 6) графіка для повільних ігор;
- 7) графіка інженерна;
- 8) графіка конструкторська;
- 9) технічні інтерактивні схеми для устаткування;
- 10) відображення графіків та діаграм;
- 11) відеомонтаж;

- 12) відеоспостереження;
- 13) медичне зображення;
- 14) наукове зображення;
- 15) відображення текстів для редагування;
- 16) системи віртуальної реальності;
- 17) інші.

Створені списки є суб'єктивно-орієнтовані і можуть відрізнятися в залежності від кола інтересів робочих груп. Тому метод може трансформуватися до конкретних алгоритмів, які відповідатимуть потребам конкретних груп розробників або замовників програмного забезпечення.

На основі наведених переліків вимог та задач пропонується метод обрання систем візуалізації на основі наступної послідовності дій (термінологія наукових методів, які використані в блок-схемі, взято з [5]; рис. 1):

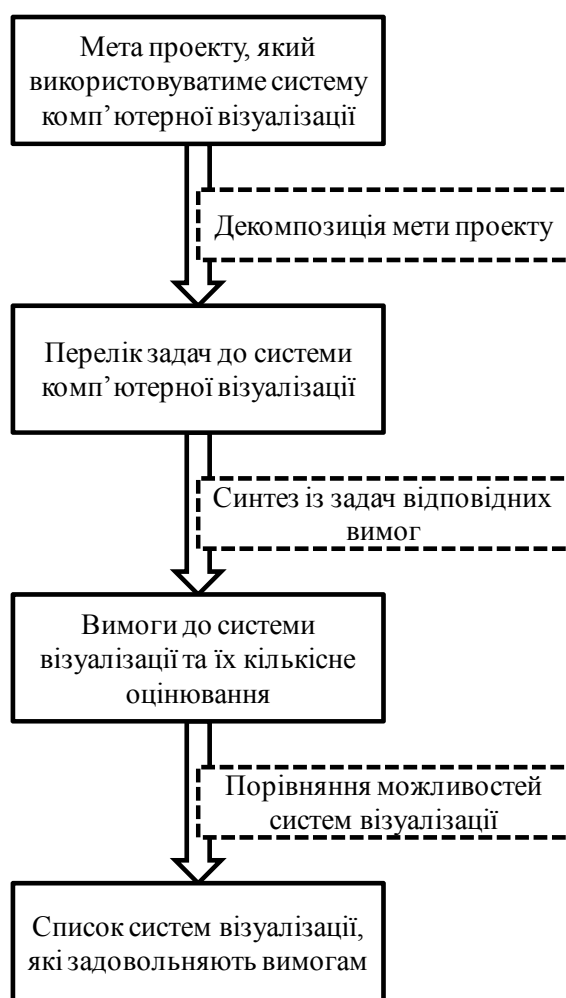


Рисунок 1 – Метод визначення сумісних комп'ютерних систем візуалізації

Джерело: розроблено автором

Побудований метод не є детермінованим, навіть при умові фіксованих списків задач та вимог, тому що метод містить дії, які мають інтелектуальні складові при виконанні дій декомпозицій та синтезу. Процес порівняння та конкурс комп'ютерних систем візуалізації є можливість формалізувати при умові фіксації списку вимог до систем візуалізації та засобів їх кількісного оцінювання, наприклад, використавши на

основі теорії множин та кортежів кількісних оцінок правила багатокритеріальної оптимізації Парето [6].

Експериментальна частина. Авторами розглянуто приклад застосування методу обрання системи комп'ютерної візуалізації на прикладі проектування програмного забезпечення, яке реалізує покрокову стратегію. Однак, формулювання вимог до системи комп'ютерної візуалізації можливий лише після аналізу вимог до отриманого зображення з порівнянням вимог до інших програмних засобів де використовується графіка. Тому першим етапом обрання системи візуалізації є формулювання мети проекту програмного забезпечення – побудова зображення для комфортної гри в жанрі покрокової стратегії.

1) Формування переліку задач на основі декомпозиції мети проекту.

Швидкість побудови зображення є однією із головних особливостей динамічної (ігрової) візуалізації, оскільки від швидкості побудови зображення залежить сприйняття користувачем розробленої гри. Це зобов'язання виникло внаслідок необхідності враховувати швидкість сприйняття інформації людиною. У середньому, людський зір здатний реагувати лише на 20-25 кадрів у секунду. Вимоги до швидкості побудови зображення різняться від динаміки жанру гри, наприклад, у шутерах та гонках спостерігається часта зміна зображення і для забезпечення вчасного реагування на зміни в оточенні часто вимагається можливість побудови 120 та більше кадрів за секунду. У стратегічних іграх, графічних редакторів та інженерних рішеннях, зокрема і в покроковій стратегії, швидкість зміни кадрів повинна бути лише достатньою для забезпечення видимості плавності анімацій та відсутності мерехтіння – 30 кадрів за секунду. Більш детально описано про дотримання частоти зміни кадрів наведено в [7]. Покрові стратегічні ігри насамперед базуються на принципах неспішності, тому динамічна зміна зображення в таких іграх створюється для подоби живої картини. Застосування такої динаміки вдало спостерігається на прикладі гри з серії Civilization. Починаючи з перших ігор у серії, пересування ігрових персонажів, побудова внутрішніх та зовнішніх об'єктів у містах, використання зброї масового ураження та природні лиха супроводжувалися динамічною зміною на карті. Такий виборчий підхід до динаміки зміни зображення дозволив підтримувати плавну та захоплюючу атмосферу, а також задовольнити потребу користувача відстежити прогрес в грі.

