

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ВИКОНАННЯ ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ  
ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ  
ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
ШНЕКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ**

*Монографія*

Харків – 2018

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

**Б.М. Цимбал., В.А. Войтов, С.Р. Артем'єв,  
О.Д. Малько, О.П. Шароватова**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ВИКОНАННЯ ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ  
ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ  
ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
ШНЕКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ**

*Монографія*

Харків – 2018

Рекомендовано до друку  
Вченою радою НУЦЗ України  
(протокол від 22.11.2018 р. № 3 )

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор **О.В. Богомолов**  
доктор технічних наук, професор **В.В. Коломієць**

УДК 621.891

**Підвищення ефективності виконання заходів з охорони праці та екологічної безпеки під час експлуатації шнекових екструдерів / Б.М. Цимбал., В.А. Войтов, С.Р. Артем'єв, О.Д. Малько, О.П. Шароватова – Х.: НУЦЗУ, 2018. – 172 с.**

Підвищення ефективності виконання заходів з охорони праці та екологічної безпеки під час експлуатації шнекових екструдерів

**ISBN**

Робота, яка висвітлена в монографії, спрямована на підвищення ефективності виконання заходів з охорони праці та екологічної безпеки під час експлуатації шнекових екструдерів, а також на підвищення зносостійкості шнекових екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах. В даній роботі приведений аналіз та оцінка фізичних і хімічних факторів небезпек та ризиків пожежовибухонебезпечного виробництва твердого біопалива з рослинної біомаси. В результаті аналізу та оцінки факторів небезпек, було отримано рейтинг впливу факторів на організм людини та причини виникнення надзвичайних ситуацій. За допомогою сучасних, стандартних методик, були виявлені небезпечні фактори та ризики, які перевищують допустиме значення та можуть призвести до надзвичайних ситуацій. Для попередження виникнення надзвичайних ситуацій, представлені шляхи управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва твердого біопалива, які впливають на безпеку, а також проаналізовані і запропоновані заходи з їх попередження. 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 трібосистем 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 трібосистем екструдерів EB-350 та EB-350M та розроблено рекомендації виробникам цих машин та паливних брикетів. Монографія може бути рекомендована науковцям, працівникам органів державного управління в галузі охорони праці, трибології, прикладної механіки, аспірантам і здобувачам освітнього ступеня «магістр» за спеціальностями «Цивільна безпека» (спеціалізація – «Охорона праці») та «Екологія».

УДК 621.891

**ISBN ...**

© Б.М. Цимбал, В.А. Войтов, С.Р. Артем'єв,  
О.Д. Малько, О.П. Шароватова, 2018  
© НУЦЗУ, 2018

## ЗМІСТ

<b>Розділ 1. Стан питання та вибір напрямку досліджень</b> .....	7
1.1 Аналіз робіт присвячених механізмам зношування шнекових пресів або екструдерів.....	7
1.2 Аналіз матеріалів для виготовлення шнека та філь'єр.....	13
1.3 Аналіз технологічних шляхів підвищення зносостійкості шнекових пресів або екструдерів та аналіз шляхів управління зносостійкістю екструдерів.....	18
1.4 Аналіз сировини для виробництва паливних брикетів та шляхів управління зносостійкістю шнекових пресів та екструдерів.....	27
1.5 Аналіз методів і моделей моделювання процесів тертя та зношування при абразивному та корозійно-механічному зношуванні.....	29
1.6 Висновки за першим розділом.....	33
<b>Розділ 2. Методичний підхід в проведенні досліджень</b> .....	34
2.1 Системний підхід та структура досліджень.....	34
2.2 Обґрунтування та вибір матеріалів і робочих середовищ для проведення досліджень.....	41
2.3 Лабораторне обладнання для проведення експериментальних досліджень.....	49
2.4 Планування експерименту та обробка експериментальних даних.....	50
2.5 Висновки за другим розділом.....	52
<b>Розділ 3. Математичне моделювання та експериментальна оцінка трібологічних характеристик сумісних матеріалів робочих органів екструдерів для виробництва паливних брикетів у кислотних та лужних середовищах</b> .....	53
3.1 Визначення параметрів робочого середовища в яких працюють трібосистеми екструдера EB-350 та EB-350M, активної і загальної кислотності та абразивності сировини для виробництва паливних брикетів.....	53
3.2 Математичне моделювання трібологічних характеристик сумісних матеріалів робочих органів екструдерів.....	59
3.3 Експериментальне дослідження трібологічних характеристик конструкційних матеріалів у кислотному, лужному та абразивному середовищах.....	64
3.4 Висновки за третім розділом.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
<b>Розділ 4. Фізичне моделювання процесів тертя та зношування трібосистем екструдерів EB-350 та EB-350M</b> .....	77
4.1 Методика фізичного моделювання тріботехнічних процесів.....	77
4.2 Визначення швидкості зношування натурних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M та прогнозування їх ресурсу.....	80
4.3 Висновки за четвертим розділом.....	102

<b>Розділ 5. Дослідження механохімічних процесів на поверхнях тертя трібосистем .....</b>	<b>103</b>
5.1 Дослідження мікротвердості та процесів зношування на робочих поверхнях тертя модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M.....	103
5.2 Дослідження хімічного складу корозійних плівок на поверхнях тертя трібосистем .....	108
5.3 Дослідження шорсткості робочих поверхонь трібосистем.....	116
5.4 Розрахунок очікуваного економічного ефекту при використанні сировини з слаболужним середовищем близькому до нейтрального.....	117
5.5 Аналіз факторів небезпек та оцінка ризиків пожежовибухонебезпечного виробництва твердого біопалива з рослинної біомаси .....	120
5.6 Висновки за п'ятим розділом .....	127
<b>Загальні висновки .....</b>	<b>128</b>
<b>Список використаних джерел .....</b>	<b>130</b>
<b>Додатки.....</b>	<b>143</b>
Додаток А. Перелік та креслення швидкозношуваних частин екструдера EB-350 та EB-350M .....	143
Додаток Б. Хімічний склад поверхонь тертя чавунів ЧХ22Н2, ЧХ32 та сталі 40Х та 95Х18 при рН5, рН8 та рН11 .....	160
Додаток В. Рекомендації при експлуатації екструдерів з використанням сировини з слаболужним середовищем, близьким до нейтрального.....	171

## ВСТУП

В Україні та Європі виробництво твердого палива з рослинної сировини, яка є відновлювальним джерелом енергії, є перспективним напрямком, але сучасні технології та обладнання виявилися досить небезпечними. Нерозуміння цього як при проектуванні, так і при експлуатації цих виробництв призводить до аварій та вибухів з важкими наслідками. Тому впровадження безпечного виробництва твердого біопалива з рослинної біомаси є проблемним питанням.

Для виробництва твердого палива використовуються рослинні відходи сільськогосподарського та лісового виробництва, до таких відходів можна 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 абразивно-корозійного зношування шнека та філь'єр екструдера, зменшення ресурсу шнека та філь'єр, терміну експлуатації екструдера, а також збільшенню витрат на виробництво твердого палива, підвищення зносостійкості екструдерів для виробництва твердого палива з рослинної сировини є актуальним завданням.

Фахівці з проектування та експлуатації нової 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 матеріалів робочих органів обладнання, яке контактує з агресивним середовищем під час виробництва паливних брикетів та пеллетів з рослинної біомаси.

Вперше отримано 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 відносять абразивність, активну 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.

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

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.

Розроблено практичні рекомендації щодо вибору марок сталей та чавунів в конструкцію екструдерів, які працюють в абразивному та корозійному (кислотному) середовищах. 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. 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 з слаболужним середовищем, близьким до нейтрального.

Практичні рекомендації впроваджено на підприємстві з виробництва екструдерів – ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» (м. Черкаси) та паливних брикетів – ФОП «Махно С.М.» (Волинська обл., Луцький район, с. Липини).

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 1.1 Аналіз робіт присвячених механізмам зношування шнекових пресів або екструдерів

Вивченню механізмів зношування шнекових пресів або екструдерів присвячені роботи таких вчених, як Стамбурский Є.А., Бейль А.І., Карливан В.П., Беспалов Ю.А. [1], Дворук В.І., Борак К.В. [2], Ястреба С.П. [3], Гончар В.А. [4], Деркач В.В. [5], Матвіїшин П.В. [6], Васильків В.В., Радик Д.Л. [7], Луцак Д.Л., Криль Я.А., Присяжнюк П.М. [8], Беркович І.І. [9], Roggenbach Н., Vogel Н. [10], Grigoroudis К. [11]. Основним здобутком вчених стало визначення факторів, які впливають на зношування, розроблення класифікації основних видів та чинників зношування, визначення негативного впливу зносу на зміну основних характеристик роботи обладнання.

Відомо, що при переробці склонаповнених термопластів найбільш інтенсивно зношується зона дозування, де відбувається не тільки абразивне зношування, але й протікає корозія. При цьому на поверхні деталей спостерігаються сліди точкової корозії. Дослідним шляхом [1] встановили, що найбільшою зношувальною активністю володіє фенолоформальдегідна смола, наповнена деревним борошном. Продукти, які утворюються під час переробки сировини, вступають в контакт з металевою поверхнею робочих органів. Такий контакт відбувається в поглибленнях мікрорельєфу та в волосяних тріщинах. Продукти корозії, які утворились у мікроосередках, сприяють збільшенню концентрації активних компонентів та, тим самим, каталітично впливають на корозійні процеси.

Конструктивною причиною зносу робочих органів шнекового пресу є неякісне їх виробництво. В дослідженні Roggenbach Н., Vogel Н. [10] наведені результати вимірювань твердості поверхні черв'яка, яка складала HV 500–600, що значно менше ніж твердість передбачена технологією виготовлення (HV 900–1000). Максимальний знос в зоні дозування склав 2,5 мм після переробки 25 т склонаповненого поліаміду. Азотований шар на поверхні черв'яка був видалений при механічній обробці черв'яка, оскільки твердість його поверхні у зоні загрузки, де знос практично відсутній, складала HV 600, тобто відповідала твердості основного матеріалу.

Будь-яка трібосистема має певні особливості контактування, які визначаються природою контактуючих матеріалів, станом поверхні контакту та умовами взаємодії. При пресуванні сировина піддається термічно-механічному впливу, форма якого змінюється по мірі пересування продукту уздовж робочої зони. Під впливом теплоти та тиску змінюється стан продукту. В зоні загрузки відбувається контактування твердих тіл сировини, яка має низьку насипну щільність (деревна тирса 200 кг/м<sup>3</sup>, лузга соняшнику 120 кг/м<sup>3</sup>) та розмір цих тіл не перевищує 8 мм [12].



В зоні стиску металеві поверхні робочих органів контактують з абразивними частинками продукту, який поступово стискається, отримує деформацію та збільшує насипну щільність. Частинки продукту нагріваються від теплової енергії, яка виділяється при терті та від нагрівача, виділяють лігнін, тим самим створюється в'язке та пластичне середовище. В зоні формування відбувається контакт продукту з формуючою філь'єрою, а саме внутрішньою поверхнею філь'єри з золою, яка утворилася на поверхні брикету під впливом високої температури (температура обробки деревної тирси 320–350 °С, лузги соняшнику 240–290 °С [12]). Під час спікання відбувається виділення акролеїну, діоксиду азоту, пилу рослинного походження, діоксиду кремнію [13], які вступають в молекулярний контакт з матеріалом філь'єри. Особливості трибоконтакту по зонах визначають величину зношування та вид зношування.

Під час переробки біомаси відбуваються такі види зношування, як заїдання або задир, абразивне, адгезійне, утомне та корозійне-механічне [7]. В зоні завантаження в трибосистемі «філь'єра – гребінь шнека» та в зоні пресування в парі «філь'єра – хвостовик», а саме на двох останніх витках шнека відбувається заїдання або задир, який виникає в результаті схоплювання, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні тертя на іншу та вплив виниклих нерівностей на поверхні робочого органу [1, 14].

Сировина, яка використовується для виробництва паливних брикетів, така, як деревна тирса, лушпиння соняшнику, відходи зернового виробництва, солома та ін. біомаса, а також мінеральні частинки (пісок, ґрунт та невелике каміння) [15] при контакті з робочими органами призводять до механічного руйнування поверхонь, які труться, в результаті ріжучої або дряпаючої дії твердих тіл та частинок, що призводить до абразивного зношування [16–18]. Цей вид зношування характерний для всіх зон [4, 19]. Для екструдерів воно характерне в зоні стиснення [5], найбільш схильні до абразивного зносу останні два витки хвостовика екструдера [20].

Коли зусилля притиснення гребня черв'яка недостатньо високе або відсутня схильність до заїдання, відбувається абразивне зношування. Метали з яких виробляють гільзи циліндрів, мають більшу поверхневу твердість після азотування ніж метали, з яких виробляють черв'як, при цьому мікрорельєф гільзи здатен абразивно зношувати поверхню гребня черв'яка. Чим більше засмічена сировина мінеральними домішками, тим більше буде зношуватися поверхня робочих органів [1, 13].

При експлуатації шнека спостерігається зміцнення поверхневого шару, яке характерне для механо-хімічної форми абразивного зношування. На поверхні витка шнека виникають зони пластичної деформації та вторинні структури, які спричинені абразивними частками матеріалу [7]. Зола, яка утворилася при окиснюванні продукту, складається з мінеральних речовин, які призводять до високого абразивного зношування [20]. Прейс Г.О. у [21] заперечував протікання абразивного зношування робочих органів олійних екструдерів.

