

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

Цимбал Богдан Михайлович

УДК 621.891

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ШНЕКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ ДЛЯ  
ВИРОБНИЦТВА ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ У КИСЛОТНИХ ТА ЛУЖНИХ  
СЕРЕДОВИЩАХ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Войтов Віктор Анатолійович,**  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
завідувач кафедри транспортних технологій і  
логістики

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Дворук Володимир Іванович,**  
Національний авіаційний університет,  
професор кафедри теоретичної та прикладної фізики;

кандидат технічних наук,  
**Борак Костянтин Вікторович,**  
Житомирський агротехнічний коледж,  
завідувач відділення механізації сільського  
господарства

Захист дисертації відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 року о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.832.03 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.М. Власовець

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** В Україні та у Європі виробництво твердого палива з рослинної сировини, яка є відновлювальним джерелом енергії, є перспективним напрямком.

Для виробництва твердого палива використовуються рослинні відходи сільськогосподарського та лісного виробництва. До таких відходів можливо віднести: соломку, лушпиння соняшнику, рису, гречки, кострицю прядильних культур, не кормові відходи елеваторного виробництва, стебла кукурудзи та соняшнику, деревинні відходи. З цієї сировини отримують тверде паливо шляхом пресування шнековим пресом. В зв'язку з тим, що рослинна сировина у своєму вмісті має значний рівень абразивності та кислотності, який призводить до корозійно-механічного зношування шнека та філь'єр екструдера, зменшення ресурсу, терміну експлуатації екструдера, а також збільшенню витрат на виробництво твердого палива, тому підвищення зносостійкості екструдерів для виробництва твердого палива з рослинної сировини є актуальним завданням.

Фахівці по проектуванню та експлуатації техніки, при розробці нового обладнання та його експлуатації, повинні знати швидкість зношування та силу тертя сталей та чавунів в абразивному та корозійному (кислотному) середовищі, що дозволить зробити правильний вибір матеріалу робочих органів обладнання, яке контактує з агресивним середовищем під час виробництва паливних брикетів та пеллетів з рослинної біомаси.

**Зв'язок роботи з науковими матеріалами, планами, темами.** Матеріали дисертації є узагальненням досліджень, що виконані у межах: закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09.2011р. № 3715-VI; п.2 постанови Кабінету Міністрів України від 17.05.2012 р. № 397 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012-2016 рр.»; «Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2016 рр.», затвердженою постановою Кабінета Міністрів України №243, від 1 березня 2010 р. планом науково-дослідних робіт навчально-наукового інституту технічного сервісу ХНТУСГ ім. П. Василенка «Розробка біоолів на базі рослинних олій олеїнового типу та дослідження процесів, які відбуваються в мастильному шарі з урахуванням властивостей матеріалів трібосистем», ДР 0110U001958.

**Мета та завдання досліджень.** Метою роботи є підвищення зносостійкості робочих органів шнекових екструдерів, які працюють на різних типах біомаси за рахунок введення лужної присадки в сировину перед пресуванням.

Відповідно до мети в роботі вирішувалися наступні завдання.

1. Розробити модель трібологічної системи, яка працює в умовах абразивно-корозійного зношування з урахуванням абразивно-корозійного середовища.
2. Дослідити корозійні та абразивні властивості різних типів біомаси та оцінити їх вплив на знос та втрати на тертя трібосистем.
3. Обґрунтувати вибір матеріалів для шнека і філь'єр екструдера та експериментальним шляхом оцінити їх зносостійкість.

4. Отримати критерії подібності між модельними та натурними трібосистемами, фізично змодельовати процеси тертя і зношування трібосистем екструдерів EB-350 і EB-350M та визначити їх ресурс.

5. Розробити практичні рекомендації щодо вибору матеріалів в трібосистемі екструдера, впровадити їх у виробництво і оцінити ефективність використання.

**Об'єкт досліджень** – процеси тертя і зношування в трібосистемах шнекових екструдерів, які працюють в умовах кислотного та абразивного агресивного середовища.

**Предмет досліджень** – підвищення зносостійкості шнекових екструдерів, за рахунок введення лужних присадок в сировину перед пресуванням.

**Методи дослідження:** Теоретичні дослідження базувалися на системному аналізі робочого середовища, механіці контактної взаємодії поверхонь тертя, динаміки незворотних фізико-хімічних процесів в трібологічних системах. Експериментальні дослідження базувалися на теорії планування експерименту і математичної статистики. Було використано системний аналіз, методіку фізичного моделювання процесів тертя та зношування і математичної статистики, аналіз тріботехнічних процесів робочих поверхонь трібосистем за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу. Лабораторні дослідження проводили за методами і методиками відповідно до стандартів і нормативно - технічної документації. Обробка результатів експериментів виконувалася із застосуванням стандартних комп'ютерних програм, нових підходів, розроблених на базі математичної статистики.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше отримані залежності швидкості зношування трібосистем при одночасній дії абразивного та корозійного зношування в умовах дії різних середовищ. Встановлено, рейтинг впливу факторів на процес зношування, до яких в порядку зменшення, відносяться абразивність, активна кислотність середовища та навантаження. З урахуванням отриманого рейтингу виконано обґрунтування сумісних матеріалів в трібосистемах екструдерів, які дозволяють підвищити їх ресурс та зменшити втрати на тертя.

2. Отримано подальший розвиток фізичне моделювання швидкості зношування та втрат на тертя в трібосистемах екструдерів, яке на відміну від відомих враховує взаємодію абразивного, корозійного та механічного зношування. Отримані критерії подібності дозволили розрахувати швидкість зношування та силу тертя натурних трібосистем за результатами лабораторних досліджень модельних трібосистем.

3. Встановлено оптимальний рівень активності кислотності середовища для різних видів біомаси, що пресується, який дозволяє зменшити швидкість зношування та витрати на тертя трібосистем екструдерів за рахунок введення лужних присадок в біомасу перед пресуванням.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені практичні рекомендації щодо вибору марок сталей та чавунів в конструкцію екструдерів які працюють в абразивному та корозійному (кислотному) середовищі. Використання рекомендацій на етапі проектування дозволить зробити ефективний вибір матеріалів робочих органів обладнання, які контактують з

продуктом під час виробництва паливних брикетів та пеллетів з рослинної біомаси.

Розроблено новий спосіб отримання твердого біопалива з рослинної сировини (патент на корисну модель UA 109886). В основу способу покладено задачу отримання твердого палива з рослинної сировини з додаванням присадки, яка дозволяє уникнути корозійно-механічного зношування екструдера та підвищити його ресурс.

Розроблено рекомендації для експлуатації екструдерів з використанням різних типів сировини зі слаболужним середовищем, близькому до нейтрального.

Практичні рекомендації впроваджені на підприємстві по виробництву екструдерів ТОВ "ЧеркасиЕлеваторМаш" та паливних брикетів на ФОП «Махно С.М.», Волинська обл., Луцький район, с. Липини.

Теоретичні та експериментальні результати дисертаційних досліджень впроваджені у навчальний процес Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка при викладанні дисципліни «Тертя, знос, мащення деталей машин».

Виконана оцінка економічного ефекту від впровадження розробленого способу на виробництві. Річний економічний ефект при використанні присадки, гідроксиду натрію та трібосистем зі сталі 95X18 і чавуну ЧХ32, при пресуванні соломи ячменю складе 357808,27 грн./рік, деревинних залишків 317345,15 грн./рік та лузги насіння соняшнику 494252,95 грн./рік на один екструдер EB-350. На один екструдер - EB-350M при пресуванні соломи ячменю економічний ефект складе 140369,54 грн./рік, деревинних залишків 206414,85 грн./рік та лузги насіння соняшнику 477647,22 грн./рік, при переробці до 1330 тонн сировини на рік.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи отримані здобувачем особисто. У наукових статтях, які виконані у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: розроблено методику та визначено активну та загальну кислотність сировини для виробництва паливних брикетів та пеллетів з рослинної біомаси [1]; розроблено методику та визначено вміст мінеральних (абразивних) домішок, які контактують з робочими органами екструдера [3]; розроблено математичну модель, яка описує трібологічні характеристики сумісних матеріалів робочих органів екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах [4]; проведено експериментальну оцінку негативного впливу факторів на швидкість зношування, силу тертя та сумісність матеріалів робочих деталей екструдера для виробництва паливних брикетів з рослинної сировини [5]; досліджено мікротвердість, хімічний склад, шорсткість та процеси зношування на робочих поверхнях тертя модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M [6]; досліджено поверхні тертя трібосистем, які в своєму складі мають сталі та чавуни в залежності від рівня активної кислотності та абразивності та сформульована гіпотеза про механізм їх зношування [7]; визначено швидкості зношування натурних трібосистем EB-350 та EB-350M та спрогнозовано їх ресурс для швидкості зношування та сили тертя, було отримано залежності параметрів натурних трібосистем від параметрів модельних [10].