Велику швидкість зміни зображення можна простежити на прикладі гри Quake та її модифікації DeFRaG. Гра Quake є класичним шутером від першої особи, в якому швидкість зміни кадрів середньо-швидка. В її модифікації DeFRaG, при активному проходженні мап, на певний час можлива швидка зміна кадрів. Швидкість руху в гоночних іграх може досягати більш 250 кілометрів за годину, тому, з огляду на те, що під час проходження траси потрібно часто змінювати положення камери, зміна кадрів також повинна відбуватися з достатньою частотою.

Користувач повинен чітко розуміти особливості поверхні та рельєфу в ігрових локаціях. Наприклад, якщо розглядати культову гру Heroes Might of Magic 3, то в ній спостерігається розподілення на глобальну карту та на карти битв. На глобальній карті рельєф, перш за все, впливає на швидкість переміщення героя на тій чи іншій місцевості. В битвах ігрові одиниці, що приписані місцевості на якій йде битва, отримують прибавку у 1 одиницю наступних показників: атака, захист, швидкість (як переміщення, так і ініціатива). Крім того, в битвах має певне значення рельєф карти в вигляді перешкод, що інколи кардинально змінює результат битви. Місцевість впливає не лише на бійців, але і на самого героя, забороняючи використовувати магію вище 1-го рівня, або дозволяючи чаклувати усі заклинання на рівні «експерт», що має найвищий рівень [8].

При створенні рельєфу варто звертати увагу не тільки на технічну складову, а і на візуально динамічну. Динамічні сцени покрокової стратегії використовують найчастіше для створення живого ефекту та поділяються на «пасивні» та «активні», що реалізується за допомогою об'єктів на карті (наприклад, курка, яка дзьобає щось на землі, працюючий млин, дим з будинків і т.д.), пересування хмар та води, дій ігрового персонажу на місці (наприклад, виконує анімацію перевірки свого клинку на гостроту). Спочатку проминають такі моменти, адже найчастіше покрокові комп'ютерні стратегії розробляються як аналог настільній гри. Але якщо приділити анімаціям увагу, то гра отримає більш живу атмосферу, а гравець можливість більш зануритися в атмосферу гри.

Однією із складових якісної гри є оптимізація. Спрощення візуалізації об'єкта є найлегшим способом досягти підвищення швидкості формування зображення. Під спрощенням візуалізації передбачаються дії, які приводять до зменшення потреб в обробці зображення. До описаних дій належить прив'язка статичної тіні об'єкта до власне моделі об'єкта. Проблема згаданої прив'язки може бути лише в динаміці тіней, тому такий підхід до оптимізації гри є рентабельним. Якщо розглядати точність побудови тіні об'єкта, то для початку потрібно знати як саме тінь була створена, чи є вона частиною моделі об'єкта, або динамічно формується при зміні кута та сили освітлення. Якщо аналізувати ігри від першого особи, то можна спостерігати динамічну зміну тіней або її відсутність при взаємодії об'єкта з навколишнім середовищем, тобто зміни освітлення за допомогою умовно «факела», що активується і підводиться до об'єкта дослідження. Якщо досліджувати більш складну техніку освітлення "Muzzle Flash Shading", у якій створюється ефект реалістичних тіней від об'єктів при стрільбі з вогнепальної зброї, то варто відзначити, що такий ефект спостерігається не в кожному шутері, а його реалізації в іграх від третьої особи і зовсім немає і по цей час. Згаданий ефект мав би бути у Gears of War 1, так як це було демонстровано в трейлері гри, але був вирізаний з релізної версії, тому "Muzzle Flash Shading" можна зустріти лише в іграх Doom 3, Killzone 2, STALKER [9].

Зазвичай саме в іграх з віддаленою камерою та при наявності умовно 3D об'єктів застосовуються статичні тіні, так в грі Heroes Might of Magic 3, можна спостерігати прив'язану тінь об'єкта, але навіть така тінь є необхідною для створення об'ємності та правильності об'єкта.