Він вважав, що тверді абразивні частинки, які можуть потрапити до сировини, будуть занурюватись в продукт і не зможуть створювати абразивну

дію на робочі органи. На підтвердження цього він зазначав, що поверхні спрацьованих деталей як поліровані і на них відсутні подряпини і інші сліди абразивного зношування. Але, на думку автора [22] і за даними його спостережень, не всі спрацьовані деталі мають вигляд полірованих.

Відомо, що при нагріванні біомаси виділяється лігнін [23], який вступає в молекулярне зчеплення з поверхнею деталей і біомасою, тобто відбувається прилипання частинок продукту до поверхні деталей, що призводить до адгезійного зношування.

При виготовленні паливних брикетів утворюються такі хімічні сполуки, як акролеїн, діоксид азоту, діоксид вуглецю, діоксид кремнію, лігнін внаслідок адсорбції, хемосорбції і дифузії атомів, змінюють хімічний склад поверхні робочих органів [3]. Під дією високої температури, звільненої вологи та слабокислого середовищі біомаси відбувається хімічна реакція з поверхнею металу, яка провокує корозійно-механічне зношування [24]. Внаслідок цього виникають нові вторинні структури, товщина яких коливається в межах 0,05–0,1 мкм [7, 25]. Як правило, це зношування характерне для зони формування та спікання, але найбільш протікає в зоні стиснення. Корозійно-механічне зношування відбувається тільки в парі тертя «пресований матеріал – елемент конструкції» [1].

Під час пресування під дією високої температури відбувається термодеструкція органічних речовин, які входять до складу біомаси, яка супроводжується утворенням агресивних по відношенню до металу хімічних речовин. При механічному диспергуванні біополімерів утворюються макрорадикали, які вступають в активну взаємодію з металами. Під час термодеструкції органічних речовин відбувається утворення поверхнево-активних речовин, дія яких на кристалічні тіла супроводжується адсорбційним зниженням твердості та межі втоми [25].

Утомне зношування відбувається в зв'язку з нераціональним вибором матеріалу або порушенням технології виготовлення шнека чи циліндра. Воно виникає коли відсутня перехідна зона між твердим поверхневим шаром та основним металом при недостатньої його міцності. Під впливом змінного механічного навантаження та температури в зоні стиснення основний метал деталі випробовує деформацію, в результаті чого відбувається втомне механічне зношування. В основному металі деталі відбувається утворення поверхневих тріщин крихкого та твердого робочого шару, які викликають його викришування. Утомне зношування найбільш часто зустрічається на робочих органах, які зміцнювали боруванням або нанесенням зносостійкого шару карбиду вольфраму або титану [1, 9, 11, 13, 19, 27].

Однією з причин підвищеного зношування вузла пресування є контакт витків шнеку з поверхнею циліндра. Знос при вигині шнека під дією власної ваги найбільш сильно проявляється в зоні пресування, в результаті чого поперечний переріз циліндра з круглого перетворюється в овальний з вертикальним розташуванням великої осі.

Коли твердість матеріалу, з якого вироблений циліндр більша ніж твердість шнека, то знос шнека через його згин стає дуже істотним [28]. Конструктивними причинами цього зношування є велика довжина шнека, горизонтальне розміщення, закріплення його в одній опорі, розбіжність осьової лінії шнека через його вигін з осьовою лінією циліндра.

Шнек згинається під впливом осьової сили, яка складається з розподіленого осьового навантаження, викликаного дотичними напруженнями, діючими зі сторони переміщуваного в'язкого матеріалу до дна циліндра, тертям часток матеріалу об стінки каналу та об виток нарізки шнека, зосередженої сили на кінці шнеку, розподіленого осьового навантаження, викликаного різницею тисків, діючих на бокові стінки витків шнека. Під дією осьового стискаючого навантаження відбувається повздожно-поперековий згин шнеку або втрата стійкості. У зв'язку з цим збільшується довжина зношеної зони [6, 26–35].

Потік матеріалу та розподілене навантаження у переробному матеріалі не є вісісиметричними. Тому існує поперечно розподілене навантаження, яке згинає шнек. Поперечна сила найбільш збільшується, коли асиметрія шнека посилена дефектами виготовлення: незбіжністю осей витків та серцевини. Циліндр зношується по колу, а шнек – односторонньо. Знос збільшується у напрямку виходу з шнекового пресу [1, 29].

При певній критичній частоті обертання шнека виникають згині коливання. Існує ряд факторів, які суттєво впливають на критичну частоту обертання валу та на характер руху при швидкостях, які близькі до критичних. Якщо перетин шнека не ідеально круглий, або якщо є істотний вплив ваги шнека, то помітне зростання прогинів шнека при кутовій швидкості, рівній половині критичній, тобто шорсткість шнека падає. Ця швидкість є критичною швидкістю другого порядку [34]. Дія виділеного лігніну аналогічна дії олійної плівки в підшипнику.

Коли відбувається зсув вісі шнека виникає сила, діюча на шнек перпендикулярно зміщенню та залучає його в обертання навколо вісі циліндра в напрямку основного обертання. Ця сила провокує розвиток коливань. При контакті шнеку з циліндром під дією сили тертя шнек починає обкатувати циліндр в напрямку, протилежному напрямку основного обертання. При роботі в критичному режимі виникає ударна динамічна взаємодія шнека та циліндра, яка виявляється акустично. У такому режимі роботи інтенсифікуються багато видів зносу [28].

Пружне закладення знижує критичну частоту обертання шнеку, збільшуючи довжину ділянки контакту його з циліндром при дії повздожньої сили та поперечного навантаження, обумовленої асиметрією [1].

При зменшенні діаметра шнека під час експлуатації відбувається збільшення зазорів між витками секцій шнека та стінкою камери, яке істотно зменшує продуктивність процесу пресування. Зменшення конструктивної жорсткості відбувається завдяки зношуванню на радіусних перехідних поверхнях

та на боковій поверхні. Зношування призводить до утворення тріщин та деформації, через що шнековий прес виходить з ладу [8].

Знос робочих органів шнекового преса негативно впливає на його продуктивність, бо збільшення радіального зазору призводить до різкого збільшення витoku потоку. Якщо зазор складає 10 % від діаметру каналу, то потік витoku складає 15 % від протитечії, а при зазорі 15 % від діаметру каналу потік витoku складає половину протитечії або одну третину сумарного зворотного потоку. Ці дані дозволили вважати критичною величиною зазору від зносу 15 % від діаметру каналу після досягнення якої необхідна заміна шнека. Велике значення має не тільки величина зносу, а його розподілення по всій довжині шнека та робочої камери.

В роботі [35] наведено результати експериментальних досліджень з вивчення продуктивності екструдера з штучно збільшеним зазором в окремих зонах. Вплив зносу на продуктивність екструдера залежно від зміни діаметру шнека екструдера було вивчено за допомогою комп'ютерного моделювання авторами робіт [30, 32], але під час моделювання було враховано технологічні параметри процесу та не враховано негативну дію середовища, в якій працює шнек та філь'єра екструдера.

Автором роботи [33] вивчається знос каналу екструдера, його вплив на продуктивність, описується зміна експлуатаційних та технологічних параметрів під час зношування, але не було вивчено вплив факторів середовища, в якому працюють робочі органи екструдера.

Класифікація основних видів зношування та факторів, які негативно впливають на зносостійкість екструдера, наведено на рис. 1.1. Вузол екструдера є основним вузлом екструдера, зносостійкість якого впливає на його продуктивність, довговічність та енергоємність. Для визначення зносу шнека та робочої камери циліндра існують наступні методи: інтегральний по технічним властивостям, мікрометраж, профілографування, поверхневої активації, штучних баз (визначення лінійного штучного зносу) [36–37].

Технічними властивостями екструдера для визначення зносу є зменшення його продуктивності та частоти обертання шнека. В роботі Зверлина В.Г. досліджена залежність величини зносу від частоти обертання шнеку та продуктивності екструдера [35]. Зі збільшенням зносу продуктивність шнекового преса зменшується, а частота обертання збільшується. Збільшення частоти обертання шнека направлене на компенсацію зменшення продуктивності, що призводить до збільшення питомої витрати енергії.

Для трібосистем екструдера характерні наступні види зношування: заїдання або задир, абразивне, адгезійне, утомне та корозійно-механічне. На думку авторів [1, 5–7] найбільший вплив на швидкість зношування здійснює корозійно-механічне зношування. Під час аналізу робіт, присвячених механізмам зношування шнекових пресів або екструдерів, було поставлено завдання вивчити механізми зношування робочих органів шнекових екструдерів, працюючих на різних типах біомаси, та розробка рекомендацій з підвищення їх зносостійкості.

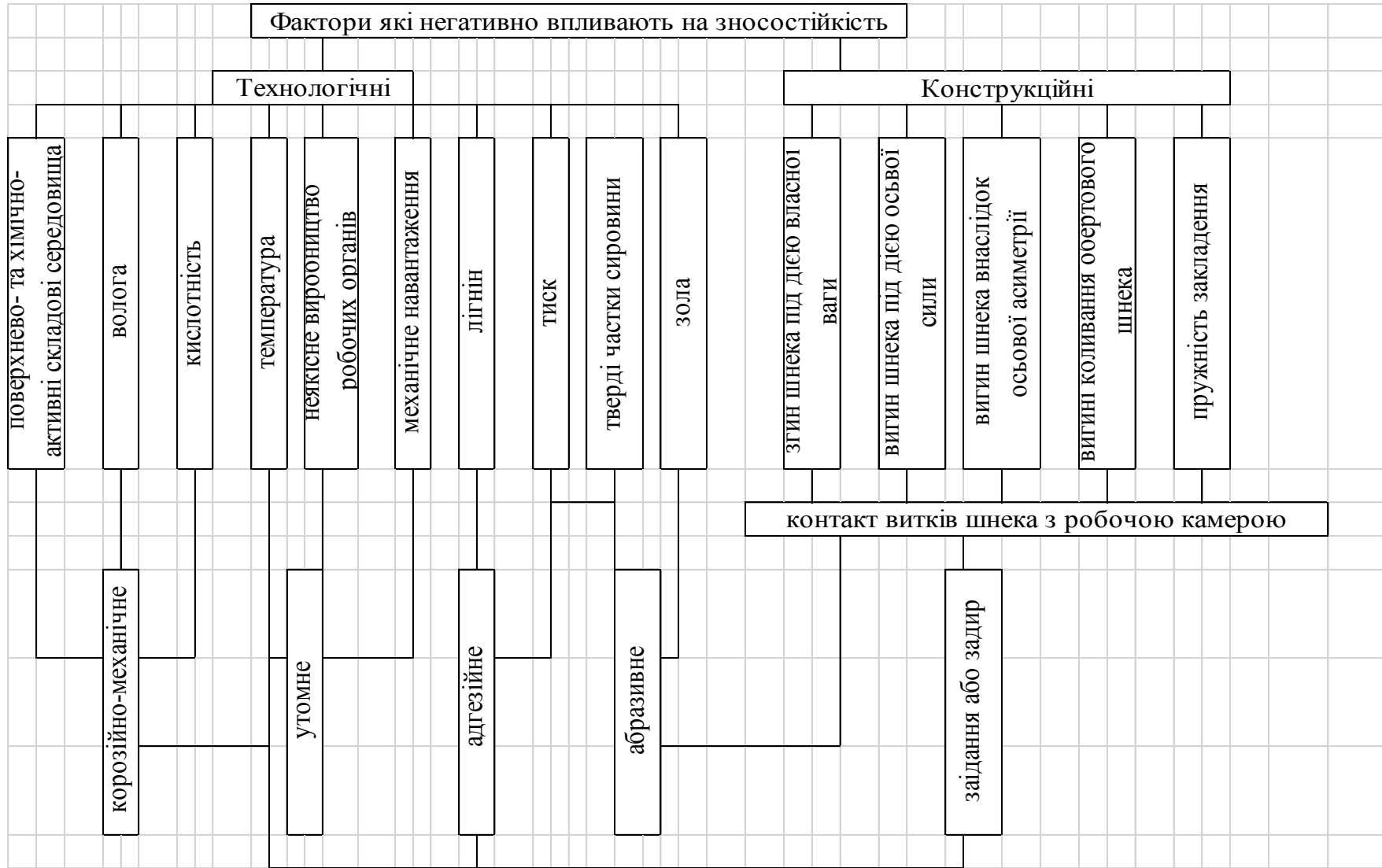


Рис. 1.1 – Класифікація основних видів зношування та факторів, які негативно впливають на зносостійкість екструдера

## 1.2 Аналіз матеріалів для виготовлення шнека та філь'єр

Особливість процесу зношування робочих органів екструдерів, виготовлених з азотованих сталей, полягає в тому, що при переробці склонаповненого поліаміду зміна розмірів шнеку внаслідок зносу на 0,3 мм відбувається протягом перших 360–420 годин, у той час як подальша зміна розмірів на 2–3 мм, при якому нормальна експлуатація вже неможлива, відбувається в наступні 720–1440 годин роботи обладнання.