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи доповідались та обговорювались на: Міжнародній науковій сесії «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (Харків, ХНТУСГ, 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу. Транспортні технології» (Харків, ХНТУСГ, 2014 р.); ІХ Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кіровоград, КНТУ, 2015 р.); Х Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кіровоград, КНТУ, 2016 р.; XII-й міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Перспективна техніка і технології – 2016» (Миколаїв, МНАУ, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції-форумі «Розумна агротехніка для ефективного землеробства» (Харків, ХНТУСГ, 2016).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць (1 одноосібна), з них 7 статей у фахових виданнях, 1 – у закордонному виданні, 3 публікації матеріалів і тез конференцій, а також отримано один патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який налічує 169 найменувань, 5 додатків. Робота викладена на 176 сторінках, з них - 157 основного тексту, на яких розміщено 45 рисунків і 42 таблиці.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**Вступ** до дисертаційної роботи містить такі положення: актуальність теми; зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; мету та завдання досліджень; наукову новизну одержаних результатів; практичне значення одержаних результатів; особистий внесок здобувача; інформацію про апробації та публікації; відомості про структуру роботи.

**У першому розділі** проведено аналіз робіт, які присвячені вивченню механізмів зношування та вирішенню проблеми швидкого зношування трібосистем шнекових пресів або екструдерів, таких вчених, як Стамбурский Е.А., Бейль А.И., Дворук В.І., Карливан В.П., Беспалов Ю.А., Ястреба С.П., Гончар В.А., Деркач В.В., Матвійшин П.В., Васильків В.В., Радик Д.Л., Луцак Д.Л., Криль Я.А., Присяжнюк П.М., Беркович И.И. Основним здобутком вчених стало визначення факторів, які впливають на зношування, створення класифікації основних видів та чинників зношування, визначення негативного впливу зносу на зміну основних характеристик роботи обладнання.

Стамбурский Е.А., Бейль А.И., Карливан В.П., Беспалов Ю.А. дослідним шляхом встановили, що найбільшою зношувальною активністю володіє фенолоформальдегідна смола наповнена деревним борошном. Продукти, які утворюються під час переробки сировини вступають в контакт з металеву поверхню робочих органів.

Для підвищення зносостійкості витків нагнітаючого гвинта преса-формувача для переробки біологічних відходів у паливні брикети, пелети,

гранули Карманов В.В., Балахонов В.Д., Борзаков А.Е. провели аналіз по підбору матеріалів, відповідним технічним характеристикам по зносостійкості.

На основі виконаного аналізу літературних джерел у першому розділі сформульована мета та завдання дослідження.

**У другому розділі** роботи приведений методологічний підхід, який було використано при розробці методів досліджень та оцінки впливу біомаси (деревинних залишків, лузги соняшнику та ячмінної соломи), на основні трібосистеми шнекового преса (екструдера) EB-350 для виробництва паливних брикетів Pini-Kau, та процесів абразивно-корозійного зношування в різних середовищах в порівнянні з природним - абразивно-кислим.

В відповідності до поставлених задач, визначена структура досліджень, яка включає в себе три етапи. На першому етапі було обрано базове робоче середовище - природне кисле, нейтральне або лужне та абразивне та вирішувалась оптимізаційна задача стосовно створення певного рівня активної кислотності. Під час другого етапу виконані лабораторні дослідження модельних трібосистем, результати яких є початком наступного, третього етапу розробок. Третій етап - за допомогою фізичного моделювання та критеріального підходу надано оцінку ресурсу та втрат на тертя натурних трібосистем екструдера EB-350 у експлуатації і розроблено рекомендації виробникам цих машин та паливних брикетів.

Сплановано трьохфакторний експеримент для вирішення раціональної задачі визначення рівня кислотності та вибору матеріалів в залежності від легуючих компонентів тріботехнічних робочих рідин з лужним середовищем.

У процесі експериментальних досліджень використовувалися три кінематичні схеми випробувань «кільце-кільце», що реалізується на машині тертя УМТ-1. Геометричні параметри трібоелементів для випробування за кінематичною схемою відповідають технічній документації до машини тертя УМТ-1.

**Третій розділ** роботи описує вирішення основних завдань досліджень. Перша задача полягає в отриманні математичної моделі трібологічних характеристик сумісних матеріалів робочих органів екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах. Друга задача в полягає в визначенні та підборі середовища для виробництва паливних брикетів, в яких повільно протікає корозійне та абразивне зношування. В основу визначення та вибору лягли фізико-хімічні властивості рослинної сировини (біомаси) для виробництва паливних брикетів. Вирішенням третьої задачі є дослідження тріботехнічних характеристик слаболужного та абразивного середовища рослинної сировини в порівнянні з слабокислим (базовим) та сильнолужним. Під час лабораторних досліджень були визначені швидкість зношування та втрати на тертя модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350М при застосуванні сировини з кислим або лужним середовищем.

Під час експлуатації екструдерів відбувається складний процес корозійно-абразивного зношування. При цьому загальна швидкість зношування буде залежати від величини шорсткості, навантаження та швидкості ковзання.

Загальна залежність швидкості зношування від перерахованих факторів буде мати вигляд:

$$I_{\text{заг.}} = I_{\text{сер.}} + I_{\text{абр.}} + I_{\text{шор.}}, \text{ мкм/год.}, \quad (1)$$

де  $I_{\text{сер.}}$  – швидкість зношування під дією середовища, мкм/год.;

$I_{\text{абр.}}$  – швидкість зношування під дією абразиву, мкм/год.;

$I_{\text{шор.}}$  – швидкість зношування під дією шорсткості, навантаження та швидкості ковзання, мкм/год.

Рослинна сировина з якої виробляються паливні брикети має певний рівень активної кислотності, рН та активної лужності рОН. З урахуванням параметра, який враховує структуру сполучених матеріалів у трібосистемі та їх сумісність між собою, -  $\alpha_{\text{вт}}$ , 1/м, швидкість зношування під дією середовища буде мати вид:

$$I_{\text{сер.}} = S \cdot (2\text{pH} - 14)^2, \text{ мкм/год.} \quad (2)$$

де  $S$  - коефіцієнт який враховує сумісність матеріалів має вигляд:

$$S = K_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \text{ мкм/год.} \quad (3)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт пропорційності для середовища, мкм/год.;

$\alpha_1$  – сумісність базових матеріалів у трібосистемі, 1/м;

$\alpha_2$  – сумісність підібраних матеріалів у трібосистемі, 1/м.

Рослинна сировина з якої виробляються паливні брикети має певний вміст абразивних частинок. Коефіцієнт форми абразивної частинки  $K_a$  та коефіцієнт твердості абразивної частинки  $K_m$  розраховуються за формулами, запропонованими М.М. Тененбуагом.

Негативний вплив абразиву на швидкість зношування оцінюється за допомогою виразу:

$$I_{\text{абр.}} = K_2 \cdot K_a \cdot K_T \cdot A_{\text{абр.}}, \text{ мкм/год.} \quad (4)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт пропорційності для абразивного зношування, мкм<sup>4</sup>/кг·с;

$A_{\text{абр.}}$  – абразивність сировини, кг/м<sup>3</sup>.

Швидкість зношування в залежності від шорсткості  $R_a$ , навантаження  $N$  та швидкості ковзання  $\vartheta$  розраховується за формулою:

$$I_{\text{шор.}} = K_{\text{шор.}} \cdot \vartheta \cdot N, \text{ мкм/год.} \quad (5)$$

де  $K_{\text{шор.}}$  - коефіцієнт шорсткості, який враховує шорсткість поверхонь матеріалу, розраховується за формулою:

$$K_{\text{шор.}} = K_3 \cdot \frac{Ra_n}{Ra_b}, \quad (6)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт пропорційності для шорсткості трібоелементів, год.<sup>2</sup>/мкм·кг;

$Ra_b$  – шорсткість базового трібоелемента, мкм;

$Ra_n$  – шорсткість підбраного трібоелемента, мкм.

Загальна швидкість зношування прийме вид:

$$I_{\text{заг.}} = S \cdot (2\text{pH} - 14)^2 + K_2 \cdot K_a \cdot K_T \cdot A_{\text{абр.}} + K_{\text{шор.}} \cdot \vartheta \cdot N, \text{ мкм/год.} \quad (7)$$

На підставі отриманого виразу (7) проведено моделювання зміни швидкості зношування трібосистем від різних вхідних факторів, рис. 1.