Ще однією особливістю динамічної візуалізації є технологія трасування променів. Згадана технологія дозволяє придати грі більшій реалістичності, завдяки обчислюванню траєкторії кожного променя світла від об'єкта до камери, і виводить на екран картинку з урахуванням проведених розрахунків. Перш ніж використовувати технологію трасування променів потрібно ретельно ознайомитися з матеріалами та кольорами, які будуть на сцені, так як одні з них краще відображають світло, інші гірше, а скло і зовсім переломлює промені, що створює інший ефект. Докладний підхід дає можливість точно передати освітленість предметів, їхні тіні, заломлення, розсіювання світла й, взагалі, надавати зображенню на екрані реалістичніший вигляд. Окрім цього, трасування променів дозволяє спростити створення рівнів та їхнього оточення. Так при створенні рівня, на якому буде горіти світильник, здебільшого, потрібно налагодити тіні та промені вручну. А за допомогою трасування променів, алгоритм, що відповідає за цю роботу, обробить складові рівня в автоматичному режимі. Окрім цього, трасування може працювати й зі звуком, створюючи набагато реалістичніше аудіо для ігор. Проблемою технології трасування є її витрати на ресурси комп'ютера, тому що обробка одного кадру за допомогою технології трасування може займати від декількох годин до декількох днів. Отже, цілковито застосовувати досліджувану технологію для створення ігор на теперішній час не є раціональним

рішенням, потрібно її використовувати за потреби та лише для деяких об'єктів [10, 11]. Відповідно, технологія трасування променів хоча і є бажаною частиною гри, але не є складовою, особливо якщо розглядати такий жанр як стратегія, де саме ця технологія майже не застосовується.

В багатьох випадках вимагається ілюзія реалізму або навмисна стилізація до рисунків. Ілюзія реалізму або стилізація потрібна при створюванні ігор наближеної реальності: історичних, фантастичних, мультиплікаційних та інших історій [12, 13].

Існує велика кількість елементів, які неможливо спростити. Вдалим прикладом системи, в якій неможливо спростити елементи, може бути візуалізація результатів медичного обстеження, або креслення та схеми приладів або схем.

В більшості інженерних та художніх програмах є можливість переключатися між методами візуалізації. Відображення лише ребер об'єкту дозволяє чітко побачити утворення форми, наявність внутрішніх елементів та інше. Спрощений рендер без урахування особливостей поверхні, тобто матеріалу та кольору, тобто текстури, дозволить дуже швидко будувати складні зображення з більшим вмістом вершин та граней без спрощення форми. Спрощений рендер, хоча і враховує матеріал та текстуру, призначений лише для оцінювання отриманої картини або для художнього сприйняття. Остаточне зображення будується найбільш якісними рендерами, за допомогою яких можна досягти фотореалістичності, але при цьому побудова кадру, в залежності від складності сцени, може продовжуватися від кількох секунд до декількох годин.

Технічне зображення повинне бути зрозумілим, а не гарним. Для технічної візуалізації необхідна насамперед якість виконання роботи, зображення повинно містити лише необхідну інформацію. Непотрібно гнатися за гарним зображенням, головне щоб все було зрозуміло і не відволікало від роботи із програмою. Тому такі програми як AutoCAD, для створення технічних креслень, не має можливості створювати фото реалістичні сцени, проте має можливість швидко будувати складні об'єкти та їх перерізи із точним врахуванням освітленості. Це досягнуто за рахунок зниження реалістичності та зниження частоти кадрів [14]. Також тут підвищені вимоги правильного переходу від полігонального зображення об'єктів до його креслення в заданій проекції. Вдалим прикладом може слугувати будинок із його переходом від цілого будинку до окремих поверхів, квартир, або можна уявити двигун та його складові.

В результаті можна відокремити наступні задачі візуалізації комп'ютерної покрокової стратегічної гри: забезпечити частоту кадрів; забезпечити зображення складних сцен; забезпечити зображення тіней від об'єктів сцени (правильність, реалістичність, динамічні/статичні), забезпечити врахування властивостей матеріалу; забезпечити використання текстур; забезпечити точність відтворення форм; врахувати відбиття та заломлення світла.

Інші вимоги та задачі виходять за рамки статті і освітлені в основній роботі.

В результаті огляду технічних особливостей комп'ютерної візуалізації є можливість переходу до їх систематизації та аналізування вимог по кожній з відокремлених задач, що відповідає наступному пункту за схемою на рис. 1.

2) Формування переліку вимог.

Визначення вимог до системи візуалізації вимагає на етапі проектування знання та уявлення про запланований готовий програмний продукт. Для цього використовується робота художників та сценаристів, які дадуть уявлення про те, що повинен побачити гравець, кількість елементів та рухомих об'єктів в кадрі, та інші не менш важливі характеристики. Тут є вагомими розкадровки майбутнього програмного забезпечення, типових етапів роботи та приклади робочих сцен (рис. 2)



Рисунок 2 – Проект ігрової сцени програмного продукту, який розробляється
Джерело: розроблено автором

На основі зазначених міркувань, можна зробити витяг основних задач, які полягатимуть на систему візуалізації. За мету роботи прийнято обрання системи візуалізації покрокової стратегії, але для порівняння та підкреслення особливостей додамо задачі візуалізації шутеру та системи попередньої демонстрації моделей для 3Д-друку (табл. 1):