Не менш важливо, що така характеристика азотованого шару (найбільш зносостійкою частиною є поверхня) практично виключає можливість остаточної шліфовки деталей, що значно ускладнює технологію їх виготовлення. Тому доцільно застосування таких матеріалів, які в поєднанні з методами хіміко-термічної обробки, забезпечують високу зносостійкість не тільки на поверхні або в шарі товщиною кілька мікрометрів та на глибині, сумірною з гранично-допустимою величиною експлуатаційного зносу.

Найбільш повно цим вимогам відповідають інструментальні сталі ледебуритні структури, які піддаються наскрізному загартуванню, мікроструктура яких характеризується високим вмістом дрібнозернистого твердого карбиду. Сталі цього класу, наприклад X40CrMoV51, аналог 4X5MФ1С та X165CrMoV12, аналог X12MФ маючи твердість після термообробки порядку HRC 58-64 з успіхом застосовуються для виготовлення шнеків обладнання, призначеного для переробки композиційних полімерних матеріалів, які містять твердий наповнювач.

Висока зносостійкість деталей, виготовлених з цих сталей, забезпечується рівномірністю цієї характеристики протягом усього терміну експлуатації [38]. Інструментальні сталі зберігають досить високі міцні характеристики і після відпустки, тому деталі, виготовлені з них, можна додатково піддати іонному азотуванню, що ще більше підвищує термін служби обладнання.

Сталі X165CrMoV12 та S6-5-3, аналог P6M5Ф3 з високим вмістом вуглецю (1,65 і 1,20 % відповідно) більш крихкі. Незадовільна в'язкість основи стала головною причиною багаторазових випадків руйнування шнеків під дією крутного моменту. Крім того, застосування інструментальних сталей для виготовлення шнеків обмежено технологічними складнощами, пов'язаними з істотним коробленням деталей в процесі термообробки, яку не завжди можна виправити подальшим рихтуванням [39].

Значно менше коробленню схильні шнеки, виготовлені зі сталей X3NiCoMo18-8-5, аналог 03H18K8M5T-ВД та X3NiCoMoTi18-9-5, аналог 03H18K9M5T-ВД.

За дисперсійного твердіння, яке може здійснюватися одночасно з азотуванням в тліючому розряді, об'ємна усадка становить 0,05–0,1 % [38]. Якщо інструментальні сталі в силу зазначених вище причин рекомендується застосовувати для виготовлення тільки невеликих і середніх шнеків, то мартенситностаріючі сталі використовуються при виготовленні будь-яких типорозмірів

робочих органів. Єдиним (правда, досить істотним) їх недоліком є відносно висока вартість. Тому їх застосовують при виготовленні обладнання, призначеного для переробки композиційних полімерних матеріалів, що володіють підвищеною зношувальною активністю [1].

Поряд з абразивним впливом, який чинить твердий наповнювач на поверхню робочих органів, останні в ряді випадків відчують корозію. Іноді корозійні процеси визначають знос обладнання, термін його служби. Цією обставиною пояснюється застосування корозійностійких сталей в якості матеріалу для виготовлення шнеків. Найбільш часто використовується сталь X36CrMo17, аналог 40X16M.

Термін служби шнеків, виготовлених з цієї сталі, при переробці склонаповненого поліаміду складає 7200–8640 годин [40,41]. Раніше застосовувалися для виготовлення шнеків низьколеговані сталі 34CrAlNi7-10, аналог 34X2NMЮ замінили на сталі середнього легування X40CrMoV51, потім на сталі корозійностійкі X36CrMo17. При цьому на даному етапі розвитку технології виготовлення обладнання для філь'єр і раніше застосовували сталі типу 34CrAlNi7-10 з наступним азотуванням та у поодиноких випадках – матеріали групи термічно покращених сталей.

Фахівці США та Англії відносять шнеки до групи швидкозношуваних деталей. Кожна одиниця технологічного обладнання комплектується чотирма (три – запасних) шнеками. Тому для виготовлення шнеків застосовують низьколеговані сталі типу SAE3130, аналог 12X18H9 та SAE4140, аналог 40XMФА [42]. Останнім часом у зв'язку зі значним розширенням номенклатури переробляються композиційні полімерні матеріали для виготовлення шнеків та знаходять застосування інструментальні SAEA2, аналог 12X18H9T і корозійностійкі SAED2, аналог X12MФ сталі.

В Німеччині всі шнеки, незалежно від марки сталі, з якої їх виготовляють, піддають азотуванню внаслідок якого, залежно від ступеня легування матеріалу отримують різні за характеристиками захисні (робочі) шари. Найбільші складнощі виникають при іонному азотуванні шнеків, виготовлених з корозійностійких сталей, у них не утворюється необхідна для забезпечення тривалої зносостійкості чітко виражена дифузійна зона.

У зв'язку з цим погіршується зв'язок твердого поверхневого шару товщиною 0,1–0,15 мм з основою. Але більш вагомим недоліком є занадто високий градієнт твердості азотованого шару при переході до основи, внаслідок чого залишкові напруження нерідко призводять до утворення підшарових тріщин, орієнтованих паралельно поверхні [40]. За даними [39], ймовірність тріщиноутворення максимальна, якщо зменшення твердості складає більш 15 одиниць HV на кожний мікрометр товщини шару.

Не менш важливо при виборі матеріалу враховувати схильність корозійностійких сталей до схоплювання і задір, яку пояснюють утворенням специфічних структур нітридів легуючих елементів після азотування [1]. Дослідження [42] показують, що можна з успіхом підібрати пари тертя, одним з матеріалів яких є корозійностійка сталь, піддана іонному азотуванню.

У роботі [43] повідомляється про дефект у вигляді «м'якої плямистості», ймовірність появи якої підвищується зі збільшенням вмісту хрому і нікелю в сталях і який особливо часто зустрічається при іонному азотуванні великогабаритних деталей.

Самим вагомим недоліком азотованих корозійностійких сталей є зниження їх корозійної стійкості. Якщо при азотуванні низьколегованих сталей корозійна стійкість підвищується, то у випадку азотованих нержавіючих сталей вона падає. Пояснюється це зниженням вмісту хрому в результаті утворення в азотованому шарі нітридів хрому [1].

У роботі [40] вказується, що в слабокислих і вуглеводневих середовищах зменшення корозійної стійкості нержавіючих сталей після азотування не спостерігається. Зокрема, при вмісті вуглецю 0,02–0,1 % і хрому більше 10 % нержавіючі сталі зберігають корозійну стійкість після азотування. Аналогічні результати отримані для деталей із хромонікелевих сталей, причому вміст нікелю має становити не більше 5,5 %.

Для переробки полімерних матеріалів з абразивним наповнювачем шнеки виготовлять з високо легуючої сталі AISI 4140, аналог 38ХМА, витки зміцнюють наплавленням з матеріалу, обраного для внутрішнього покриття циліндра екструдера та покривають карбідом вольфраму [44]. Недоліком карбиду вольфраму є його нестійкість до ударних навантажень та крихкість, а легуюча сталь AISI 4140 є нестійкою в корозійному середовищі.

Для підвищення зносостійкості Лебедевим М.Б., Невольніченко Б.І., Мищенко А.Я., Аленко В.Л., Логвіновим К.Л. [45] було запропоновано виробляти лопатевий вал з обпаленої керамічної маси і закріпляти на приводному валу за допомогою армуючого складу.

Кампанія «KraussMaffei Berstorff» виробляє шнек екструдера ZE 25 UTX для полімерних матеріалів з корозійностійкої спеціальної інструментальної сталі КМВ А або R, наскрізним гартуванням, твердістю 57 HRC, невеликим опором до зносу, середнім до корозії, а циліндр – корозійностійкого сплаву хромової сталі або вибіленого чавуну КМВ GP наскрізного гартування, твердістю 62 HRC, високої стійкості до зносу та середнім до корозії [46].

Для підвищення зносостійкості витків нагнітаючого гвинта пресаформувача для переробки біологічних відходів у паливні брикети, пеллети, гранули Карманов В.В., Балахонов В.Д., Борзаков А.Є. [47] провели аналіз підбору матеріалів, які відповідають технічним характеристикам зносостійкості.

Було розглянуто сталі У8, ХВГ, 9ХС, Х18, 40Х13 та модифіковані чавуни, внаслідок чого прийшли до висновку, що в порівнянні з вуглецевою сталлю модифіковані чавуни мають більш низьку температуру плавлення, що полегшує технологію плавки і робить її дешевшою, більшу рідинотекучість, що дозволяє отримувати тонкостінні виливки, виготовлення яких із сталі скрутно, а також меншу схильність до утворення гарячих тріщин, що значно спрощує технологію виробництва виливків і скорочує брак лиття. Вони мають ме-



ншу щільність, що дозволяє знизити масу робочого органу машин приблизно на 8–10 %, більш високу зносостійкість, що збільшує термін служби деталей машин при точному литті, деталь при цьому не вимагає механічної обробки.

Для досягнення найбільш високої твердості модифікованого чавуну Кармановим В.В., Балахоновим В.Д., Борзаковим А.Є. був розроблений процес аустенізації протягом 30–40 хв. з подальшим гартуванням у воді. Тріщини та інші дефекти гартування при цьому не виникали. Була отримана зносостійка структура вибіленого шару чавуну шляхом легування хромом на рівні від 0,25 до 0,7 % при зниженні вмісту нікелю менше 0,5 %. Зміст марганцю у складі модифікованого чавуну регулювався в межах 0,3–0,8 % для нейтралізації шкідливого впливу сірки і фосфору на величину відбілювання чавуну. Під час термічної обробки твердість збільшується з 53 до 60 HRC, а зносостійкість зростає в два рази [76]. Наявність хрому та нікелю не забезпечує корозійну стійкість чавуну в кислотному середовищі.

Для виготовлення екструзійних головок використовують такі типи сталей – цементовані вуглецеві сталі, азотовані, прогартовані, загартовані і відпущені сталі, корозійно-стійкі [48–59].

Цементовані (поверхнево зміцнені, науглероджені) сталі легко піддаються механічній обробці, а після цементації або термообробки їх поверхня стає дуже твердою і зносостійкою, а серцевина – в'язко-пластичною й володіє високим опором стисненню. В основному застосовуються хромо-марганцеві, хромо-нікелеві, хромо-молібденові сталі 1.2162 (21MnCr5), аналог 18ХГТ, 1.2746 (X19NiCrMo4), аналог 30ХСНВФА, 1.2341 (X6CrMo4)[48, 54–56].

Азотовані сталі не є повністю корозійностійкими. Для підвищення корозійної стійкості в них необхідно додавати більшу кількість хрому. До них відносяться: 1.2852 (33 AlCrMo4), 1.2307 (29CrMoV9), 1.2851 (34CrAl16). Підвищення твердості цих марок сталі досягається формуванням мартенситної структури в результаті різкого охолодження після нагрівання. Кінцеві значення механічних властивостей значною мірою залежать від швидкостей охолодження [49, 51].

Прогартовані сталі відрізняються високою твердістю і підвищеною зносостійкістю. Проте їх ударна в'язкість невелика в порівнянні з цементованими, загартованими і відпущеними сталями. Оскільки вони чутливі до утворення тріщин і схильні до жолоблення, тому використовуються рідко [49, 52].

Загартовані і відпущені в стані поставки сталі застосовуються в тих випадках, коли існує ймовірність, що термообробка призведе до спотворення форми і зміни розмірів деталей, наприклад, при виготовленні великих головок. У процесі виробництва цих сталей відпуск здійснюють після зміцнення. Це знижує твердість і міцність, але підвищує ударну в'язкість і пружність.

Відносно низька міцність після гартування і відпустки погіршує зносостійкість поверхонь і зменшує здатність їх до полірування. Однак цей недолік можна подолати за допомогою азотування або хромування поверхонь.

Прикладами загартованих і відпущених сталей є 1.2312 (40CrMnMoS86), аналог 40ХГМА, 1.2347(XCrMoVS51), 1.2711(54NiMoV6),

аналог 5ХНМ [49–51]. До числа корозійностійких відносяться сталі, у складі яких міститься більше 12 % хрому. Вони використовуються, коли в процесі переробки полімерів виділяються хімічно-агресивні речовини (наприклад, соляна кислота).

Внаслідок схильності хрому до з'єднання з вуглецем, утворюючи карбіди (які в невеликих кількостях повинні бути присутніми для підвищення твердості сталі), при температурах вище 400 °С виникає небезпека утворення карбідів хрому в результаті локального переміщення атомів хрому з області навколо атомів вуглецю. Це робить негативний вплив на властивості матеріалу і його корозійну стійкість. До корозійностійких сталей відносяться: 1.2083 (Х40Cr13), аналог 40Х13, 1.2316 (Х36CrMo17), аналог 40Х16М [49–50].

Проблема зносу екструзійних головок може вирішуватися також шляхом використання спеціальних вкладишів з зносостійких матеріалів, наприклад, тврдосплавних або алмазних вставок. Такі вкладиші застосовуються на ділянках головки, найбільш небезпечних з точки зору зносу [51].