Аналіз отриманих теоретичних залежностей, які представлені на рис. 1, дозволяє зробити висновок, що існує оптимальне значення активної



кислотності рН 7,4, яке забезпечує мінімальні значення швидкості зношування. При цьому рейтинг трібосистем від мінімального значення швидкості зношування до максимального можливо представити в наступному вигляді: сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32; сталь 95X18 та чавун ЧХ22H2; сталь 40X та чавун ЧХ32; сталь 95X18 та чавун ЧХ28; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ22H2; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ28; сталь 40X та чавун ЧХ22H2; сталь 40X та чавун ЧХ28.

При зменшенні рН від оптимального (кислотне середовище), інтенсивність зношування збільшується в 1,8 разів.

Аналогічний ефект збільшення швидкості зношування характерний для рН > 7,4, лужне середовище. Необхідно відмітити, що лужне середовище підвищує швидкість зношування в 3,4 рази, на відміну рН 7,4, рис. 1, а.

Аналіз теоретичних залежностей представлених на рис. 1, б дозволяє зробити висновок, що наявність абразиву в робочому середовищі пропорційно збільшує швидкість зношування. Рейтинг трібосистем по швидкості зношування в присутності абразиву при рН 8 відповідає наведеному вище. Необхідно відмітити, що збільшення вмісту абразиву від 0 % до 10 % збільшує швидкість зношування у середньому в 4 рази. Відповідно, ступінь впливу абразиву на швидкість зношування знаходиться першому місці.

Аналіз ступеня впливу навантаження, рис. 1, в, дозволяє стверджувати про монотонне збільшенні швидкості зношування при збільшенні даного фактору. Збільшення навантаження від  $N=800$  Н до  $N=1200$  Н призводить до збільшення швидкості зношування в 3 рази.

Наведені теоретичні дослідження по розробленій математичній моделі дозволяють зробити висновок про вплив факторів на процес зношування трібосистем. Найбільш значущим фактором є абразивність, потім в порядку зменшення впливу кислотність середовища та навантаження.

Виконана експериментальна оцінка адекватності розроблених математичних моделей за результатами експерименту, а також ступінь впливу вхідних в математичні моделі факторів на результати моделювання. За допомогою критерію Фішера встановлено, що результати моделювання швидкості зношування адекватні результатам експерименту з довірливою ймовірністю 0,9. Розрахована похибка моделювання по кожній серії експериментів, показано, що при моделюванні швидкості зношування похибка не перевищує 15,98%, що можна визнати задовільним при дослідженні процесів тертя та зношування.

Побудовані поверхні відгуку швидкості зношування та сили тертя трібосистеми сталь 95X18 та чавун ЧХ32 від впливу рівня активної кислотності, рН, абразивності та навантаження на швидкість зношування, рис. 2.

Встановлено, що рослинна сировина для виробництва твердого палива має слабокисле середовище та активну кислотність 5 рН. При таких умовах рейтинг трібосистем по швидкості зношування та силі тертя в бік збільшення має вид: трібосистема сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32; сталь 95X18 та чавун ЧХ22H2 і на останньому місці сталь 40X та чавун ЧХ28, що підтверджує теоретичні дослідження.

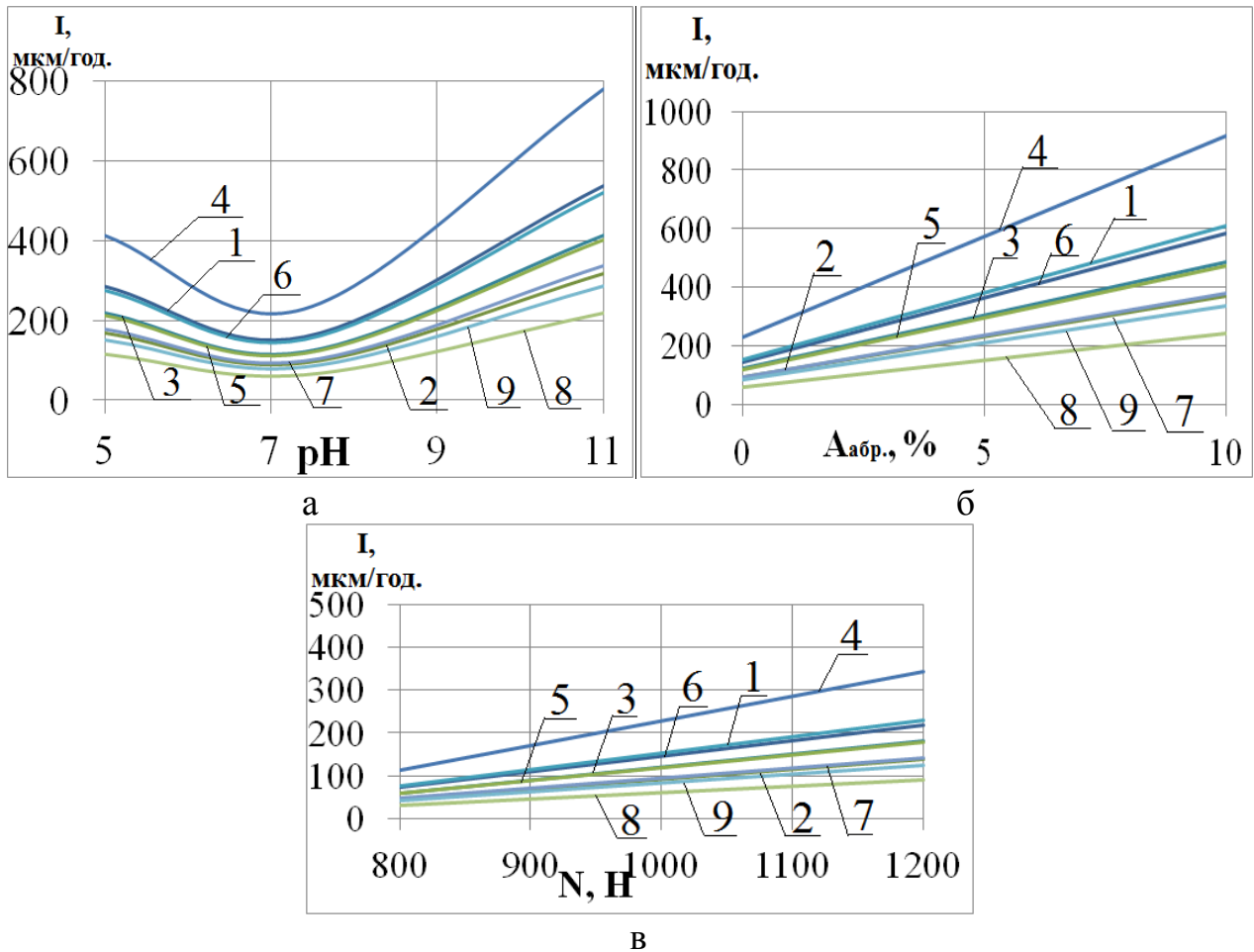


Рис. 1. Теоретичні залежності швидкості зношування трібосистем від рівня активної кислотності при постійній абразивності 0 % та навантаженню 1000 Н (а), залежності швидкості зношування трібосистем від абразивності при постійній активній кислотності рН 7,4 та навантаженню 1000 Н (б) та залежності швидкості зношування трібосистем від навантаження при постійній активній кислотності рН 8 та абразивності 0% (в):

1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ22Н2; 4 - сталь 40Х та чавун ЧХ28; 5 - сталь 95Х18 та чавун ЧХ28; 6 - сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ28; 7 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 8 - сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 9 - сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

При додаванні до сировини луѓи - гідроксиду натрію до рН 7,4, відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування. Рейтинг трібосистем залишається без змін. Найменше значення сили тертя, при рН 8 має трібосистема сталь 95Х18 та чавун ЧХ32.

При подальшому додаванні луѓи, створюється сильнолужне середовище, рН 11, та відбувається зворотний процес, при якому зростає швидкість зношування та сила тертя. При таких умовах рейтинг трібосистем по швидкості зношування та силі тертя залишається без змін. При рН 11 найменше значення швидкості зношування має трібосистема сталь 95Х18 та чавун ЧХ32.

Встановлено, що найменша швидкість зношування та сила тертя притаманні слаболужному середовищі, близькому до нейтрального.