Таблиця 1 – Задачі, які поставлені до системи візуалізації

	Покрокова стратегія	Шутер	Демонстрація моделей 3Д-друку
Швидке генерування кадру	Близько 30	Більше 30, бажано 120 та більше	До 1..3 с.
Складність сцени	Висока	Середня	Дуже складні
Правильність тіней	Можливі схематичні тіні	Можливі схематичні тіні	Високі вимоги до правильності побудови тіней
Реалістичність тіней	Бажаний реалізм	Бажаний реалізм	Реалізм не вимагається
Динамічні тіні	Рельєф незмінний, можливо використати статичні тіні	Бажано використати динамічні тіні	Тіні розраховуються для кожного кадру динамічно
Використання властивостей матеріалу	Високі вимоги до врахування матеріалу	Високі вимоги до врахування матеріалу	Достатньо загального кольору
Якість текстур	Висока	Висока	Текстури відсутні
Можливість спрощення моделей	Так	Так	Ні
Врахування відбиття та заломлення світла	Бажано, приблизно	Бажано, приблизно	Необхідно, точно

Джерело: розроблено автором

3) Кількісне оцінювання вимог до системи візуалізації.

Наступний крок також містить суб'єктивну складову, яку виконують експерти, які проводять проектування програмного продукту. Для цього відокремлені задачі з приблизними вимогами зводять в таблицю (табл. 2). Тут проводиться кількісна оцінка вимоги та експертна оцінка важливості дотримання окремої вимоги:

Таблиця 2 – Кількісна оцінка вимог та їх важливості

	Кадри за сек.	Складність сцени	Тіні			Матеріал	Мультиполігональність	Використання RTX	Вартість
			Правильність	Реалізм	Динамічність				
Показник	30	1000 об'єктів	Ні	Так	Так	Так	Так	Так	0 грн.
Важливість, 0..1	1	1	0,3	0,8	0,5	0,75	0,9	0,2	0,95

Джерело: розроблено автором

Після формування таблиці вимог, їх важливості, потрібно визначити характеристики доступних систем візуалізації, та обрати з них більш оптимальні за принципом Парето.

4) Вибір систем візуалізації, які задовольняють вимогам.

Обрання системи візуалізації проведено за характеристиками, які наведено в [15-18] (табл. 3):

Таблиця 3 – Кількісна оцінка вимог та їх важливості

	Кадри за сек.	Складність сцени	Тіні			Матеріал	Мультиполігональність	Використання RTX	Вартість, грн.	Зважена оцінка
			Правильність	Реалізм	Динамічність					
Важливість, 0..1	1	1	0,3	0,8	0,5	0,75	0,9	0,2	0,95	
Цільові показники	30	1000 об'єктів	-	+	+	+	+	+	0	6,40
Unreal Engine [15]	+	+	-/+	+	+	+	+	+	0	6,25
Unity3D [16]	+	+	-	+	+	+	+	-	0	6,20
Blender 3D [17]	+	-/+	+	+	+	-/+	-	+	0	4,90
GoDot [18]	+	+	-	-	-	-	-	-	0	3,25

Джерело: розроблено автором

В результаті співставлення вимог, з врахуванням їх важливості, виділено перевагу систем створення ігрового програмного забезпечення Unreal Engine та

Unity3D. Обидві системи мають високу відповідність вимогам. Тому для уточнення вибору потрібно враховувати вже не інженерні показники. Наприклад, важливою частиною аргументів що до вибору, є наявність підготовлених кадрів та програмістів, для роботи з тією або іншою системою.

Висновки. За поставленою метою, створення методу обрання системи комп'ютерної візуалізації з врахуванням вимог що до розв'язуваних задач, проведено обрання системи комп'ютерної візуалізації гри в жанрі покрокової стратегії. В результаті:

Проведено класифікацію вимог до систем візуалізації та пов'язано ці вимоги з задачею, яку поставлено до системи візуалізації. За результатами класифікації вимог, сформовано класифікацію систем комп'ютерної візуалізації з врахуванням визначених вимог.

На основі введених класифікацій побудовано метод визначення комп'ютерних систем візуалізації, який використано для проектування ігрового програмного забезпечення покрокової стратегії, і в результаті отримано рекомендації що до використання фреймворків Unreal Engine або Unity3D.

Створений метод обрання системи комп'ютерної візуалізації є універсальним, і його можна використати для проектування програмного забезпечення. Метод дає системний підхід до розв'язання алгоритмічно невизначеної задачі обрання системи комп'ютерної візуалізації за допомогою експертних оцінок та багатокритеріальних порівнянь.