Під час обробки харчових продуктів з метою захисту від корозії для виготовлення екструдерів застосовується нержавіюча загартована хромована сталь, а при роботі з продуктами, коли можливий абразивний знос – загартована інструментальна сталь. Оскільки корпуси екструдерів з технологічних причин не можуть бути виготовлені з високоякісних сплавів, то вони оснащуються овальними отворами, в які вставляються зносостійкі втулки. При обробці харчових продуктів застосовуються втулки з литого твердого сплаву, що володіє високим антикорозійним і антиабразивними властивостями. Для екструзійних процесів, при яких може додатково з'явитися адгезійний знос, виробляють спеціальні втулки з сполук нікелю, хрому, бору [59].

Автори робіт [60–62] в своїх дослідженнях застосовують сталь 40Х10С2М. Встановлено, що термічна обробка клапанів зі сталі 40Х10С2М для ДВС автомобілів за режимом, що включає нагрів ТВЧ, охолодження на повітрі і подальшу низькотемпературну (400 °С) відпустку, призводить до формування в поверхневому шарі структур типу мартенситу відпустки, що забезпечують збільшення мікротвердості  $H_{0,05}$  поверхневої і підповерхневої зон цих клапанів в 2–2,5 рази в порівнянні з серединою.

Автори роботи [63] застосовують сталь 95Х18, яка відноситься до високолегованих сталей з великим вмістом вуглецю і утворює при термообробці тверді карбіди. Такі властивості матеріалу призводять до вельми швидкого (1–5 хв.) утворення великих майданчиків зносу на ріжучих зернах в результаті одночасного дифузійного розчинення і адгезійного зрізу мікрочастинок алмазу.

Чавун ЧХ28 застосовується для проведення експериментальних досліджень авторами робіт [64,65], бо цей сплав містить хром, як основний легуючий елемент в кількості від 22 до 30 %, що забезпечує достатню жаростійкість, гарячо-абразивну і газо-абразивну зносостійкість колосників за температури експлуатації до 1000 °С.

Автори роботи [66] в наукових дослідженнях застосовують чавун ЧХ32, бо структура зносостійкого чавуну в литому стані є матрицею у вигляді мартенситу та залишкового аустеніту (НВ 4500–5000 МПа) з включеннями евтектичних та вторинних карбідів хрому (НВ 11000–19000).

Карбіди розміщуються у вигляді каркасної сітки, яка є основою високої твердості та зносостійкості чавуну.

Під час аналізу матеріалів для виготовлення шнеку та філь'єр екструдерів було поставлено завдання підібрати сумісні матеріали для виробництва шнеку та філь'єр екструдера та обґрунтувати їх вибір.

### **1.3 Аналіз технологічних шляхів підвищення зносостійкості шнекових пресів або екструдерів та аналіз шляхів управління зносостійкістю екструдерів**

#### **1.3.1 Хіміко-термічна обробка поверхні деталей**

Авторами роботи [67] встановлено, що в процесі азотування залізо з азотом залежно від температури і концентрації газу, утворює декілька фаз; твердий розчин азоту в  $\alpha$ -залізі ( $\alpha$ -фаза), тверді розчини на основі нітридів  $\text{Fe}_4\text{N}$  ( $\gamma$ -фаза) і  $\text{Fe}_2\text{N}$  ( $\varepsilon$ -фаза). Філь'єри та шнеки піддавали низькотемпературному (температура процесу не більше 864 К) азотуванню в середовищі аміаку. При повільному охолодженні азотований шар складається з  $\varepsilon + \gamma$  (з'єднувальна зона) та  $\alpha + \gamma$  (дифузійна зона) фаз.

Шанхайська компанія двошнекових машин ТОВ «Сіньсін» виробляє шнеки та циліндри зі сталі 38CrMoAlA, аналог 38X2MЮА, які азотують на глибину 0,5–0,8 мм, при цьому твердість поверхні  $\text{HV} \geq 900$  [68]. Вони мають абразивну стійкість, але не корозійностійкі.

ЗАТ «Завод Джі Ті Севен» виробляє гільзи (втулки), які встановлюються в завантажувальні воронки екструдерів і є змінними їх частинами. Гільзи, так само як і циліндри, виготовляються з легованої високоякісної сталі 38X2MЮА. Для додання гільзі значної твердості під час її виготовлення її термічно покращують, а після виготовлення азотують. Внутрішня поверхня гільзи азотується на глибину від 0,4 до 0,8 мм, при цьому досягається твердість внутрішньої поверхні 58–69 HRC, забезпечуючи гільзі високу міцність і зносостійкість [44].

В першу чергу, підвищення зносостійкості робочих органів намагалися домогтися варіюванням режимів азотування, а також використанням різних середовищ, носіїв азоту (азотування у ванні, порошок). Однак це не дало бажаного результату. Більш успішним виявилось застосування борування. При дифузії бору в сталеву поверхню може утворюватися або двофазний ( $\text{FeB}$  – зовні та  $\text{Fe}_2\text{B}$  – всередині), або однофазний (тільки  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) шар залежно від активності боруючого середовища [69].

Експерименти, проведені в Німецькому інституті пластмас, показали, що зносостійкість зразків, виготовлених зі сталі 42CrMo4, аналог 40ХФА з подальшим боруванням (6 год. за температури 1163 °С) в 6–8 раз, при пере-

робці наповнених термопластів і в 5–6 разів при переробці наповнених реакопластів перевершувала зносостійкість зразків, виготовлених зі сталі 34CrAlNi7-10, аналог 34X2NMЮ з подальшим азотуванням [70].

Висока твердість (до 20 ГПа) боридних покриттів обумовлює їх перспективність для підвищення зносостійкості деталей олійних пресів. За даними [71] борування особливо ефективно за наявності в зоні тертя абразивних частинок і мастильних речовин: зносостійкість борованої сталі в 4–6 разів вища від зносостійкості цементованої сталі. Щоправда, боридні шари відзначаються підвищеною крихкістю. Але для деталей олійних пресів, які працюють в умовах більш-менш рівномірного безударного навантаження, цей недолік борування не є суттєвим.

Однак борування, як спосіб зміцнення робочих органів обладнання, не знайшов широкого застосування. Основна причина полягає в недостатній пластичності боридного шару, що призводить до місцевого руйнування покриття в перший же місяць експлуатації дослідного черв'яка. Не дивлячись на те, що знос черв'яка малий, його доводиться демонтувати, так як дрібні частинки шару, що руйнується, просуваються разом з полімером, який переробляє та ушкоджує філь'єру. Більш широке застосування цей спосіб отримав при виготовленні екструзійних філь'єр [1].

Дуже перспективним за даними [72,73] виявилось застосування з метою зміцнення іонного азотування, або азотування в тліючому розряді (АТР).

При азотуванні в тліючому розряді, завдяки точному дозуванню азоту, можна отримати монолітний однофазний об'єднуючий шар, який складається з  $\gamma'$  – фази (HV 1200–1400), що володіє виключно високою для азотованих шарів в'язкістю (кут скручування, при якому з'являються тріщини, становить  $97^\circ$ , в той час як при інших способах азотування він не перевищує  $34^\circ$ ). Цей шар має підвищену зносостійкість і, не зважаючи на невелику товщину, рівну 6–8 мкм, значно підвищує термін служби робочих органів переробного обладнання [1, 72,73].

Раніше зазначалося, що твердість є умовною характеристикою зносостійкості. Найбільшою зносостійкістю азотованого шару (азотування проводили при  $713^\circ\text{C}$  протягом 33 год.) сталей 38X2MЮА та 40X не збігається з їх максимальною твердістю, причому із збільшенням температури і тривалості процесу азотування ця невідповідність зростає. За меншої твердості азотованого шару сталі 12X13 її зносостійкість вище, ніж сталі 38X2MЮА.

В УкрНДІпластмаш були проведені дослідження впливу способу азотування на зносостійкість сталей. Як видно з результатів дослідження, зносостійкість зразків зі сталі 40XН2МА, які піддані іонному азотуванню, у 1,5–2 рази вище зносостійкості зразків, азотованих в газі. Для інших сталей залежність аналогічна. Зносостійкість шнеків, виготовлених зі сталі 34CrAlNi7-10 з подальшим іонним азотуванням, в 4 рази перевищує зносостійкість шнеків з тієї ж сталі, але азотованих в газі [72].

Два однакових з геометрії шнека діаметром 22 мм, азотовані (перший в середовищі аміаку, другий – іонізуючим азотом) і мають однакову міцність

основи  $\sigma_b = 850\text{--}900$  МПа, навантажували крутним моментом до руйнування, яке відбувалося для першого шнека при 450, а для другого при 520 Н · м [1]. Навіть за незначних кутів скручування на поверхні черв'яка, азотованого в середовищі аміаку, з'являлися лускаті відшарування, число яких зростало в міру збільшення кута скручування.

До кінця випробувань уся поверхня випробуваної деталі була покрита пошкодженнями у вигляді дрібних кратероподібних викришувань. Дослідження поверхні руйнування за допомогою мікроскопу показало наявність великої кількості тріщин в дифузійній зоні, орієнтованих паралельно поверхні. Після іонного азотування під час скручування подібні дефекти захисного шару шнеку були абсолютно відсутні на відміну від шнеку, який азотували у середовищі аміаку. Під час скручування сталося руйнування при куті скручування, який в 2,5 рази перевищує значення, при якому відбулося порушення першого зразка. Термін служби шнеків, підданих іонному азотуванню, в 3–5 разів перевищує термін служби шнека, виготовленого з тієї ж сталі з наступним азотуванням в газі [1, 72, 73].

Для підвищення зносостійкості та довговічності екструдерів для переробки фуражного зерна з домішками мінералів Гончар В. А. [74] використав сталь Х12. Він дослідив інтенсивність зношування після гартування та іонного азотування та знайшов оптимальні режими іонного азотування сталі Х12 для кожної з досліджуваних характеристик. Встановлено, що зносостійкість сталі Х12 після іонного азотування в 1,6 рази вища в порівнянні з її зносостійкістю після гартування.

Авторами доведено, що для забезпечення максимальної зносостійкості пар тертя в абразивному середовищі необхідно, щоб поверхневі шари мали високу твердість, яка досягається за температури гартування 560–580 °С та максимальну товщину азотованого шару, яку отримують при дифузійному насиченні протягом 6–8 год. [74]. Як недолік, слід відмітити, що в дослідженні Гончара В.А. не враховане корозійне середовище, високий тиск та температуру, які негативно впливають на зносостійкість робочих органів екструдера.

Компанія «Ruian MINGDE Machinery Co. Ltd» виробляє циліндр і шнек екструдера з високоякісної легованої сталі, підданої іонному азотуванню з метою значного підвищення зносостійкості і стійкості до корозії. Матеріал шнека та циліндра SACM-645/38 CRMOALA, аналог 38ХМІОА [75].

### **1.3.2 Зносо- та корозійностійкі покриття робочих органів та аналіз шляхів управління зносостійкістю екструдерів**

Філь'ера є трудомістким виробом підвищеної складності до якого висуваються високі вимоги по міцності, точності розмірів, зносо- і корозійної стійкості та ін. [76]. Чим вище зносостійкість філь'ери, тим стабільніші показники якості продукту, одержуваного при переробці, вища продуктивність і нижчі енерговитрати. У зв'язку з цим ресурс роботи обладнання, як правило, визначається станом філь'ери.

Значне збільшення терміну служби біметалевих філь'єр (у 10–12 разів) порівняно з азотованими, обумовлено відповідним підбором матеріалу для захисного шару (з урахуванням специфічних умов переробки).

Незалежно від способу нанесення робочого шару для попередження розтріскування останнього в умовах експлуатації, корпус біметалічної філь'єри має бути жорсткішим, ніж азотованої. Для цього застосовують корпус з більшою товщиною стінки або підсилюють циліндр в зоні дозування бандажними кільцями, виготовленими з високоміцних марок сталей.

Сплави на основі заліза (Xaloy 101, Bru 100, Reiloy 112, Bernex A110) мають твердість HRC 56–66 одиниць і мають високу абразивостійкість. Сплави на основі нікелю (Xaloy 306, Bruх 600, Reiloy 115, Bernex C240) мають твердість HRC 45–50 одиниць і характеризуються високою корозійною стійкістю. Сплави на основі нікелю (Xaloy 800) і кобальту (Reiloy 200, 210) за своїми властивостями і застосуванням займають проміжне положення між зносо- і корозійностійкими сплавами.

Зносостійкість сплавів у 2–6 разів перевищує зносостійкість азотованої сталі 34CrAlNi7, що підтверджується результатами промислової експлуатації філь'єр, зміцнених сплавом Reiloy. Якщо врахувати той факт, що зносостійкість азотованого шару різко падає по глибині, а зносостійкість робочого шару, отриманого методом наплавлення, не залежить від досягнутої глибини руйнування в межах його товщини, то у другому випадку слід очікувати збільшення терміну служби реальних виробів в 10–15 разів [1].

Співробітниками УкрНДПластмаш була досліджена зносостійкість наплавочних сплавів в контакті з композиційним полімерним матеріалом (сополімер формальдегіду, наповнений 30 % карбиду бору  $B_4C$ ). Зносостійкість сплавів значно перевершує зносостійкість азотованих сталей 40ХН2МА і 38Х2МЮА. Враховуючи той факт, що твердість наплавочних шарів по глибині практично постійна, їх перевага у зносостійкості, в порівнянні з азотованою поверхнею зростає в міру зношування [1, 76].