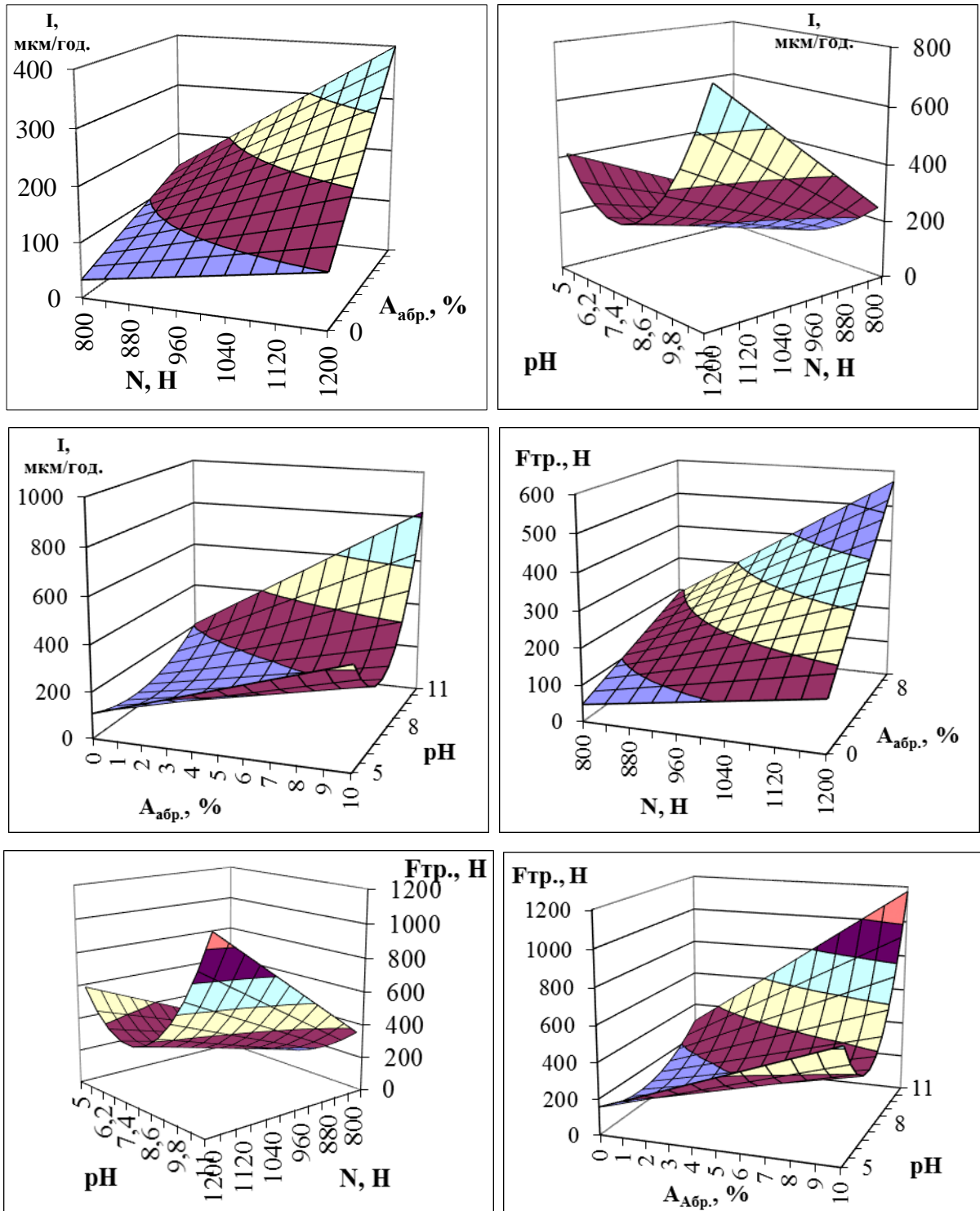


Рис. 2. Поверхні відгуку швидкості зношування та сили тертя трібосистеми деталей зі сталі 95Х18 та чавуна ЧХ32

**В четвертому розділі** за допомогою методики фізичного моделювання досліджено вплив рівня активної кислотності, абразивності рослинної сировини, з якої виробляються паливні брикети та навантаження на роботу трібосистеми. Визначено тріботехнічні властивості шнекового екструдера EB-350 та EB-350M.

Отримані критерії подібності між модельними та натурними трібосистемами:

- критерій швидкості зношування:

$$\pi_I = \frac{I \cdot A_{\text{абр.}}^{1/6} \cdot Q^{1/6} \cdot K_{\phi}^{1/3}}{N^{1/3} \cdot \vartheta^{1/3} \cdot \alpha_{\text{вТ}}}, \quad (8)$$

- критерій сили тертя:

$$\pi_{F_{\text{тр.}}} = \frac{F_{\text{тр.}} \cdot K_{\phi}^{2/3}}{A_{\text{абр.}}^{1/6} \cdot Q^{1/6} \cdot N^{2/3} \cdot \vartheta^{2/3}}, \quad (9)$$

де  $Q$  - кислотність сировини чи продукту, кг/м<sup>3</sup>;

$K_{\phi}$  - масштабний фактор пари тертя, 1/м.

Згідно з теорії подібності та математичного моделювання у подібних явищ спостерігається рівність критеріїв у моделі та природи:

$$(\pi_i)_n = (\pi_i)_m, \quad (10)$$

де « $n$ » та « $m$ » індекси природи та моделі.

Тоді критерії подібності приймуть вид:

- для критерію швидкості зношування:

$$\frac{I_m \cdot A_{\text{абр.м}}^{1/6} \cdot Q_m^{1/6} \cdot K_{\phi м}^{1/3}}{N_m^{1/3} \cdot \nu_m^{1/3} \cdot \alpha_{\text{вТм}}} = \frac{I_n \cdot A_{\text{абр.н}}^{1/6} \cdot Q_n^{1/6} \cdot K_{\phi н}^{1/3}}{N_n^{1/3} \cdot \nu_n^{1/3} \cdot \alpha_{\text{вТн}}}, \quad (11)$$

- для критерію сили тертя:

$$\frac{F_{\text{тер.м}} \cdot K_{\phi м}^{2/3}}{N_m^{2/3} \cdot \nu_m^{2/3} \cdot Q_m^{1/6} \cdot A_{\text{абр.м}}^{1/6}} = \frac{F_{\text{тер.н}} \cdot K_{\phi н}^{2/3}}{N_n^{2/3} \cdot \nu_n^{2/3} \cdot Q_n^{1/6} \cdot A_{\text{абр.н}}^{1/6}}. \quad (12)$$

Для того, щоб розрахувати швидкість зношування та силу тертя натурних трібосистем за результатами лабораторних досліджень їх зменшених моделей, було застосовано критеріальний підхід та отримані вирази:

- для швидкості зношування природи:

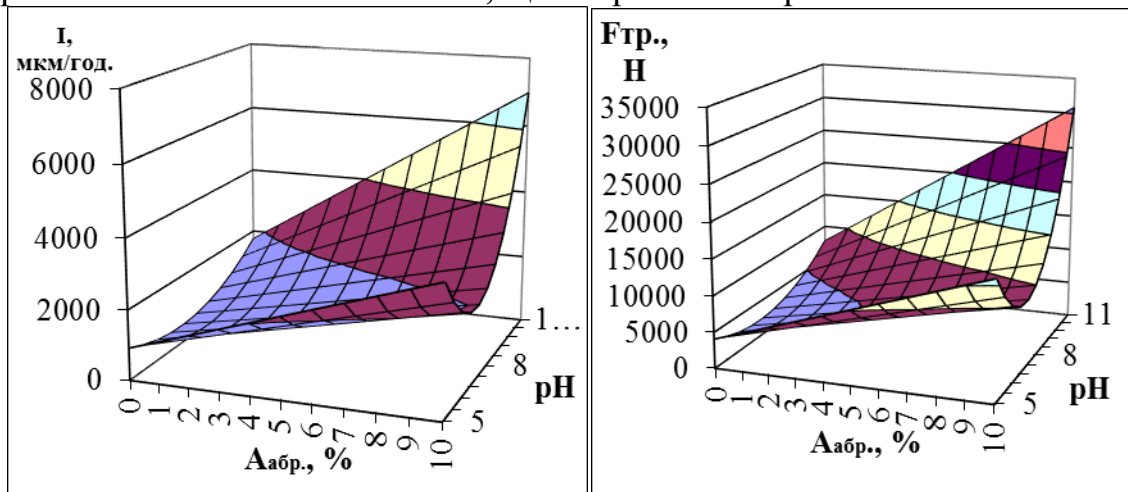
$$I_n = I_m \left( \frac{N_n}{N_m} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\nu_n}{\nu_m} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{K_{\phi м}}{K_{\phi н}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\alpha_{\text{вТн}}}{\alpha_{\text{вТм}}} \right) \cdot \left( \frac{A_{\text{абр.м}}}{A_{\text{абр.н}}} \right)^{1/6} \cdot \left( \frac{Q_m}{Q_n} \right)^{1/6} \quad (13)$$

- для сили тертя природи:

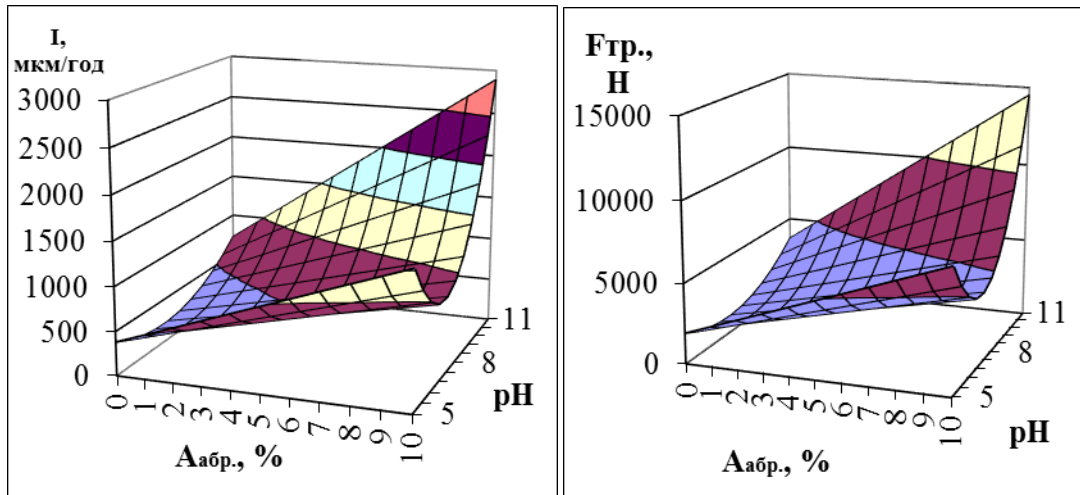
$$F_n = F_{\text{тр.м}} \left( \frac{N_n}{N_m} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{\nu_n}{\nu_m} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{K_{\phi м}}{K_{\phi н}} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{A_{\text{абр.н}}}{A_{\text{абр.м}}} \right)^{1/6} \cdot \left( \frac{Q_n}{Q_m} \right)^{1/6} \quad (14)$$

На підставі застосування критеріальних рівнянь та лабораторних досліджень було отримано залежності сили тертя та швидкості зношування

натурних трибосистем екструдерів EB-350 та EB-350M для виробництва паливних брикетів при використанні різних типів робочого середовища та матеріалів з яких вони виготовлені, що зображено на рис. 3.

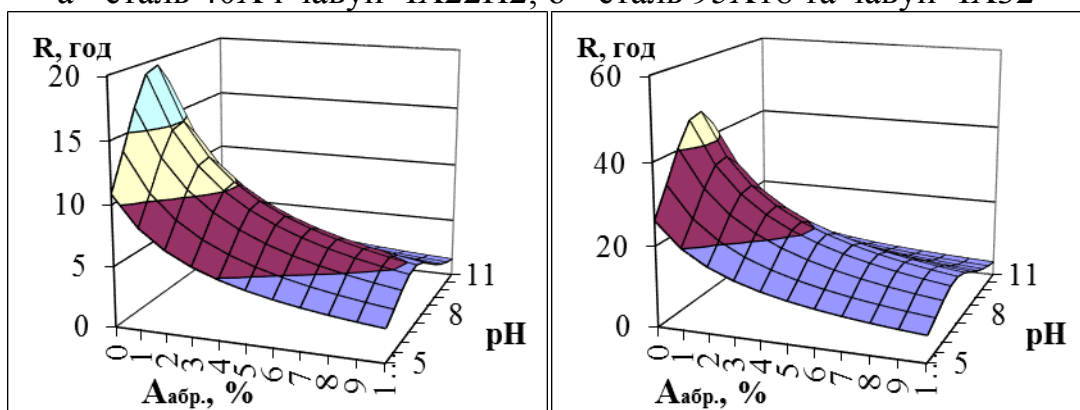


а



б

Рис. 3. Розрахункові значення швидкості зношування та сили тертя натурної трибосистеми екструдера EB-350, «хвостовик - фільтри №4»: а - сталь 40X і чавун ЧХ22Н2; б - сталь 95X18 та чавун ЧХ32



а

б

Рис. 4. Розрахункові значення ресурсу натурної трибосистеми екструдера EB-350, «хвостовик - фільтри №4»:

а - сталь 40X і чавун ЧХ22Н2; б - сталь 95X18 та чавун ЧХ32

Було встановлено, що при збільшенні рівня рН від 5 до 7,4 відбувається зменшення швидкості зношування та сили тертя та при подальшому збільшенні

$pH$  від 7,4 до 11 відбувається зворотній процес, швидкість зношування та сила тертя стрімко зростають.

Використання слаболужного робочого середовища  $pH$  7,4 призводить до збільшення ресурсу екструдера ЕВ-350 при пресуванні соломи в 1,41 рази, деревинних залишків – 2,33 рази, лузги насіння соняшнику в 13,16 рази, прілої лузги в 10,23 рази. При зміні матеріалів екструдера на сталь 95Х18 та чавун ЧХ32 відбувається збільшення ресурсу екструдера ЕВ-350 при пресуванні соломи в 2,76 рази, деревинних залишків – 4,56 рази, лузги насіння соняшнику в 25,76 рази, прілої лузги в 20,02 рази, що зображено на рис. 4. Збільшення абразивності помітно зменшує ресурс екструдера.

У п'ятому розділі було досліджено робочі поверхні тертя трібосистем, які змінюються під впливом механохімічних процесів.

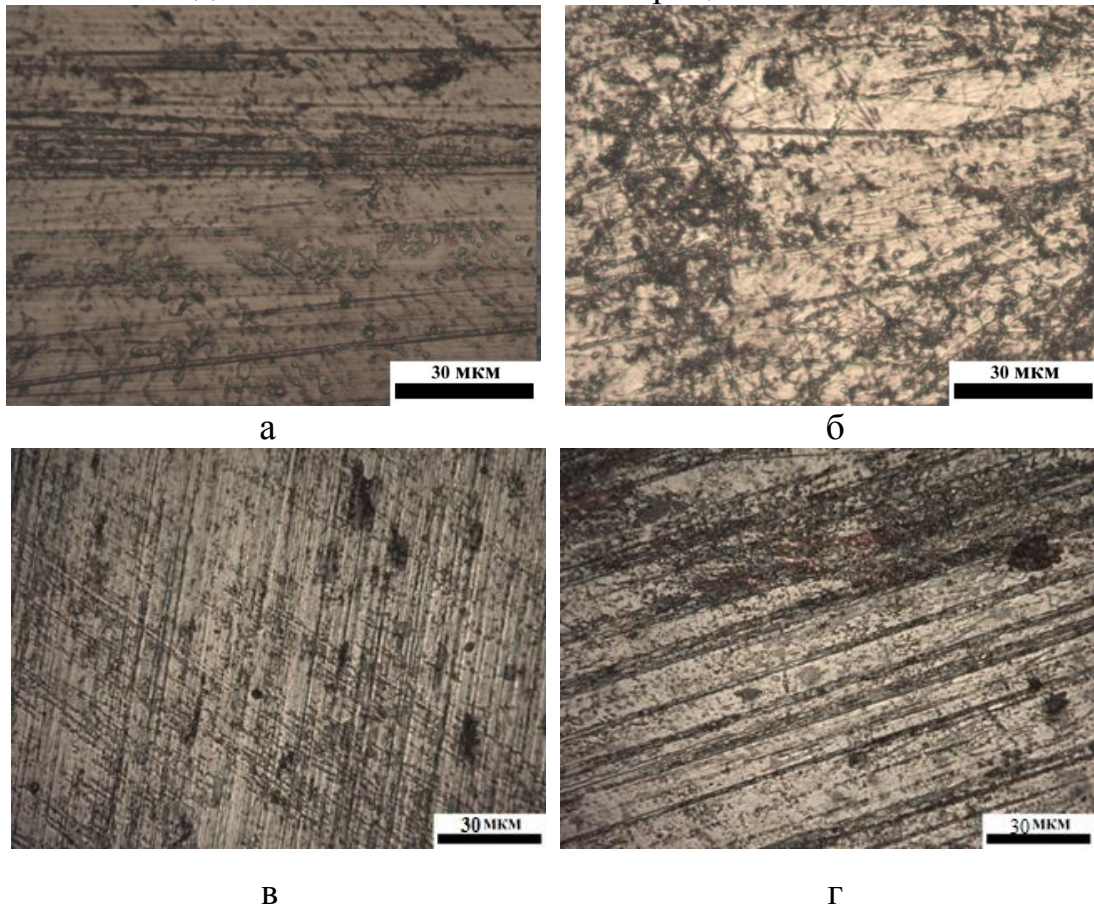


Рис. 5. Мікрофотографії поверхонь тертя трібоелементів (х600):

- а) сталь 95Х18 в слаболужному середовищі  $pH$  5 і 0% абразиву;
- б) чавун ЧХ32 в слаболужному середовищі  $pH$  5 і 0% абразиву;
- в) сталь 95Х18 в слаболужному середовищі  $pH$  5 і 10% абразиву;
- г) чавун ЧХ32 в слаболужному середовищі  $pH$  5 і 10% абразиву

Приведена оцінка впливу робочого середовища (активної кислотності  $pH$  та абразивності) на поверхні тертя трібосистем. Було досліджено наявність продуктів корозії та механічних дефектів на робочих поверхнях тертя, які утворюються після абразивно-корозійного зношування. Були проведені лабораторні дослідження механохімічних процесів на поверхнях тертя модельних трібосистем екструдера ЕВ-350.