Список літератури

1. Комп'ютерна графіка : конспект лекцій для студентів усіх форм навчання спеціальностей 122 «Комп'ютерні науки» та 123 «Комп'ютерна інженерія» з курсу «Комп'ютерна графіка» / Укладач: Скиба О.П. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 88 с.
2. Маценко В.Г. Комп'ютерна графіка: навч. посіб. Чернівці: Рута, 2009. 343 с. ISBN 966-568-846-4
3. Новожилова М.В., Мироненко В.В. Комп'ютерна графіка. Ч.1: навч.-метод. посіб. Х.: ХНУБА, 2015. 60 с.
4. Білуха М. Т. Методологія наукових досліджень: підруч. К.: АБУ, 2002. 480 с.
5. M. Ehrgott and X. Gandibleux. Approximative Solution Methods for Multiobjective Combinatorial Optimization. TOP. Sociedad de Estadística e Investigación Operativa. 2004. T. 12, вип. 1.
6. Michael Klappenbach Understanding and Optimizing Video Game Frame Rates // December 16, 2020. URL: <https://www.lifewire.com/optimizing-video-game-frame-rates-811784>
7. Heroes Might of Magic 3. URL: <https://www.ubisoft.com/ru-ru/game/heroes-of-might-and-magic-3-hd>
8. Крис Фаина Большое исследование про свет в играх // 10 августа 2020. URL: <https://cyber.sports.ru/tribuna/blogs/betterthansex/2812994.html>
9. Улучшенная графика с трассировкой лучей и DLSS. URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/geforce/rtx/>
10. Владислав Миронович. Что такое трассировка лучей и нужна ли она нам в играх. URL: https://blog.allo.ua/chto-takoe-trassirovka-luchej-i-nuzhna-li-ona-nam-v-igrah_2020-05-51/
11. Unity Toon Shader мультяшный шейдер (1): мультипликационная раскраска. URL: <https://russianblogs.com/article/4312217817/>
12. Toony Colors Pro 2. URL: <https://assetstore.unity.com/packages/vfx/shaders/toony-colors-pro-2-8105>
13. AutoCAD overview. URL: <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>
14. Make something Unreal. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/unreal>
15. Встречайте Unity Gaming Services. URL: <https://unity.com/ru>
16. The Freedom to Create. URL: <https://www.blender.org/about/>
17. GODOT showcase. URL: <https://godotengine.org/showcase>
18. Романюк О.Н., Романюк С.О., Піддубецька М.П. Аналіз методів анізотропної фільтрації. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2013. № 2. С.123-128.

References

1. Skyba, O.P. (2019). *Komp'iuterna hrafika [Computer Graphics]*. Ternopil' : Ternopil's'kyj natsional'nyj tekhnichnyj universytet imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].
2. Matsenko, V.H. (2009). *Komp'iuterna hrafika [Computer Graphics]*. Chernivtsi: Ruta[in Ukrainian].
3. Novozhylova, M.V. & Myronenko, V.V. (2015). *Komp'iuterna hrafika [Computer Graphics]*. Part 1. Kh.: KhNUBA [in Ukrainian].
4. Bilukha, M. T. (2002). *Metodolohiia naukovykh doslidzhen [Research methodology]*. Kyiv: ABU [in Ukrainian].
5. Ehrgott, M. & Gandibleux, X. (2004). Approximative Solution Methods for Multiobjective Combinatorial Optimization . TOP. Sociedad de Estadística e Investigación Operativa. *Part. 12. Vol. 1.* [in English].
6. Michael Klappenbach Understanding and Optimizing Video Game Frame Rates // December 16, 2020. [www.lifewire.com](https://www.lifewire.com/optimizing-video-game-frame-rates-811784). Retrieved from <https://www.lifewire.com/optimizing-video-game-frame-rates-811784> [in English].
7. Heroes Might of Magic 3; www.ubisoft.com. Retrieved from <https://www.ubisoft.com/ru-ru/game/heroes-of-might-and-magic-3-hd> [in English].
8. Kris Fadina Bol'shoe issledovanie pro svet v igrakh [Chris Fadina A great study on lighting in games]. 10 avgusta 2020. cyber.sports.ru. Retrieved from <https://cyber.sports.ru/tribuna/blogs/betterthansex/2812994.html> [in Russian].
9. Ulutshennaja grafika s trassirovkoj lucej i DLSS [Improved graphics with ray tracing and DLSS]. www.nvidia.com. Retrieved from <https://www.nvidia.com/ru-ru/geforce/rtx/> [in Russian].
10. Vladislav Mironovich. Chto takoe trassirovka lucej i nuzhna li ona nam v igrakh [What is ray tracing and do we need it in games]. 01.05.2020. blog.allo.ua. Retrieved from https://blog.allo.ua/chto-takoe-trassirovka-lucej-i-nuzhna-li-ona-nam-v-igrakh_2020-05-51/ [in Russian].
11. Unity Toon Shader mul'tjashnyj shejder (1): mul'tiplikacionnaja raskraska [Unity Toon Shader cartoon shader (1): cartoon coloring]. russianblogs.com. Retrieved from <https://russianblogs.com/article/4312217817/> [in Russian].
12. Toony Colors Pro 2. [assetstore.unity.com](https://assetstore.unity.com/packages/vfx/shaders/toony-colors-pro-2-8105). Retrieved from <https://assetstore.unity.com/packages/vfx/shaders/toony-colors-pro-2-8105> [in English].
13. AutoCAD overview. www.autodesk.ru. Retrieved from <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview> [in English].
14. Make something Unreal. [www.unrealengine.com](https://www.unrealengine.com/en-US/unreal). Retrieved from <https://www.unrealengine.com/en-US/unreal> [in English].
15. Vstrechajte Unity Gaming Services [Meet Unity Gaming Services]. [unity.com](https://unity.com/ru). Retrieved from <https://unity.com/ru> [in Russian].
16. The Freedom to Create . www.blender.org. Retrieved from <https://www.blender.org/about/> [in English].
17. GODOT showcase . [godotengine.org](https://godotengine.org/showcase). Retrieved from <https://godotengine.org/showcase> [in English].
18. Romaniuk, O.N. & Romaniuk, S.O. & Piddubets'ka, M.P. (2013). Analiz metodiv anizotropnoi fil'tratsii [Analysis of anisotropic filtration methods]. *Vymiriuval'na ta obchysliuval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh – Measuring and computing devices in technological processes*, 2, 123-128 [in Ukrainian].