Нині застосовують «біметалеві» щілинні головки. У таких голівках ділянки каналу до виходу з головки, найбільш схильні до зносу, складаються з зносостійкого матеріалу [50].

Для підвищення зносостійкості циліндрів екструдера Деркач В.В. [4] розробив метод термодифузійної біметалізації, який полягає в тому, що у внутрішню порожнину заготівки, яка нагрівається індуктором та обертається, подають середовище, що цементує. Для системи «Fe – C» за температури, близькій до евтектичної (1150–1200 °C), відбувається інтенсивне насичення поверхні вуглецем, а за досягнення його евтектичної концентрації поверхня заготовки підплавляється, що більше інтенсифікує процес дифузії вуглецю.

В результаті товщина оплавленого шару збільшується, досягаючи за короткий проміжок часу (15–200 с) величини 2–3 мм. Після охолодження на внутрішній поверхні деталі формується зносостійкий шар чавуну. Суттєвого поліпшення фізико-механічних властивостей та зносостійкості, одержаного на циліндрах покриття, досягається за рахунок додаткового економного легу-

вання різними елементами. На поверхні циліндру формується шар чавуну, який не витримує динамічних навантажень, утворює тріщини та має погану зносостійкість в агресивних середовищах, які призводять до корозійного зношування.

При газополум'яному напиленні захисний шар товщиною 0,3–0,5 мм формують на всій поверхні шнека. Забезпечення зв'язку з основним матеріалом дозволяє виключити відшаровування зносостійкого покриття із сплавів на основі нікелю або кобальту та збільшити термін служби шнеків в 5–6 разів у порівнянні з азотованими [1]. Використання, як матеріалу покриття більш твердого сплаву, що містить нікель, хром, бор і карбід вольфраму (HRC 65–68), дозволило в ще більшій мірі збільшити зносостійкість шнеків. Проте, в процесі експлуатації дослідних шнеків були виявлені часті випадки викришування надтвердого покриття внаслідок низької його пластичності. Основні недоліки процесу наступні: низька температура факела (не більше 2700 К); висока пористість покриття (звичайно, не нижче 8–20 %); відносно високий нагрів деталі (570–600 К) [77].

За допомогою напилення плазмовим факелом, зносостійкі покриття товщиною 50–150 мкм можна нанести і на всю поверхню шнека або тільки на його гребінь. При цьому температура нагріву деталі не перевищує 423 К, міцність зчеплення покриття з підложкою складає більше 150 МПа, а пористість – менше 1 % [78]. Застосовувані покриття складаються з надтвердих карбідів вольфраму і титану, розподілених у матриці з кобальту, нікелю або хромо-нікелевих, хромокобальтових сплавів. Поєднання високої твердості карбідів і корозійної стійкості матриці забезпечує виключно високу зносостійкість покриття.

Термін служби шнеків, встановлених детонаційним напиленням, підвищується в 4–6 разів порівняно з терміном служби шнеків, робочий шар яких був сформований за допомогою хромування, азотування або наплавленням твердих сплавів. Перевагою цього способу є можливість обробки поверхонь складної форми і нанесення покриттів різноманітного складу. До недоліків слід віднести значний шум при роботі установки, відносно високу вартість обладнання і підвищену витрату напилюваного матеріалу.

Задовільна зносостійкість була отримана у випадку зразків, виготовлених зі сплаву HC-250 (сплав на основі нікелю з високим вмістом хрому). Твердість сплаву достатньо висока (HRC 52–56), при цьому для нього не характерно тріщиноутворення. Для зміцнення шнеків, що працюють в біметалічному циліндрі сплаву Xaloy 306, використовують сплав Colmonoy 56. Однак при цьому зареєстрований значний знос сполученого тіла, що в реальних умовах означає передчасний знос циліндра [42].

Існує спосіб плазмово-порошкового наплавлення шнеку композиційним сплавом, який має нікелеву матрицю та карбід вольфраму. Самофлюсуючі сплави на Ni- основі використовуються для наплавлення композиційних матеріалів. Вони мають порівняно низьку температуру плавлення (1000–1100 °С), добре змочують зерна реліту і досить зносостійкі в абразив-

ному середовищі. Дана технологія дозволяє збільшити термін служби шнеку від двох до п'яти разів залежно від умов його роботи та сировини [79]. Ці матеріали мають певну жаро- то абразивостійкість, але мають здатність до крихкості та не є корозійностійкими.

Зниження продуктивності лінії з виробництва ущільнень, поява браку, зниження тиску пресування гуми та погіршення її перемішування, відбувається внаслідок зносу шнека, який виникає завдяки подачі сировини в гарячому стані до фільтри під тиском близько 32 МПа. При цьому відбувається абразивний знос напірних поверхонь гвинта та кавітація робочих поверхонь. Як результат, знос ребер шнека в кільцевій частині до 3 мм на сторону. Для вирішення цієї проблеми використовують газопорошкове напилення або наплавлення сплавами на основі колмоноїв системи Cr-Ni-B, правку за спеціальною технологією, шліфування напірних поверхонь шнека ручним інструментом, обробку торцевих поверхонь на шліфувальному верстаті [80]. Ці метали є нестійкими у кислому середовищі.

Кампанія «WEBER» для захисту одношнекового екструдера використовує азотування, покриття поверхні біметалічного шнеку карбідом ванадію або покриття каналу бокової поверхні черв'яка та біметалічного циліндру карбідом вольфраму товщиною зносостійкого шару до 2 мм. Недоліком цих покриттів є їх крихкість [81].

ТОВ «Науково-технічна фірма НТВ» використовує наплавлення гребнів шнеку за зовнішнім діаметром твердими сплавами на основі заліза, кобальту, нікелю, молібдену або вольфраму, які володіють високою зносостійкістю в умовах сухого тертя «метал по металу», високою корозійною стійкістю (у т.ч. середовищі азотної кислоти) та високою стійкістю до абразивного зношування. Твердість сплавів після наплавлення становить 40–58 HRC [82].

Відомі промислові сплави на основі заліза мають той же вагомий технологічний недолік, як і нікелеві або кобальтові сплави, а саме – підвищену схильність до утворення тріщин при напавленні. Сом А.І. спеціально для плазмено-порошкового наплавлення шнеків розробив новий зносостійкий сплав системи «Fe – Cr – V – Mo – C», стійкий проти тріщин [83]. При розробці даного сплаву автор не врахував жароміцність, твердість, корозійну стійкість та інші властивості сплавів, які є важливими в умовах роботи черв'ячних машин.

ЗАТ «Плакарт» для наплавлення шнеку, використовує плазмено-порошкове або лазерне наплавлення. Залежно від умов роботи шнека для відновлення використовують сплави на основі Fe, Ni або Co. Твердість напавленого шару може становити від 45 до 60 HRC, а термін служби при цьому підвищується мінімум в 2 рази порівняно з азотованими шнеками або з тонкоплівковими покриттями [84].

ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» для наплавлення шнеку екструдера EB 350 для виробництва паливних брикетів Піні-Кей, використовувало електроди Т-590, які застосовуються для наплавлення швидкозношуваних поверхонь, що працюють в абразивному середовищі, а також там, де потрібна під-



вищена твердість. Без термічної обробки вони дозволяють отримувати менш пластичний метал шва, але з твердістю HRC 45–55. Висока твердість металу, наплавленого цими електродами, виходить в результаті введення до складу покриття з особливих легуючих елементів C, Ni, Mn, Cr, B, S та P [85].

Висока твердість не є основним показником зносостійкості та цей сплав не є корозійностійким в агресивних середовищах та жаростійким. ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» зараз використовує електроди UTP LEDURIT 65. Твердість наплавленого металу 65 HRC першого шару на сталь з вуглецем, рівним до 0,15 % 58 HRC, або першого шару на високо-марганцевисту сталь 55 HRC. Покриття володіє гранично-високою абразивною стійкістю на поверхні деталей та експлуатується за підвищених температур до 500 °C. Висока абразивна стійкість досягається дуже великим вмістом спеціальних карбідів (Mo, V, W, Nb). UTP LEDURIT 65 працює в режимі рівного струменево-крапельного переносу металу. Утворюється гладкий зварювальний валик без шлакових включень. В основному не вимагає якісного шліфування [86].

Грановський А.В., Чигарев В.В., Макаренко Н.А., Кондрашов К.А., Кущій А.М. [87] для наплавлення шнека екструдера розробили та застосували спосіб та установку плазмового наплавлення розплавом порошку ПС-12НВК-01 з подачею порошкоподібної присадки безпосередньо в зварювальну ванну, яке знижує енерговитрати на наплавлення, та дозволяє наплавляти композитні сплави, що містять карбід вольфраму. При наплавленні зразків зі сталі 20 порошком ПГ-УС 27 автори встановили різке зниження пористості наплавленого шару порівняно з полум'яним наплавленням на безперервному режимі прямої полярності. Живлення плазмової дуги різнополярним імпульсним струмом забезпечує високе змочування основного металу присадковим матеріалом і покращує формування наплавленого валика [87].

Гладченко А.Н., Шевеля В.В., Зверлін В.Г. [88] розробили та впровадили у виробництво технологію відцентрового наплавлення конічних поверхонь корпусів екструдерів зносостійкими твердими сплавами відцентровим способом (відцентрова біметалізація) з товщиною захисного шару до 5 мм, що на порядок збільшує термін служби корпусу.

Німецька фірма «WAFO Schnecken und Zylinder GmbH» виробляє шнеки із стандартних азотованих матеріалів, нікельованих матеріалів, загартованих порошкових матеріалів, азотованих сталей з локальним, частковим або повним наплавленням зносостійким матеріалом. Циліндри виготовляє із стандартних азотованих матеріалів, біметалів, загартованих вставним вкладишем, порошкових матеріалів і нікельованих матеріалів.

Регенерація через хонінгування і азотування відбувається шляхом установки вкладиша тієї ж довжини. Для нанесення захисного покриття використовуються три групи матеріалів WA-5, Fe – Ni – B абразивно стійкий HRC 60-65 (300 °C), WA-77 Fe – Cr – Ni – B, корозійно і абразивно стійкий, HRC 56-63 (300 °C), WA-880, Fe – Cr – WC – CO сильно корозійно і абразивно стійкий HRC 56–63 (300 °C).

За допомогою застосування лінійного індуктора, матеріал на високій кутовій швидкості наноситься на переносну розігріту трубу на другій стадії процесу. Через, так зване, центрифугування, покриття прискорено з'єднується з твердолегуючим матеріалом в одній дифузійній зоні та гомогенно з несучою трубою. Зносостійкий подвійний корпус виготовляється з азотованих сталей або НІР – зносостійких матеріалів.

Внутрішні вкладиші виробляють з азотованих сталей, з хромованих сталей або порошкових матеріалів [89]. Недоліком сплаву на основі карбиду вольфраму є його крихкість, а на основі «Cr – Ni – W» – недостатня корозійна стійкість в агресивному середовищі.

Для підвищення зносостійкості і корозійної стійкості екструзійних головок разом з азотуванням застосовують такі заходи:

- нанесення захисного шару хрому (міцне хромування);
- нанесення захисного покриття з нікелю або сплавів з високим вмістом нікелю;
- нанесення покриттів з карбиду титану.

Міцне хромування дозволяє отримати корозійностійкі, зносостійкі поліровані поверхні, прилипання розплавів до яких незначне, і які, внаслідок цього легко піддаються очищенню. Хромове покриття товщиною від 0,015 до 0,03 мм наноситься електролітичним способом. Недостатня товщина покриття або гострі кромки поверхні можуть призводити до утворення в покритті напруг, а в подальшому до його відшаровування або лущення. Отже, в багатьох випадках нанесене покриття повинне періодично оновлюватися [49, 53].

Нікелеві покриття і нікелеві сплави мають перевагу – високу корозійну стійкість до впливу соляної кислоти [53,54]. Однак проблемою застосування нікелювання є те, що деякі свинцеві стабілізатори хімічно реагують з нікелевими покриттями, які в результаті такої взаємодії можуть бути повністю знищені, незважаючи на те, що покриття наноситься методом наварки твердим шаром [53], а потім піддається повторній чистовій обробці. Головки виготовлено з сплавів з вмістом нікелю 95 %, проте потенційна ймовірність хімічної реакції все ж залишається [69].

Покриття з карбиду титану (товщина шару – від 6 до 9 мкм), що відрізняються високою зносо- і корозійною стійкістю, володіє достатньою твердістю, та саме покриття є дуже твердим [50,51].

Алюміній і мідно-берилієві сплави мають високу теплопровідність [86]. Зносостійкість алюмінію можна підвищити до значень, що перевищують значення для хромованої сталі шляхом анодування. Крім того, анодування підвищує ще й корозійностійкість матеріалу. Водночас анодовані алюмінієві головки характеризуються гіршими характеристиками, спостерігається налипання розплаву, що підвищує час перебування деталі порівняно з хромовим покриттям. Крім того, низька механічна міцність і ударна в'язкість є явними недоліками анодованого алюмінію [54, 58,59].