Випробування різних варіантів трібосистем (саль 40Х і чавун ЧХ22Н2 та сталь 95Х18 та чавун ЧХ32) показали, що на поверхнях тертя при використанні

слабокислою середовищі,  $pH$  5, без абразиву спостерігається точкова корозія, яка характерна для пасивних металів і сплавів і кислого середовища, при цьому утворюються точкові язви, що зображено на рис 5, а та б.

Зародження язви відбувається в місцях дефектів пасивної плівки (подряпини, розриви) або її слабкі місця, в зв'язку з неоднорідністю сплаву. Зростає точкова корозія в зв'язку з активним розчиненням крихкої оксидної плівки. На поверхні сталі 95X18 рис. 5, а, спостерігається точкова корозія. Така тенденція характерна для поверхні тертя чавуну ЧХ32. Вона має дефекти, язви від корозійних процесів. Наявність абразиву призводить до збільшення шорсткості і в зв'язку з наявністю дефектів підвищується гетерогенність поверхні, що призводить до збільшення схильності до точкової корозії і загальної корозії в цілому.

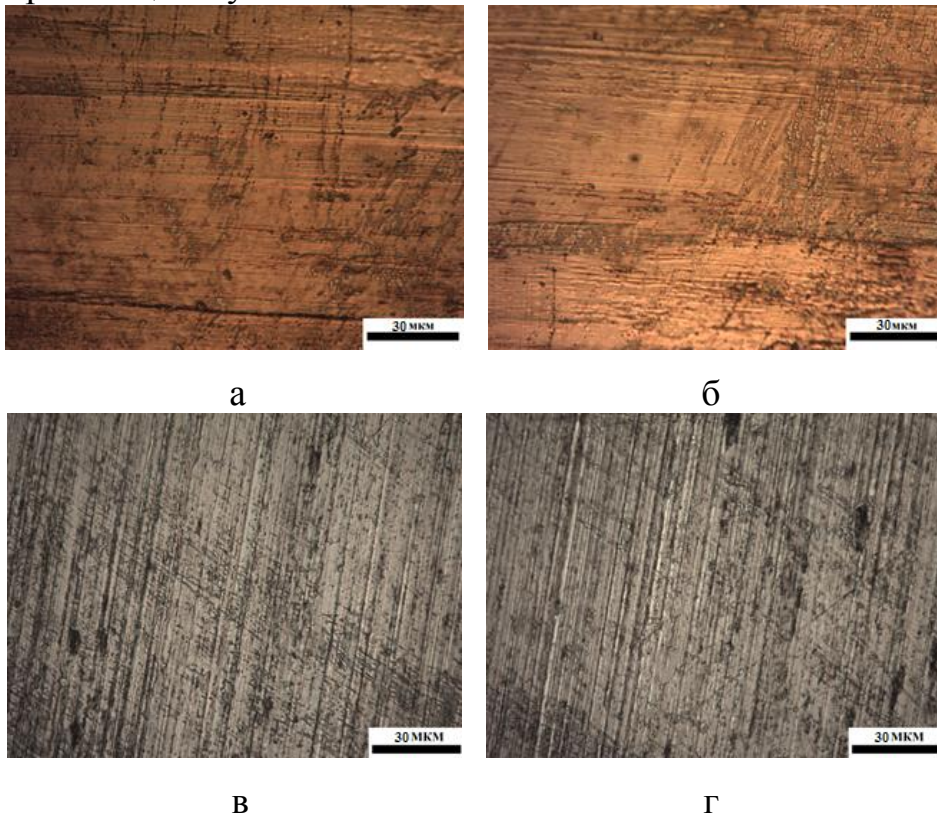


Рис. 6. Мікрофотографії поверхонь тертя трибоелементів (х600):  
 а) сталь 95X18 в слаболужному середовищі  $pH$  8 і 0% абразиву;  
 б) чавун ЧХ32 в слаболужному середовищі  $pH$  8 і 0% абразиву;  
 в) сталь 95X18 в слаболужному середовищі  $pH$  8 і 10% абразиву;  
 г) чавун ЧХ32 в слаболужному середовищі  $pH$  8 і 10% абразиву

У слаболужному середовищі, при  $pH$  8, поверхня елементів трибосистем менш вражена корозією ніж, в слабокислому середовищі, що зображено на рис. 6.

На зразках, які випробовувалися без абразиву спостерігається гомогенна поверхню з наявністю слідів припрацювання і утворення однорідної, не крихкої захисної плівки, рис. 6, а. та б, б. Наявність абразиву призводить до збільшення шорсткості і в зв'язку з наявністю дефектів підвищується гетерогенність поверхні, що зображено на рис 6, в. та рис. 6, г.

Найбільш вражені гетерогенні поверхні точкової корозією спостерігаються при рівні активної кислотності  $pH$  11. Поверхня сталі 95X18 і

чавуну ЧХ32 вражена корозією і дією абразивних частинок. Наявність абразиву призводить до збільшення шорсткості і в зв'язку з наявністю дефектів підвищується гетерогенність поверхні, збільшується схильність до точкової корозії і загальної.

Найменше значення шорсткості робочої поверхні тертя має підібрана сталь 95Х18 та чавун ЧХ32, ніж базова сталь 40Х і чавун ЧХ22Н2, що представлено на рис. 7.

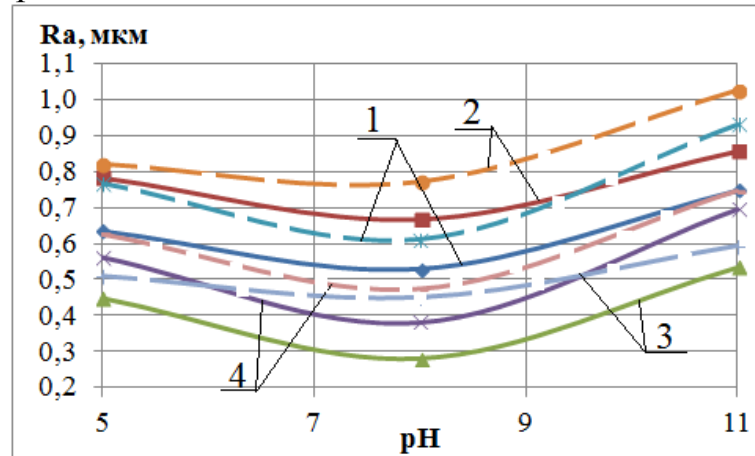


Рис. 7. Залежності шорсткості робочих поверхонь тертя зразків модельних трібосистем екструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М від рівня активної кислотності: \_\_\_\_\_ без абразиву, - - - - - з абразивом 10 % в масі; 1 – сталь 40 Х; 2 – чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 95Х18; 4 – чавун ЧХ32

Використовуючи метод мікрорентгеноспектрального аналізу, виконали розрахунок та оцінку формування захисних структур (окисних плівок) та подряпин, які накопичують присадку при роботі обладнання в різних середовищах. В залежності від середовища випробувань змінюється товщина захисних вторинних структур та глибина подряпин, які приведені на рис. 8.