Olexandr Drieiev, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Bohdan Zhelesnyak, student
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of Computer Visualization Systems in Order to Algorithmize the Rationale for their Use

Designing modern software involves the use of several frameworks. The framework reduces software development time. But frameworks have their own capabilities, disadvantages and advantages. The use of the framework also imposes certain architectural features on the project. Therefore, the engineer faces the intellectual task of creating a software architecture when you need to choose from an available set of frameworks and take into account the impact of these frameworks on the functioning of the system as a whole. The design result is an important step that has an impact on the success of the project. Therefore, this paper considers the problem of strengthening the objective component in the process of choosing a framework, namely the computer visualization system when creating a software architecture.

As a result, a method for selecting a visualization system is proposed. This method is based on the analysis of tasks that are put forward in the visualization system, taking into account the requirements for the image to be built. On the basis of the formed tasks to the visualization system, the article synthesizes the

requirements for the visualization systems. Also, according to experts, the importance of compliance with certain requirements is assessed. According to the characteristics of computer visualization systems and quantitative values, the evaluations provided by experts show the applicability of multicriterial optimization to separate the applicable visualization systems and choose the best one. In order to illustrate the choice of computer visualization system, the article uses an example of applying the method to a turn-based strategy game.

The result is a method for selecting computer visualization systems, which is based on the created classifications of tasks facing the visualization system. The relationship between the purpose of the visualization system and the list of tasks that the visualization system must perform is shown. The paper identifies the stages that depend on subjective and objective factors. The results allow a structured approach to computer visualization systems in the software architecture design process.

design, software, decision making, computer visualization system

Одержано (Received) 02.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 24.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021

ЗМІСТ

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

<i>Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, Ю.І. Панцир, І.Д. Герасимчук, В.О. Грищенко</i> Математична модель теплонасосної системи охолодження матеріалу після сушіння і термообробки	3
<i>К.В. Васильковська, М.М. Ковальов, О.О. Андрієнко</i> Технічне забезпечення ін'єкційного зрошення овочевих культур.....	14
<i>Б. І. Котов, С. П. Степаненко</i> Теоретичні дослідження руху компонентів зернового матеріалу із штучно сформованим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу	20
<i>М. Л. Заєць</i> Результати дослідження впливу рівномірності розподілу пожнивних решток на глибину сівби та урожайність сільськогосподарських культур	36
<i>В.А. Головльов, О.М. Леженкін</i> Експериментальні дослідження робочого процесу пневмотранспортера обчісаного вороху.....	46
<i>Ю.О. Ковальчук, І.О. Лісовий</i> Лазерно-плазмове зміцнення попередньо термооброблених деталей автомобільного транспорту в АПК.....	54
<i>В.О. Шейченко, І.А. Дудніков, В.В. Шевчук, В.Г. Шевчук</i> Дослідження умов різання стебел із ковзанням	61
<i>В.М. Сало, С.М. Лещенко, Д.В. Богатирьов</i> Вплив параметрів барабана для подрібнення рослинних решток на надійність протікання технологічного процесу	70
<i>В.О. Шейченко, М.І. Черновол, В.А. Вольський, Р.В. Коцюбанський</i> Дослідження впливу схеми розташування ножів котка-подрібнювача на показники якості подрібнення стебел соняшнику	78
<i>Ф.М. Ерхан, Д.А. Войнеско</i> Оценка влияния несимметричных режимов на показатели надежности распределительных систем.....	88
<i>П.Г. Лузан, Р.В. Кісільов, О.Р. Лузан, О.А. Кислун</i> Теоретичні аспекти розділення зерна на решеті інерційно-гравітаційного сепаратора	95
<i>О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, О.В. Нестеренко, Д.І. Петренко, С.М. Якименко</i> Обґрунтування конструктивної схеми пневморешітного сепаратора зерна	104

<i>О.В. Нестеренко, С.М. Леценко, О.М. Васильковський, Д.І. Петренко</i> Оцінка рівномірності розподілу та засміченості зерна при його багаторівневому введенні в пневмосепаруючий канал	111
---	-----

<i>М.І. Черновол, М.О. Свірень, В.В. Амосов</i> Моделювання процесу однозернового дозування вакуумним пневмомеханічним висівним апаратом	117
---	-----

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>А.В. Рутковський, С.І. Маркович, С.С. Михайлюта</i> Фрактографічний аналіз іонноазотованих зразків з алюмінієвих поршнів двигунів сільськогосподарської техніки	126
---	-----