Для захисту від абразивного зносу шнеків ІРУП «Технопарк БНТУ Політехнік» застосовує газопорошкове наплавлення самофлюсуючими сплава-

ми, а також наплавлення, спеціально створеним для цього гнучким шнуром «Сфекорд-НР». Введення в матеріал литого карбиду вольфраму з твердістю 70 HRC у вигляді зерен дозволяє наносити покриття товщиною не менше 3 мм з високою абразивною зносостійкістю і стійкістю до дії кислот, лугів та інших корозійно-активних середовищ за температури до 600 °С [90].

У роботах [91–93] показано, що зміною параметрів обробки (температури, тиску, складу насичувальної суміші та ін.), можна керувати фізико-хімічними властивостями та зносостійкістю азотованих металів. Причому азотування в іонно-плазмовій атмосфері дозволяє майже в два рази інтенсифікувати процес насичення [93]. У роботах [94,95] досліджені режими азотування, які забезпечують максимальні показники міцності, пластичності, опору втомлюваності, коефіцієнту тертя та ін. Однак вони не розглядаються у взаємозв'язку із структурним і фазовим складом поверхні, а також не торкаються питань спрацювання деталей шнекових пресів.

Завдяки різним режимам азотування можна підвищити зносостійкість зразків на 50 %. На зносостійкості зразків істотно позначається порушення режимів азотування. Підвищення температури азотування для прискорення процесу приводить до збільшення зносу на 10–15 %, зумовленого утворенням крихкої грубозернистої структури нітриту заліза [96].

Одними з найважливіших параметрів роботи екструдерів є питома зносостійкість та твердість поверхневих шарів, від яких буде залежати термін роботи робочих органів. Так, за даними УкрНДІпластмаш, зносостійкість зразків зі сталі 40ХН2МА зростає при зменшенні глибини азотованого шару. Твердість зразків, виготовлених зі сталі 34CrAlNi7, та підданих газовому азотуванню, зростає зі збільшенням часу азотування. Так, максимальне значення твердості досягається після 72 годин азотування [39, 64].

Для наплавлення шнеків та циліндрів використовують різні сплави, так найбільшу зносостійкість мають кобальтові сплави зі збільшенням кобальту від 46,4 % до 56,9 %, відносна зносостійкість зразків при випробуванні наплавлених зразків при переробці E158-123 збільшується з 11,06 до 17,9 [1].

Ястребою С.П. було досліджене лінійне зношування покриттів, нанесених на поверхню зразків термодифузійним методом. Під час експериментального дослідження автора лінійне спрацювання сталей типу 45 і У8, покритих хромом при терті по лузгі соняшника протягом 20 годин та навантаженні 8,5 МПа, зменшується з 12 до 7 мкм при збільшенні товщини хромованого шару з 17 до 22 мкм. Напрацювання на відмову хромованих деталей збільшується майже вдвічі (з 3100 т до 6000 т) [97].

Матвіїшин П.В. [6] провів дослідження зносостійкості зразків, поверхня яких зміцнювалася за різними технологіями та прийшов до висновку, що найменший знос мали зразки зі сталі 38ХМЮА після іонного азотування в тліючому розряді за режимом: температура 520 °С, середовище 75 % N<sub>2</sub> + 25 % Ar, тиск P = 320 Па і час азотування τ = 8 год. Величина зносу та інтенсивність зношування зразків за даним режимом в 1,6–2 рази менша у по-

рівнянні із зразками, що зміцнювались за іншими видами хіміко-термічної обробки.

З підвищенням тиску та товщини шару дифузійного насичення азотом інтенсивність зношування зменшується, а з підвищенням температури – зростає. Зразки зі сталі 45, що зміцнювались методом борування, після 3 млн. обертів мали найменшу величину зносу ( $I = 0,07 \cdot 10^9$  м). Проте, при подальших випробуваннях їх знос різко збільшився, у зв'язку з розтріскуванням і вилущуванням борованого шару.

За даними Деркача В.А. [5], легуючі елементи у сталей 38ХМЮА, ШХ15 та Х12 сприяють зменшенню інтенсивності зношування в умовах абразивного зношування. Зі збільшенням вмісту хрому в сталі інтенсивність зношування зменшується, що підтверджується інтенсивністю зношування сталей ШХ15 та Х12, в яких середній вміст хрому становить 1,3 % та 12 %. За даними експериментальних досліджень інтенсивності зношування поверхні сталі Х12 після азотування та шляху тертя 6000 м зростає з підвищенням температури гартування сталі, що обумовлено зменшенням твердості матеріалу. З підвищенням аустеніту зносостійкість сталі зростає [4].

Під час проведення аналізу конструктивних та технологічних заходів захисту деталей від зношування та аналізу шляхів управління зносостійкістю екструдерів було поставлено наступні завдання:

1. Обґрунтувати вибір матеріалів для шнека і філь'єр екструдера та експериментальним шляхом оцінити їх зносостійкість.
2. Розробити практичні рекомендації щодо вибору матеріалів в трібосистемі екструдера, впровадити їх у виробництво і оцінити ефективність використання.

#### **1.4 Аналіз сировини для виробництва паливних брикетів та шляхів управління зносостійкістю шнекових пресів та екструдерів**

Робота [98] присвячена вивченню кислотності кори основних лісостворюючих порід дерев. Методика визначення активної кислотності включає ручне подрібнення, що робить його трудомістким, екстракцію дистильованою водою протягом доби за температури 24 °С, що є дуже низькою, та потенціометричне визначення кислотності. Одним з вагомим недоліків цього методу є відсутність фільтрування екстракту.

Авторами робіт [98,99] було встановлено, що добова водна витяжка кори всіх дерев має кислу реакцію ( $pH < 7$ ). Найбільше значення активної кислотності має кора осини  $pH$  5,7 – 6,18, найменше – кора сосни звичайної,  $pH$  3,65–3,73. Кора дубу та липи серцевидної характеризується порівняною кислотністю  $pH$  4,78–5,05 та 5,05–5,08 відповідно. Кора берези має проміжне значення  $pH$  4,28–4,88. В роботі [100] наведено значення рівня активної кислотності  $pH$  більшості порід дерев, яка становить 3,5–4,5.

В роботі [101] наведено значення активної кислотності костри льону, лузги соняшнику, відходів сирників, шелехи грачихи, бавовняних очосів, яке дорівнює рН5.

Також запропоновано метод зміни активної кислотності до рН7–8 шляхом додавання буферних розчинів або мінеральних добавок гіпсу або крейди, які утворюють абразивні частинки, що є недоліком цього методу.

Авторами роботи [102] розроблено ряд спеціальних методів визначення рН деревини, оскільки прямі вимірювання цього показника при вмісті вологи вище точки насичення волокна дають нечіткі результати.

Автори для вимірювань використовують в основному два методи. Перший – визначення рН вологи шляхом зрівнювання рН кислого або лужного водного розчину з рН водної суспензії подрібненої деревини, недоліком якого є неточність вимірювань у зв'язку з наявністю нерозчинних компонентів, які будуть негативно впливати на результати вимірювань. Також одним з недоліків цього методу є те, що його можливо застосовувати тільки для вологої деревини.

Другий – графічний метод (встановлюють точку перетину до кривих) оцінки рН деревини з вимірами після її занурення в розбавлені розчини NaOH і HCl. Недоліком цього методу є те, що розчини сильних луг та кислот є поганим розчинником та сильні кислоти будуть вступати в хімічну реакцію з більшістю хімічних сполук деревини. Використовують також прямий метод вимірювання рН рідини, яка витікає при пресуванні деревини, обробленої паром. Недоліком цього методу є погана дисоціація кислот паром, частина кислот залишається в деревині.

Для різних хвойних і листяних порід помірної зони і деяких тропічних порід автори робіт [102,103] отримали наступні значення рН: *Larix decidua* 4,3; *Picea abies* 5,3; *Pinus resinosa* 6,0; *Fagus sylvatica* 5,4; *Fraxinus excelsior* 5,8; вид *Populus* 5,8; *Quercus alba* 4,1; *Quercus petraea* 3,9; *Quercus rubra* 4,2; вид *TiUa* 5,2; вид *Ulmus* 6,4; *Dalbergia melanoxylon* 8,0; *Gossypiospermum praesox* 6,9; *Lophira pro-cera* 4,7; *Mansonia altissima* 4,3; *Ochroma lagopus* 6,7; *Pterocarpus soyauxii* 3,7; *Schinopsis balansae* 4,3; вид *Shorea* 4,7; *Tectona grandis* 5,1; *Terminalia superba* 8,2.

Як видно з наведених даних, значення рН деревини порід помірної зони знаходяться в інтервалі від слабокислого до помірнокислого (6,4–3,3), а у порід тропічної зони – від слабокислого до слаболужного (3,7–8,2). Так, для виду *Populus cathayana*, який зростає в Китаї, визначили значення рН деревини 7,5–8,0. Кисла реакція деревини більшості видів обумовлена вільними і легковід'ємними кислотами, переважно, оцтовою кислотою. Певний внесок можуть давати і інші кислоти, особливо в деревині тропічних порід.

Автором роботи [104] було визначено кількість мінеральних домішок в щепі, який склав 8–10 %. В процесі рубки лісосічних відходів на мобільних рубільних машинах відбувається не тільки подрібнення деревних матеріалів на щепу, а й дроблення камінців на більш дрібну фракцію.

Це призводить не тільки до затуплення ножів рубільної машини, але і до того, що основна маса мінеральних включень подрібнюється і зосереджується в дрібній фракції щепи.

Авторами роботи [105] було визначено вміст мінеральних домішок в пшеничній соломі, який склав 3 %.

Під час аналізу сировини для виробництва паливних брикетів було поставлено наступне завдання – дослідити корозійні та абразивні властивості різних типів біомаси та оцінити їх вплив на знос та втрати на тертя трібосистем.

### **1.5 Аналіз методів і моделей моделювання процесів тертя та зношування при абразивному та корозійно-механічному зношуванні**

В роботі авторів [106] представлено моделі кінетики зношування нафтохімічного обладнання, яке схильне до корозії. Моделі враховують конструктивний фактор-діаметр та дають можливість оцінити вплив агрегатного стану. Авторами було встановлено вагомий вплив агрегатного стану середовища на кінетику зношування.

В рідинній фазі спостерігається більш інтенсивне зношування на відміну з парогазовою. Швидкість зношування зменшується по елементам апарату у напрямку знизу вгору у відповідності з падаючим температурним режимом. Недоліками цих моделей є те, що вони не враховують всі реальні експлуатаційні фактори. Моделі характеризують залежність швидкості зношування тільки від температури та тиску при однаковому та різних агрегатних станах середовищ, але не враховують абразивне зношування та активну кислотність середовища.

В роботі [107] про довговічність деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні одержано математичну модель корозійної стійкості металів і сплавів у розчинах хлориду натрію залежно від його концентрації. Проведені дослідження дозволили на базі даних електрохімічних вимірювань прогнозувати кавітаційну стійкість матеріалів, тобто встановити взаємозв'язок між корозійною  $\Delta V_{кор.}$  та кавітаційною  $\Delta V_{заг.}$  зносостійкістю:

$$\Delta V_{заг.} = C \Delta V_{кор.}^n, \quad (1.1)$$

де  $C$  і  $n$  – дослідні коефіцієнти.

Зображена модель описує багатоциклічне поверхневе корозійно-втомне руйнування при впливі корозії на сумарний механо-хімічний знос. Рівняння (1.1) дозволяє оцінити вплив корозійної активності рідин на кавітаційно-ерозійну стійкість матеріалів при зміні концентрації хлориду натрію у воді від 0 до 3 %. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує негативний вплив

абразивних часток у сировині, сумісність матеріалів, з яких виготовлені трібо системи, та може застосовуватись у харчових середовищах.

Авторами робіт [108–110] була змодельована залежність корозійного зношування арматури залізобетонного елемента від інкубаційного періоду та концентрації хлоридів. Моделі характеризують проникнення агресивного хлоридовмісного середовища до матеріалу та залежності впливу на швидкість корозійного зношування від глибини корозійного зношування сталі, інкубаційного періоду, тобто часу, за який концентрація хлоридів досягне критичного значення, напруження та температури. Недоліком цих моделей є те, що вони не є універсальними, бо враховують дію тільки хлоридів.

В роботі розглянуто модель [111] корозійного зношування виду:

$$\frac{d\delta}{dt} = V = V_0 + m\sigma_u, \quad (1.2)$$

де  $\delta$  – глибина корозійного зношування;

$t$  – час;

$V$  – швидкість зношування напруженого металу;

$V_0$  – швидкість корозії ненапруженого металу;

$m$  – коефіцієнт, який враховує вплив напруженого стану на швидкість корозії;

$\sigma_u$  – інтенсивність напружень.

Авторами цієї моделі за допомогою математичного моделювання було встановлено, що напружено-деформований стан призводить до значного збільшення швидкості корозійних процесів, причому на швидкість корозії впливає не тільки рівень, але й вид напруженого стану. При математичному моделюванні корозійного зношування слід враховувати екстраполяційні можливості моделей не тільки за межами базового часового інтервалу, але й в умовах впливу різних прискорюючих факторів. Наведена модель враховує вплив напруженого стану, температури, пластичної деформації, але не враховує дію абразивного та корозійного середовищ і швидкості ковзання.