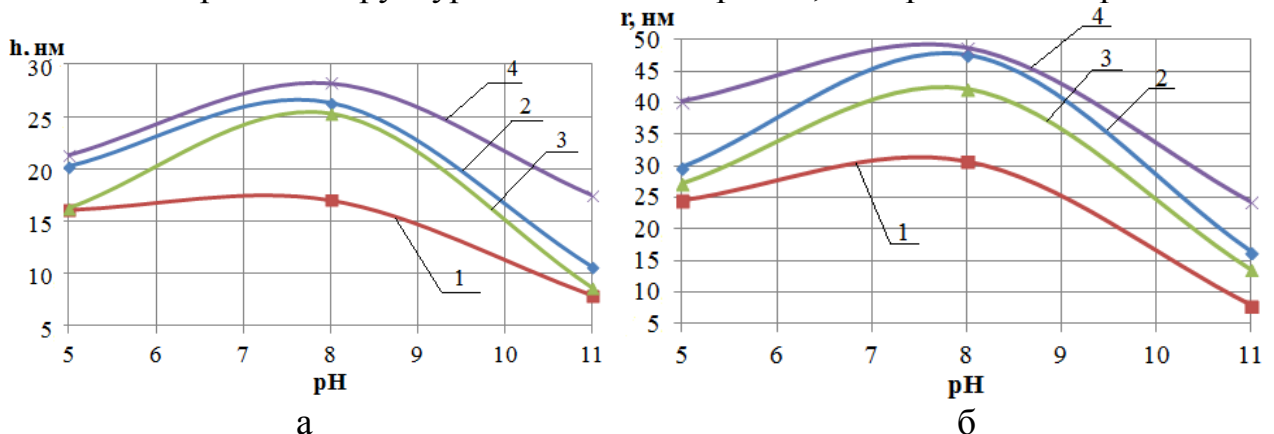


Рис. 8. Залежності товщини захисних плівок  $h$  та глибини подряпин  $r$  поверхонь тертя зразків модельних трібосистем екструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М від рівня активної кислотності з вмістом абразиву 10 % в масі:

а – від товщини захисних плівок  $h$ ; б - глибини подряпин  $r$ ;

1 – сталь 40 Х; 2 – сталь 95Х18; 3 – чавун ЧХ22Н2; 4 – чавун ЧХ32

Для зменшення швидкості зношування, сили тертя і збільшення ресурсу деталей екструдера для виробництва паливних брикетів, рекомендується контролювати якість вхідної сировини. Основними показниками якості



рослинної сировини, які впливають на абразивно-корозійне зношування, є процентний вміст мінеральних домішок і рівень активної кислотності, які можливо визначити за розробленими методиками. Для зменшення абразивності сировини, необхідно виконувати сепарацію.

Розкислення сировини дозволяє уникнути корозійно-механічне зношування екструдера за рахунок додавання гідроксиду натрію. Отримана таким чином тверде біопаливо має нейтральну кислотність і тим самим не викликає корозійно-механічне зношування екструдера, що підвищує термін їх служби.

Розраховано очікуваний річний економічний ефект при використанні луѓи, гідроксиду натрію та трібосистеми сталь 95X18 та чавуну ЧХ32. При пресуванні соломи ячменю економічний ефект склав 556477,05 грн./рік, деревинних залишків 771755,08 грн./рік та луѓи насіння соняшнику 1833800,73 грн./рік на один екструдер ЕВ-350. На один екструдер ЕВ-350М, при пресуванні соломи ячменю економічний ефект склав 140369,54 грн./рік, деревинних залишків 206414,85 грн./рік та луѓи насіння соняшнику 504439,20 грн./рік. Результати дослідження впровадженні ТОВ "ЧеркасиЕлеваторМаш" та ФЛП «Махно С.М.».

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено теоретичні узагальнення і нове рішення наукового завдання – підвищення зносостійкості трібосистем екструдерів на етапі проектування та експлуатації в корозійно-абразивних середовищах. Результати моделювання дають можливість раціонального вибору конструкцій трібосистем, матеріалів, робочих середовищ, а також прогнозувати ресурс в експлуатації.

1. На підставі аналізу розглянутих робіт можливо зробити висновок, що під час екстрагування рослинної біомаси під впливом негативних факторів відбувається корозійно-механічне, адгезійне, утомне та абразивне зношування. Найбільш інтенсивно проявляється абразивно-корозійне зношування, яке відбувається під дією продуктів термічної деструкції біомаси (органічних кислот) та мінеральних речовин. Найбільш перспективним методом підвищення зносостійкості, серед представлених, є іонно-плазмове азотування, наплавлення твердими сплавами, вакуумне напилення та використання абразивно- і корозійностійких, легованих чавунів або хромових сталей. Одним із засобів підвищення зносостійкості є нейтралізація агресивного, кислотного середовища, яке призводить до корозійного зношування.

2. Розроблено методики по визначенню активної та загальної кислотності сировини та паливних брикетів, а також методика по вмісту абразиву в сировині для виробництва паливних брикетів, за допомогою яких виконано аналіз рівня активної та загальної кислотності, а також абразивності. Встановлено, що рослинна біомаса має слабокисле середовище та містить абразивні частинки. Найбільшу загальну кислотність має луѓга соняшника, а найбільший вміст абразивних частинок має солома ячменю.

3. Розроблено математичну модель розрахунку швидкості зношування трібоелементів в трібосистемі, яка працює в умовах корозійно-абразивного зношування. Вхідними факторами є активна кислотність, абразивність, шорсткість, навантаження та швидкості ковзання. Теоретичним шляхом встановлено ступінь впливу наведених вище факторів на швидкість зношування. Абразивність є найбільш вагомим фактором, потім за ступенем спадання впливу – рівень активної кислотності та навантаження. Виконано моделювання та встановлено оптимальний рівень активної кислотності рН 7,4.

4. Виконана експериментальна оцінка адекватності розроблених математичних моделей за результатами експерименту, а також ступінь впливу вхідних в математичні моделі факторів на результати моделювання. За допомогою критерію Фішера встановлено, що результати моделювання швидкості зношування адекватні результатам експерименту з довірливою ймовірністю 0,9. Розрахована похибка моделювання по кожній серії експериментів, показано, що при моделюванні швидкості зношування похибка не перевищує 15,98%, що можна визнати задовільним при дослідженні процесів тертя та зношування.

5. Експериментальним шляхом встановлено, що рослинна сировина для виробництва твердого палива має слабкокисло середовище та активну кислотність рН 5. Встановлено, що при додаванні до сировини луги - гідроксиду натрію, відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування. При додаванні до сировини луги - гідроксиду натрію до рН 7,4, відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування. Рейтинг трібосистем по втратам на тертя має вид: трібосистема сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32; сталь 40X та чавун ЧХ32 і сталь 40X та чавун ЧХ28. По швидкості зношування: сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32; сталь 40X та чавун ЧХ32 і сталь 40X та чавун ЧХ28. При подальшому додаванні луги створюється сильнолужне середовище та відбувається зворотний процес, при якому зростає швидкість зношування та сила тертя.

6. Застосовуючи теорію подібності та моделювання отримані критеріальні рівняння подібності та визначені масштабні коефіцієнти переходу від моделі до природи. На підставі застосування критеріальних рівнянь та лабораторних досліджень було отримано залежності сили тертя та швидкості зношування натурних трібосистем екструдерів EB-350 та EB-350M для виробництва паливних брикетів при використанні різних типів робочого середовища та матеріалів з яких вони виготовлені. Фізичним моделюванням визначено, що використання слаболужного робочого середовища рН 7,4 призводить до збільшення ресурсу екструдера EB-350 при пресуванні соломи ячменю в 1,41 рази, деревинних залишків – 2,33 рази, лузги насіння соняшнику в 13,16 рази, прілої лузги в 10,23 рази. При зміні матеріалів на сталь 95X18 та чавун ЧХ32 відбувається збільшення ресурсу екструдера EB-350 при пресуванні соломи ячменю в 2,76 рази, деревинних залишків – 4,56 рази, лузги насіння соняшнику в 25,76 рази, прілої лузги в 20,02 рази.

7. Проведеними дослідженнями встановлено, що при використанні сировини з слаболужним середовищем, близького до нейтрального, на робочих

поверхнях спостерігаються незначні сліди корозії, що пов'язано з утворенням на поверхні металу пасивних плівок, які сповільнюють дифузію кисню до поверхні металу та каталітично знижують швидкість корозії. При слабокислому середовищі та сильнолужному середовищі на поверхнях сталей та чавунів спостерігається утворення вторинних захисних плівок та язв. Мікроаналізом поверхонь тертя різних трібосистем та розрахунками встановлено, що на поверхні тертя досліджених матеріалів формується плівка розміром 16-21 нм при рН 5, 17-28 нм при рН 8 і 8-17 нм при рН 11 та подряпини розміром 24-40 нм при рН 5, 42-49 нм при рН 8 і 8-25 нм при рН 11.

8. Розраховано очікуваний річний економічний ефект при використанні луѓи - гідроксиду натрію та трібосистеми сталь 95X18 та чавуну ЧХ32. При пресуванні соломи ячменю складе 357808,27 грн./рік, деревинних залишків 317345,15 грн./рік та луѓи насіння соняшнику 494252,95 грн./рік на один екструдер ЕВ-350. На один екструдер ЕВ-350М при пресуванні соломи ячменю річний економічний ефект складе 140369,54 грн./рік, деревинних залишків 206414,85 грн./рік та луѓи насіння соняшнику 477647,22 грн./рік, при переробці до 1330 тонн сировини на рік.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **У фахових виданнях**

1. Цимбал Б. М. Розробка методики та визначення активної та загальної кислотності сировини для виробництва паливних брикетів та пеллетів з рослинної біомаси / В. А. Войтов, Б. М. Цимбал // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 2(85). – С. 204-211.