<i>В.Я. Ошовський</i> Аналіз неізотермічних процесів в дегазаторах ресорбційних холодильних машин	133
--	-----

<i>Л.Г. Малай, В. С. Попеску, А. Попескул, Я.В. Валуца</i> Внедорожное транспортное средство на базе импульсно-фрикционного движителя.....	141
---	-----

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

<i>В. М. Боков, О. Ф. Сіса, І. І. Павленко</i> Витягування циліндричних деталей із не суцільного матеріалу	147
---	-----

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

<i>Ю.В.Кулешков, М.І. Черновол, М.В. Красота, Т.В. Руденко, Є.К. Солових, Р.А. Осін</i> Підвищення довговічності турбокомпресора в наслідок ремонтного впливу	169
--	-----

<i>В.К. Аветисян, Н.М. Колтаченко, В.Л. В.Л. Маніло, Д.П. Ащанулов, О.В. Сайчук, О.І. Біловод, Ю.Б. Скоряк</i> Аналіз якості структуроутворення виливків корпусних деталей з сірого чавуну	174
---	-----

<i>М.М. Студент, С.І. Маркович, В.М. Гвоздецький, Х.Р. Задорожна, І.С. Ковальчук, Ю.В. Дзьоба</i> Зносостійкість оксидних шарів сформованих методом твердого анодування (hard anodic coatings) при зміцненні деталей агропромислової техніки	182
---	-----

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Р.М. Минайленко, В.А. Резніченко, О.К. Коноплицька-Слободенюк, Л.І. Поліщук</i> Огляд методів балансування навантаження в хмарних системах	188
--	-----

В.В. Смірнов, Н.В. Смірнова, Ю.М. Пархоменко

Бездротова локальна мережа класу Smart Home на базі модулів
сплітерів-репітерів 195

В.О. Кондратець, О.М. Сербул, О.К. Дідик, А.М. Мацуї

Система автоматичного регулювання співвідношення тверде/рідке в млинах
з циркулюючим навантаженням 203

С.І. Осадчий, О.К. Дідик, О.М. Сербул, В.М. Каліч

Метод синтезу оптимального багатовимірного фільтру для виділення
регулярного сигналу на фоні випадкових перешкод 210

Є.В. Мелешко, О.О. Майданик, О.Г. Собінов, Р.М. Минайленко

Метод шифрування трафіку квадрокоптерів через аналоговий тракт впродовж
моніторингу сільськогосподарських наземних об'єктів 216

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

О.М. Дрєєв, Б.Ю. Железняк

Аналіз комп'ютерних систем візуалізації з метою алгоритмізації обґрунтування
щодо їх використання 227

CONTENT

AGROENGINEERING

<i>Boris Kotov, Roman Kalinichenko, Yuri Pantsir, Igor Gerasimchuk, Volodymyr Hryshchenko</i> Mathematical Model of Heat Pump Cooling System of Material After Drying and Heat Treatment	3
<i>Kateryna Vasylykovska, Mykola Kovalov, Olha Andriienko</i> Technical Support of Injectable Irrigation of Vegetable Crops	14
<i>Borys Kotov, Serhii Stepanenko</i> Theoretical Studies of the Motion of Grain Material Components With Artificially Formed Air Velocity Distribution in the Cross Section of the Channel	20
<i>Maksym Zayets</i> Results of the Study of the Influence of the Uniformity of the Distribution of Crop Residues on the Sowing Depth and Productivity of Industrial Crops	36
<i>Viktor Holovlov, Oleksandr Lezenkin</i> Experimental Research of the Working Process of the Pneumatic Conveyor of the Combed Heap.....	46
<i>Yuriy Kovalchuk, Ivan Lisovyi</i> Laser-plasma Strengthening of Pre-heat-treated Road Transport Details in the Agro-industrial Complex.....	54
<i>Viktor Sheichenko, Igor Dudnikov, Vitaliy Shevchuk, Viktor Shevchuk</i> Research of Conditions of Cutting of Stalks with Sliding	61
<i>Vasyl Salo, Serhii Leshchenko, Dmytro Bohatyrov</i> The Influence of the Parameters of a Chopping Rotor for Plant Residues on the Reliability of the Technological Process	70
<i>Viktor Sheichenko, Mikhail Chernovol, Volodymyr Volskyi, Rostyslav Kotsiubanskyi</i> Research of Influence of the Scheme of an Arrangement of Knives of a Cat-shredder on Indicators of Quality of Crushing of Stalks of Sunflower	78
<i>Fiodor Erhan, Dinu Voinesco</i> Assessing the Influence of Asymmetric Modes on the Reliability Indicators of Distribution Systems.....	88
<i>Petro Luzan, Ruslan Kisilyov, Olena Luzan, Oleh Kyslun</i> Theoretical Aspects of Grain Separation on an Inertial-gravity Separator Sieve	95

<i>Oleksii Vasylovskiy, Serhii Leshchenko, Oleksandr Nesterenko, Dmytro Petrenko, Serhii Iakymenko</i> Substantiation of the Constructive Scheme of the Pneumatic-grain Separator.....	104
---	-----