Автором роботи [112] представлено аналогічну модель, яка враховує вплив напруження на швидкість електрохімічної корозії. Перевагою цієї математичної моделі є те, що вона має зручність вирішувати конкретно практичні завдання, в тому числі – при отриманні аналітичних формул довговічності навантажених конструктивних елементів. Аналіз роботи показує, що модель не враховує ряд факторів, а саме – негативну дію абразивних частинок та зміни середовища. Одним з недоліків є те, що під час моделювання автор нехтує варіацією процесів в часі. Модель враховує протікання тільки суцільної корозії, що протікає по всій поверхні металу. Нерівномірність корозії визначає ступінь неоднорідності поля напружень по області конструкції, що робить її не універсальною та не враховує випадки точкової корозії.

Модель, яка розглянута в монографії [113], характеризує величину швидкості корозійно-механічного зношування. Ця модель розглядає швидкість зношування, як суму густини потоків маси окиснених та неокиснених продуктів зношування. Модель описує залежність швидкості зношування від зміни потенціалу, який залежить від властивостей матеріалів трібоелементів та характеристик корозійного середовища.

Автором робиться висновок, що швидкість зношування лінійно залежить від навантаження і швидкості ковзання і параболічно від зміцнення матеріалу корозійно-активним середовищем. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує абразивність технологічного середовища та навантаження, а також властивостей матеріалів, з яких виготовлені трібосистеми.

Кузьменко А.Г., Білокур А.П. та Вишневецький О.А. запропонували в роботі [114] модель інтенсивності лінійного зношування від основних факторів, включаючи розмір абразивних частинок, шлях тертя в точці поверхні, яка зношується, температуру абразивної суміші, температуру плавлення матеріалу зразка, тиск піску на зразок, зернистість абразиву, кінематичну в'язкість сипучого абразиву, твердість матеріалу зразка, об'єм матеріалу абразиву, об'єм води, атмосферний тиск та тиск, який виникає під впливом шару абразиву. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує твердість абразивних частинок, вплив кислотності або лужності середовища, а також швидкість ковзання та навантаження.

Основними чинниками, що впливають на швидкість зношування конвеєра, на думку авторів, є питомий тиск на нього та абразивність сировини, значення яких змінюється у часі, що представлено у вигляді математичної моделі в роботі [115]. Ця математична модель абразивного зношування конвеєра являє собою систему трьох стохастичних диференціальних рівнянь. Розроблена математична модель абразивного зношування конвеєра дозволяє спрогнозувати ресурс, але не враховує всі експлуатаційні умови. Недоліком цієї моделі, є те, що вона не враховує середовище роботи конвеєру, а саме – кислотність чи лужність сировини, вологість та різні режими роботи.

Математична модель, яка представлена в роботі [116], вивчає міграції продуктів корозії та описує кінетику швидкості корозії сталей від розчинності оксиду заліза  $Fe_2O_3$  при заданих рН та температурі і коефіцієнта масопереносу. Вона враховує дію водно-хімічного режиму, процеси утворення відкладень та концентрування корозійно-агресивних домішок, які призводять до корозійного розтріскування. Ці моделі адекватно описують корозію, масоперенос і осадження продуктів корозії. Модель не враховує дію абразивності нерозчинених окислів заліза, розглядає тільки стаціонарний режим експлуатації на номінальній потужності, також не враховуються локальні ерозійні процеси.

Модель абразивного зношування, яка представлена в роботі [117], характеризує процес, при якому глибина проникнення абразивного середовища залежить від геометрії трібоелемента, прикладеного нормального навантаження, механічних властивостей, структури та твердості, ударної в'язкості матеріалів трібоелементів, середньої відстані між абразивними частинками,



величини міжфазної тріщини. За допомогою використання цієї моделі можуть бути отримані передбачення швидкості зношування композитів при фіксованій об'ємній частці. Обмеженням, яке властиве такій моделі є те, що вона не бере до уваги додаткові механізми, які можливі в тривимірній моделі, таких як торсіонна, і режимів видалення частинок поза площиною.

Автори роботи [118] розглядають загальне зношування, як суму негативного впливу корозії матеріалу та механічної дії зовнішніх сил, при цьому спостерігається синергія цих процесів. деградація поверхні матеріалів спільною дією корозії, електрохімічної пасивації і зовнішніх механічних взаємодій. По суті, це процес, пов'язаний поверхнею, але деякі події, як виділення водню і поглинання матеріалу, можуть змінювати механічні властивості підрозділами поверхонь на матеріалах деталей. Ця модель описує трібокорозію, активність втрати матеріалу та її залежність від параметрів, таких, як трибологічні умови в контакті трібоелементів, склад середовища, температуру, швидкість потоку, рН і, в кінцевому рахунку, прикладений потенціал.

За аналогією автори цієї моделі розширили концепцію хімічної або фізичної адсорбції, що пригнічує, зміцнює або замінює електрохімічний процес пасивації. На думку авторів роботи [118], послідовне повторення деяких з цих процесів може привести до можливого синергізму між механічним навантаженням і впливом навколишнього середовища, що призводить до пошкодження поверхонь за рахунок прискореної втрати функціональних можливостей. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує дію абразивності середовища та має гетерогенну поверхню, яка є результатом послідовних механічних та корозійних взаємодій, розвиток аналізу локальних явищ на поверхнях, необхідних для прогнозування впливу різних умов навколишнього середовища.

Моделювання процесів протікання точкової корозії авторам роботи [119] дозволило отримати модель швидкості зношування від рівня активної кислотності рН, швидкості реакції та різниці потенціалів. Ця модель характеризує точкову корозію, яка виникає від тертя між двома поверхнями, при невеликих умовах навантаження зсуву в корозійному середовищі, пов'язана зі стійкістю пасивної плівки. Характеризує пасивність сплаву, чутливого до стирання, у зв'язку з тим, що механічне тертя може зруйнувати оксидний бар'єрний шар швидше, ніж бар'єрний шар може рости в метал при товщині нульового бар'єрного шару, таким чином, індуцює депасивацію.

Ця модель не враховує вплив абразивних часток, навантаження та шорсткість поверхонь трібоелементів, вона характеризує зовнішній шар, як пухкий і який легко видаляється за допомогою рухливих поверхонь трібосистем. Також до недоліків можливо віднести, що товщина оксидного шару залежить від щільності струму, а не від значення активної кислотності середовища та властивостей матеріалу. Під час аналізу сировини для виробництва паливних брикетів було поставлено наступне завдання – розробити модель трібологічної системи, яка працює в умовах абразивно-корозійного зношування з урахуванням абразивно-корозійного середовища.

## 1.6 Висновки за першим розділом

На підставі аналізу представлених вище 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 вибір сумісних матеріалів, іонно-плазмового 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.

Тому метою даної монографії є підвищення зносостійкості робочих органів шнекових екструдерів, працюючих на різних типах біомаси, та розробка рекомендацій стосовно вибору матеріалів для трібосистеми.

Для досягнення поставленої мети у подальшому в монографії вирішувались наступні завдання:

1. Розробка моделі трібологічної системи, яка працює в умовах абразивно-корозійного зношування з урахуванням абразивно-корозійного середовища.

2. Дослідження корозійних та абразивних властивостей різних типів біомаси та оцінка їх впливу на знос та втрати на тертя трібосистем.

3. Обґрунтування вибору матеріалів для шнеку і філь'єр екструдера та експериментальним шляхом оцінка їх зносостійкості.

4. Отримання критеріїв подібності між модельними та натурними трібосистемами, фізичне моделювання процесів тертя і зношування трібосистем екструдерів EB-350 і EB-350M та визначення їх ресурсу.

5. Розробка практичних рекомендацій щодо вибору матеріалів в трібосистемі екструдера, впровадження їх у виробництво і оцінка ефективності їх використання.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД В ПРОВЕДЕННІ ДОСЛІДЖЕНЬ

В даному розділі представлено методологічний підхід, який буде 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, порівняно з природним – абразивно-кислим середовищем.

#### 2.1 Системний підхід та структура досліджень

Під час досліджень складних фізичних процесів тертя та зношування в умовах граничного мащення необхідно використовувати метод системного аналізу, який наведено в роботах [120–123]. Наведений метод використовується як засіб, який дозволяє спростити та впорядкувати міркування під час розгляду складного міждисциплінарного підходу. Особливо раціональним є використання моделювання та багатофакторного експерименту. Предметом дослідження повинно стати створення нової методики швидких випробувань з мінімальними витратами матеріальних ресурсів та часу моделювання явищ тертя та зношування.

Велика доля трібологічних досліджень стосується впливу робочого середовища (перероблювальної сировини) та технологічних параметрів на довговічність та працездатність трібосистем. Рослина біомаса, така, як деревина, тирса, лузга соняшнику, лушпиння гречки та рису, відходи зернового виробництва, солома, очерет, костриця льону, які використовуються для виробництва паливних брикетів та пеллетів, має слабокисле середовище.

Висока температура та тиск, які виникають на поверхні металу, при пресуванні біомаси, посилюють активність кислот і навіть слабкі кислоти мають значний вплив на протікання корозійних процесів. Під час пресування паливних брикетів шнековим пресом (екструдером) EB-350 або EB-350M сировина, перетворюючись в брикет, змінює свої фізико-хімічні властивості. При цьому відбувається термодеструкція, яка протікає за низької вологості сировини (вологість деревинної тирси складає до 10 %, лушпиння соняшнику – до 8 %) та високої температурі до 450 °C, без доступу кисню, яка призводить до деоцетилювання геміцелюлоз, при чому відбувається утворення оцтової кислоти [10, 124]. Продукти хімічної взаємодії кислот і металу видаляються з поверхні робочих органів при їх терті по біомасі та призводять до протікання абразивно-корозійного зношування.

Органічні кислоти зі сталями або чавунами утворюють мікрогальванічні пари, які визивають міжкристалічну електрохімічну корозію. Шари, які утворюються під час поляризації, а також пасивуючі плівки безперервно видаляються з поверхні металу при терті по ній подрібненої біомаси, що значно збільшує корозію [23].

Шнековий прес (екструдер) для виробництва паливних брикетів Pini-Kau типу EB-350 та EB-350M (модифікований) складається з живильника, який має бункер та перегрівач, вертикального підпресувальника, шнекової головки, яка є основним робочим органом шнека. Екструдер EB-350 відрізняється від EB-350M тим, що має складну конструкцію шнекової головки, вона має в 2 рази більше філь'єр та конічний шнек ділиться на три частини (наконечник, хвостовик та шнек малий), які з'єднані шпилькою.

В монографії представлено дослідження трібосистеми шнекової головки екструдера EB-350, яка є дуже складною трібосистемою, яку за допомогою теорії системного аналізу можливо розділити на більш прості трібосистеми, які визначають функціональні характеристики, такі як в екструдері EB-350: «3 – наконечник + 8 – філь'єра № 5», «2 – хвостовик + 7 – філь'єра № 4», «1 – шнек малий + 4, 5 та 6 – філь'єра № 1, 2 та 3» (рис. 2.1) та в модернізованому екструдері EB-350M «1 – шнек конічний + 2, 3 та 4 філь'єра № 1, 2 та 3» (рис. 2.2).

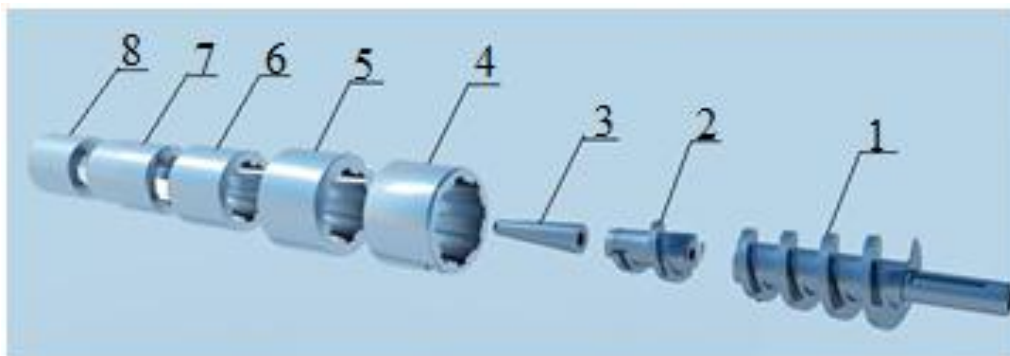


Рис. 2.1 – Зовнішній вигляд основних трібосистем EB-350: 1 – шнек малий; 2 – хвостовик; 3 – наконечник; 4 – філь'єра № 1; 5 – філь'єра № 2; 6 – філь'єра № 3; 7 – філь'єра № 4; 8 – філь'єра № 5

Були почергово змінені природні абразивно-кислотні середовища, які характерні сировині (деревинним залишкам, лушпинням соняшнику та соломи) та штучне нейтральне та лужне абразивне середовище, конструкція трібосистем, швидкість ковзання та навантаження. Параметри – такі як, матеріали, з яких вироблені трібосистеми, масштабний фактор та витрати робочого середовища, залишалися незмінними. Спираючись на мету їх рішення та поставленні завдання, було визначено загальну структуру досліджень, яку наведено у вигляді діаграми Ісікави (рис. 2.2.).