2. Цимбал Б. М. Розробка методики та визначення активної та загальної кислотності поверхонь паливних брикетів з деревинних відходів, які контактують з робочими органами пресу / Б. М. Цимбал // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 160: Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу. Транспортні технології. – С. 202-209.

3. Цимбал Б. М. Розробка методики та визначення вмісту мінеральних (абразивних) домішок, які контактують з робочими органами екструдера / В. А. Войтов, Б. М. Цимбал // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків: ХНТУСГ, 2016. – № 4. – С. 56-61.

4. Цимбал Б. М. Математичне моделювання трібологічних характеристик сумісних матеріалів робочих органів екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах / В. А. Войтов, Б. М. Цимбал // Інженерія природокористування. – Харків, 2016. – № 2(6). – С. 6-11.

5. Цимбал Б. М. Експериментальна оцінка впливу факторів на зношування та сумісність матеріалів деталей екструдера / В. А. Войтов, Б.М. Цимбал // Проблеми трибології. – 2016. – № 1. – С. 90-99.

6. Tsymbal B. M. Tribology compatibility of steel and cast iron in abrasive and corrosive environment in the production of biomass briquettes / V. A. Voitov, B. M. Tsymbal // Problems of Friction and Wear. – 2016. - № 4(73). – P. 13-26.

7. Цимбал Б. М. Дослідження мікротвердості, шорсткості та процесів зношування на робочих поверхнях модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M / В. А. Войтов, Б.М. Цимбал // Проблеми трибології. – 2016. – № 3. – С. 21-32.

#### **Матеріали і тези конференцій**

8. Цимбал Б. М. Аналіз основних видів зношування шнекового пресу для виробництва паливних брикетів Pini-Kau / В. А. Войтов, Б. М. Цимбал // Підвищення надійності машин і обладнання: ІХ Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених, 15-17 квітня 2015 р.: Збірник тез доповідей. – Кіровоград: КНТУ, 2015. - С. 54-55.

9. Цимбал Б. М. Дослідження поверхонь тертя модельних трібосистем сталей та чавунів при застосуванні різних рівнів активної кислотності та абразивності / В. А. Войтов, Б. М. Цимбал // Підвищення надійності машин і обладнання: Х Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених, 20-22 квітня 2016 р.: Збірник тез доповідей. – Кіровоград: КНТУ, 2016. - С. 166-168.

10. Цимбал Б. М. Дослідження тріботехнічних процесів на поверхнях тертя трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M / В. А. Войтов, Б. М. Цимбал Перспективна техніка і технології – 2016: матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, 20-22 вересня 2016 р., м. Миколаїв / Міністерство аграрної політики та продовольства України; Миколаївський національний аграрний університет. – Миколаїв : МНАУ, 2016. – С. 171-185.

#### **У закордонних виданнях**

11. Цимбал Б. М. Физическое моделирование процессов трения и изнашивания трібосистем екструдеров EB-350 и EB-350M / В. Войтов, Б. Цимбал // MOTROL, LUBLIN-RZESZOW – 2016, Vol. 18, - № 7. – С. 27 – 35.  
(Видання входить до науково-метричної бази даних)

#### **Патенти та заявки на винахід**

12. Пат. 109886 Україна, МПК C10L 10/04, C10L 5/44, G01N 27/26, G01N 31/16. Спосіб отримання твердого біопалива з рослинної сировини та присадки / В. А. Войтов, Б. М. Цимбал; заявник та патентовласник ХНТУСГ ім. П. Василенка. - и 2016 03185; заяв. 28.03.2016, опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17, 2016 р. – 3 с.

#### **АНОТАЦІЯ**

**Цимбал Б.М. Підвищення зносостійкості шнекових екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017.

Дисертаційна робота спрямована на підвищення зносостійкості шнекових екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах. Розроблено математичну модель розрахунку швидкості зношування трібоелементів в трібосистемі, які працюють в умовах корозійно-

абразивного зношування. Вирішено оптимізаційну задачу стосовно створення певного рівня активної кислотності. Визначено, що при додаванні до сировини луги - гідроксиду натрію, відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування. Застосовуючи теорію подібності та моделювання отримані критеріальні рівняння подібності та визначені масштабні коефіцієнти переходу від природи до моделі. На підставі застосування критеріальних рівнянь та лабораторних досліджень було отримано залежності сили тертя та швидкості зношування натурних трибосистем екструдерів EB-350 та EB-350M для виробництва паливних брикетів при використанні різних типів робочого середовища та матеріалів з яких вони виготовлені. За допомогою фізичного моделювання та критеріального підходу надано оцінку ресурсу та витратам на тертя натурних трибосистем екструдерів EB-350 та EB-350M та розроблено рекомендації виробникам цих машин та паливних брикетів.

*Ключові слова:* трибосистема, швидкість зношування, сила тертя, моделювання процесів тертя та зношування, трибосистема, корозійно-абразивне зношування, активна кислотність, абразивність, лужне середовище.

## АННОТАЦІЯ

**Цимбал Б.М. Повышение износостойкости шнековых экструдеров для производства топливных брикетов в кислотных и щелочных средах. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 - трение и износ в машинах. - Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2017.

Диссертационная работа направлена на повышение износостойкости шнековых экструдеров для производства топливных брикетов в кислотных и щелочных средах. Разработана математическая модель расчета скорости изнашивания трибоэлементов в трибосистеме, которые работают в условиях коррозионно-абразивного изнашивания. Решены оптимизационные задачи по созданию определенного уровня активной кислотности.

Впервые получены зависимости скорости изнашивания трибосистем при одновременном действии абразивного и коррозионного износа. Установлено, в порядке убывания, рейтинг влияния факторов на процессе изнашивания, к которым относятся абразивность, активная кислотность среды и нагрузка. С учетом полученного рейтинга выполнено обоснование совместимых материалов в трибосистемах экструдеров, которые позволяют повысить их ресурс и уменьшить потери на трение. Определено, что при добавлении к сырью щёлочи - гидроксида натрия, происходит уменьшение силы трения и скорости изнашивания.

Применив теорию подобия и моделирования получены критериальные уравнения подобия и определены масштабные коэффициенты перехода от природы к модели. На основании применения критериальных уравнений и лабораторных исследований были получены зависимости силы трения и скорости изнашивания натурных трибосистем экструдеров EB-350 и EB-350M для производства топливных брикетов при использовании различных типов

рабочей среды и материалов, из которых они изготовлены. С помощью физического моделирования и критериального подхода дана оценка ресурса и потерь на трение натуральных трибосистем экструдеров EB-350 и EB-350M и разработаны рекомендации производителям этих машин и топливных брикетов.

Выбраны наиболее совместимые материалы в зависимости от их трибологических характеристик - скорости изнашивания и силы трения, на которые влияют уровень активной кислотности, абразивность и нагрузка.

Проведенными исследованиями установлено, что при использовании сырья с слабощелочной средой, близкой к нейтральной, на рабочих поверхностях наблюдается незначительные следы коррозии, что связано с образованием на поверхности металла пассивных пленок, которые замедляют диффузию кислорода к поверхности металла и каталитически снижают скорость коррозии. При слабокислой среде pH 5 и сильнощелочной среде pH 11 на поверхностях сталей и чугунов наблюдается образование коррозионных пленок и язв.

*Ключевые слова:* трибосистема, скорость изнашивания, сила трения, моделирование процессов трения и изнашивания, трибосистема, коррозионно-абразивное изнашивание, активная кислотность, абразивность, щелочная среда.

## ABSTRACT

**Tsymbal B.M. Improving wear resistance of a screw extruder for production of biomass briquettes in acidic and alkaline environments.** - The manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.04 - friction and wear in machines. - Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The thesis aims to develop recommendations for improving wear resistance of screw extruder for production of biomass briquettes in acidic and alkaline environments. Optimization problem was resolved concerning creation of a certain level of active acidity. Due to the physical modelling and criterion approach, we made an assessment of the resource and costs for friction of full -scale tribo-system of the extruder EB-350 and EB-350M. Recommendations for manufacturers of these cars and biomass briquettes were created

The most compatible materials were chosen according to their tribology characteristics: wear rate and friction force, which are under effect of active acidity level, abrasivity and load.

It was determined that if to add lye - sodium hydroxide to the raw material, frictional force and wear rate became lower.

*Keywords:* tribo-systema, wear rate, friction force, modelling of friction and wear processes of tribo-systemy, corrosive and abrasive wear, active acidity, abrasivity, alkaline environment.

Підписано до друку «\_\_\_»\_\_\_\_\_2017р.  
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.  
Друк-цифровий. Умовн.друк. арк. 0,9. Тираж 120 прим. Зам. №0202

---

Надруковано у копі-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)  
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1  
Тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)