<i>Olexandr Nesterenko, Serhii Leshchenko, Olexiy Vasylovskiy, Dmytro Petrenko, Serhii Iakymenko</i> Estimation of Uniformity of Distribution and Clogging of Grain at its Multilevel Introduction into the Pneumo-separating Channel	111
---	-----

<i>Mykhailo Chernovol, Mykola Sviren, Volodymyr Amosov</i> Simulation of the Process of Single-grain Dosing by a Vacuum Pneumatic Mechanical Sowing Device.....	117
---	-----

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

<i>Anatoly Rutkovskiy, Sergiy Markovych, Sergiy Myhajlyta</i> Fraktografichniy Analysis of the Ion Nitrided Standards From the Aluminium Pistons of Engines of Agroindustrial Technique.....	126
--	-----

<i>Viktor Oshovskyi</i> Analysis of Non-isothermal Processes in Degassers of Resorption Refrigeration Machines	133
--	-----

<i>Leonid Malai, Victor Popescu, Angela Popescul, Iacob Valuța</i> Off-road Vehicle Based on Impulse-friction Propulsion	141
---	-----

APPLIED MECHANICS

<i>Victor Bokov, Oleh Sisa, Ivan Pavlenko</i> Drawing Cylindrical Parts From Non-Continuous.....	147
---	-----

MATERIALS SCIENCE

<i>Yuriy Kuleshkov, Mikhail Chernovol, Timofey Rudenko, Mikhail Krasota, Yevhenii Solovykh, Ruslan Osin</i> Improve the Durability of a Turbocharger as a Result of Repair Work.....	169
---	-----

<i>Viktor Avetisyan, Nadia Kolpachenko, Vadym Manilo, D. Ashchaulov, Olexandr Saichuk, Olexandra Bilovod, Yuliya Skoriak</i> Analysis of the Quality of Structure Formation of Castings of Body Parts From Gray Cast Iron	174
---	-----

<i>Mykhajlo Student, Sergiy Markovych, Volodymyr Hvozdetzskii, Khrystyna Zadorozhna, Igor Kovalchuk, Yurii Dzjoba</i> Wearproofness of Layers of Oxide of Formed by Method of Hard Anodization (Hard Anodic Coatings) at Strengthening of Details of Agroindustrial Technique.....	182
--	-----

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Roman Minailenko, Vitalii Reznichenko, Oksana Konoplitska-Slobodenyuk,

Liudmyla Polishchuk

Overview of Load Balancing Methods in Cloud Systems 188

Volodymyr Smirnov, Natalia Smirnova, Yuriy Parkhomenko

Wireless Smart Home LAN Based on Splitters-repeater Modules 195

Vasily Kondratets, Oleksandr Serbul, Oleksandr Didyk, Anatolii Matsui

System of Automatic Control for Solid/liquid Ratio in Mills with Circulating Load 203

Serhii Osadchiiy, Oleksandr Didyk, Oleksandr Serbul, Viktor Kalich

Method of Synthesis of an Optimal Multidimensional Filter for Extracting
a Regular Signal Against a Background of Random Noise 210

Yelyzaveta Meleshko, Oleksandr Maidanyk, Oleksandr Sobinov,

Roman Mynailenko

A Method of Encrypting the Traffic of Quadcopters Through an Analog
Path During Monitoring of Agricultural Ground Objects 216

COMPUTER SCIENCE

Olexandr Driev, Bohdan Zhelesnyak

Analysis of Computer Visualization Systems in Order to Algorithmize
the Rationale for their Use 227

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело
Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською (російською) мовами – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. **Постановка проблеми. *Statement of the problem***
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Analysis of recent researches and publications***
3. **Постановка завдання (мета статті). *Statement of the objective***
4. **Виклад основного матеріалу. *The main material***
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень. *Conclusions and prospects for further researches***

Схема організації матеріалу статті:

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
6. Ідентично з 2-5 російською (українською) мовою.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. *
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

Сайт збірника: <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua>

Адреса для надсилання: stat_kntu@ukr.net, serafsgm@ukr.net

ДОВІДКА ПРО АВТОРА **українською, російською та англійською мовами**

	Українською	Російською	Англійською
Прізвище, ім'я, по-батькові:			
Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:			
Посада (повна назва, без аббревіатур):			
Наукова ступінь:			
Вчене звання:			
Назва статті:			
*Спеціальність:			
Адреса для надсилання збірнику:			
Контактні телефони (бажано мобільний):			
E-mail:			
ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)			

* – 122 Комп'ютерні науки; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 208 Агроінженерія

**Конструювання, виробництво та експлуатація
сільськогосподарських машин**

Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник

Заснований у 1971 році

Випуск 51

За загальною редакцією М.І. Черновола

Відповідальний за випуск С.М. Лещенко

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво про реєстрацію № 05720-ПП-1 від 10.12.1996.
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Здано в набір 26.11.2021. Підписано до друку 29.11.2021. Формат 60x84 1/8.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman Умов. друк. арк. 30,75
Обл. вид. арк. 37,7. Наклад 300 прим. Замовлення №_0623