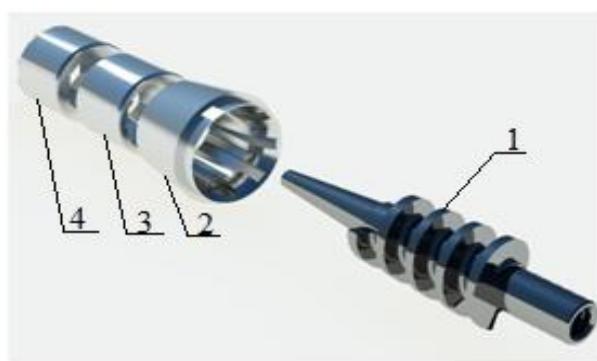


Рис. 2.2 – Зовнішній вигляд основної трібосистеми EB-350M:

1 – шнек конічний; 2 – філь'єра № 1; 3 – філь'єра № 2; 4 – філь'єра № 3

За допомогою причинно-наслідкової діаграми, діаграми Ісікави, «риб'ячої кістки» або аналізу кореневих випадкових причин можливо визначити головні параметри процесів, які впливають на досягнення поставленої мети досліджень, визначити причини або фактори, які будуть впливати на кінцевий результат [125].

Системний підхід, який є основою діаграми Ісікави, дав можливість визначити основні етапи досліджень (рис. 2.3.).

Міжнародний стандарт ГОСТ 30480 [126] встановлює загальні вимоги до методів випробувань на зносостійкість на всіх стадіях життєвого циклу виробу. Цикли випробувань повинні мати ієрархічні рівні, які передбачають використання результатів на попередньому рівні при проведенні випробувань на цих рівнях. Для вирішення поставлених завдань щодо вибору зносостійких матеріалів для виробництва робочих органів шнекових пресів та вибору середовища сировини для виробництва паливних брикетів Pini-Kay передбачаються наступні етапи досліджень.

На першому етапі – необхідно провести лабораторні дослідження середовища сировини, з якої виробляються паливні брикети Pini-Kay. Для цього розробили методику визначення активної та загальної кислотності, яка дозволить визначити рівень кислотності рослинної біомаси для моделювання кислого середовища або визначити кількість луги NaOH, KOH чи аміаку NH<sub>3</sub> для створення лужного середовища під час лабораторних досліджень корозійно-механічного зношування. Провести рейтинг корозійного та абразивного зношування. Визначити кількість необхідної луги для нейтралізації кислот, яке дасть можливість попередити корозійно-механічний знос в кислотному середовищі та визначити якість сировини.

Структура першого рівня досліджень представлена на рис. 2.4.

Метою другого етапу досліджень є визначення ресурсу, зносостійкості і втрат на тертя головних трибосистем EB-350 або EB-350M. Визначити закономірності впливу кислого, лужного та абразивного середовища на поверхнях тертя на зносостійкість та втрати на тертя, а також виконати рейтинг цих середовищ за зносостійкістю робочих органів екструдера. Такий рейтинг дасть можливість визначити головний негативний фактор та залежно від нього підібрати найбільш зносостійкі матеріали.

Структура другого етапу досліджень представлена на рис. 2.5.

Третій етап досліджень ґрунтується на тому, що за допомогою критеріїв подібності, які вказані у четвертому розділі монографії, будуть отримані результати величини швидкості зношування та сили тертя натурних трибосистем з прогнозуванням їх ресурсу. Передбачено лабораторні дослідження трибофізичних та хімічних процесів на поверхнях тертя трибосистем при використанні сировини, обробленої лугом NaOH, KOH або аміаком NH<sub>3</sub>, легованих чавунів з особливими властивостями, високолегованих сталей та покриттів для виробництва робочих органів шнекового преса EB-350.

Структура третього етапу досліджень представлена на рис. 2.6.



Рис. 2.3 – Діаграма вибору оптимального робочого середовища та матеріалів для EB-350

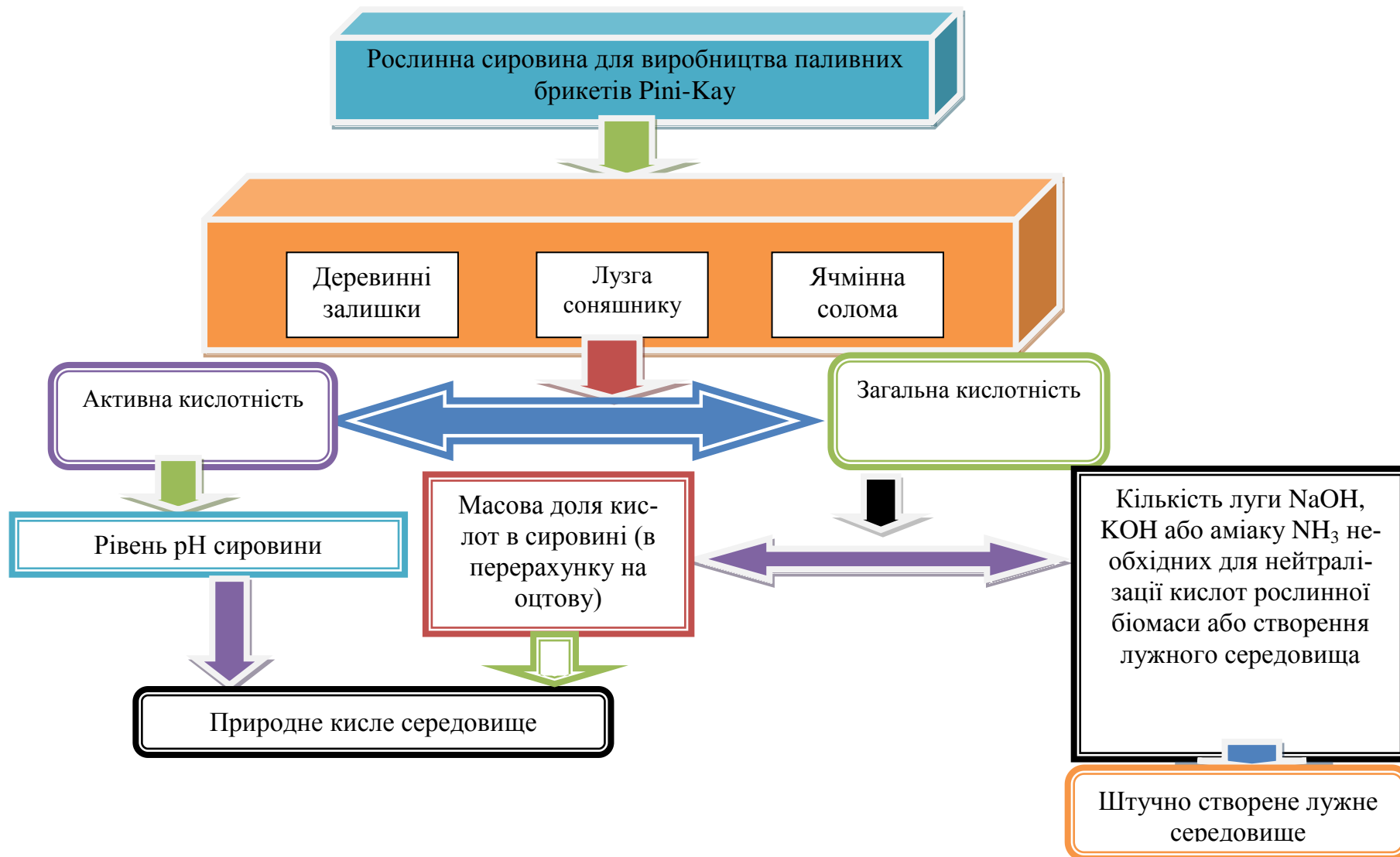


Рис. 2.4 – Структура першого етапу досліджень

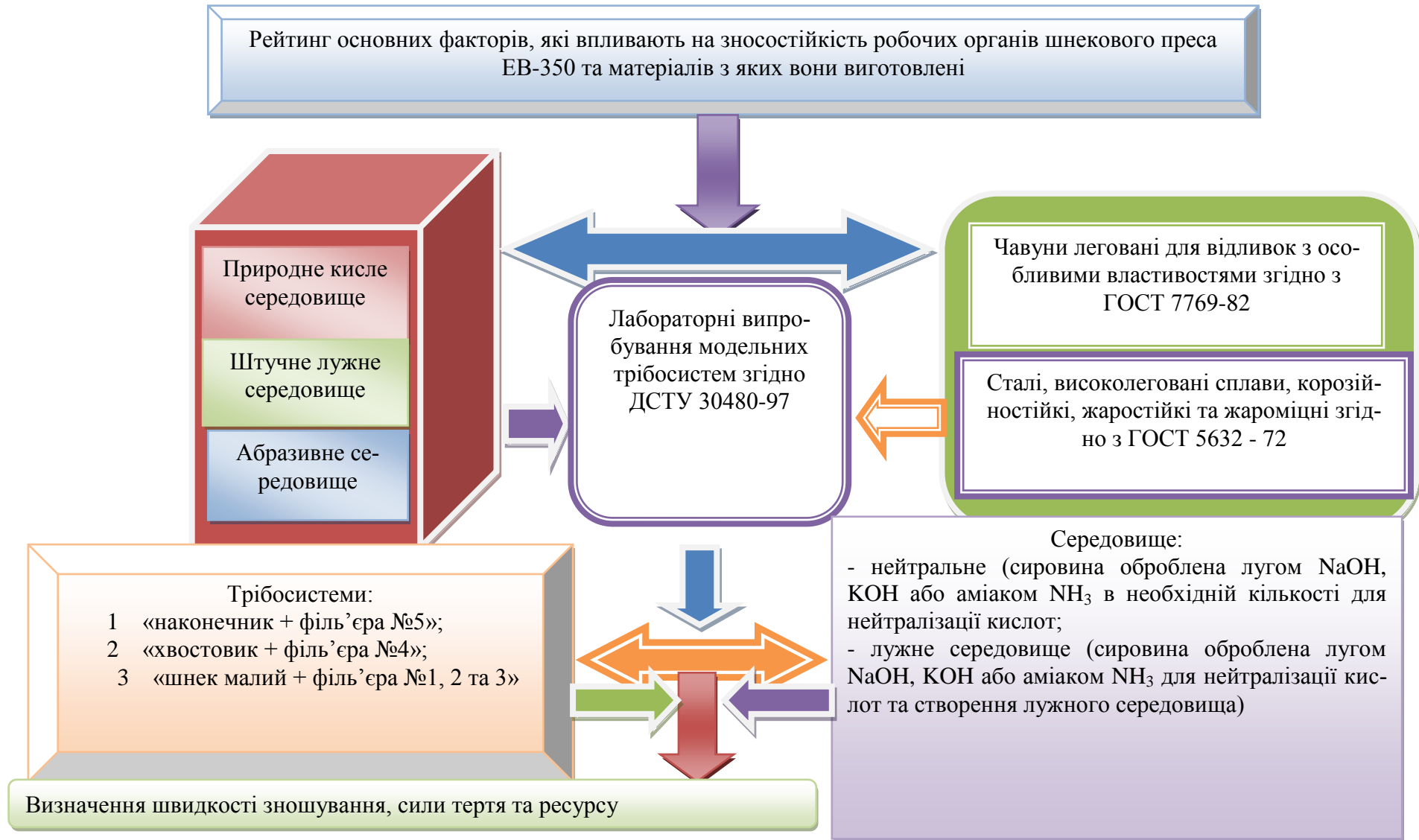


Рис. 2.5 – Структура другого етапу досліджень





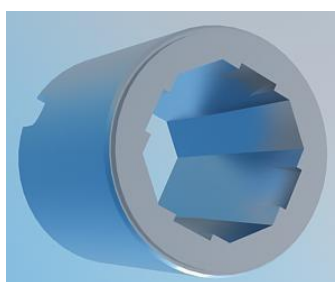
Рис. 2.6 – Структура третього етапу досліджень

Використання системного підходу дозволило визначити основні етапи досліджень та сформувати їх загальну структуру, що дозволить отримати наукові результати у вигляді залежностей зміни коефіцієнта тертя, швидкості зношування, температури в трібосистемах різних середовищ. Це дозволить розробити практичні рекомендації з вибору конструктивного рішення на етапі проектування, вибору сумісних матеріалів та середовища трібосистем шнекових пресів для виробництва паливних брикетів Pini-Kau.

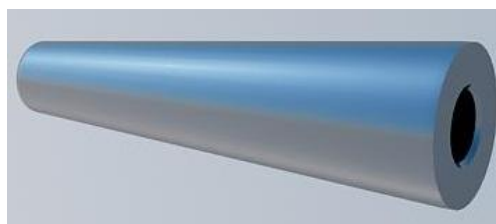
## 2.2 Обґрунтування та вибір матеріалів і робочих середовищ для проведення досліджень

На підставі аналізу зносостійкості трібосистем шнекових пресів, які були представлені в 1.2, було вибрано основні трібосистеми, які найбільш впливають на ресурс головки екструдера EB-350.

Основними трібосистемами екструдера EB-350 є наконечник + філь'єра № 5 (рис. 2.7), хвостовик + філь'єра № 4 (рис. 2.8), шнек малий + філь'єра № 1, 2 та 3 (рис. 2.9), зношування яких впливає на працездатність екструдера в цілому. Трібосистеми модернізованого екструдера EB-350М – це шнек конічний + філь'єра № 1, 2 та 3 (рис. 2.10).



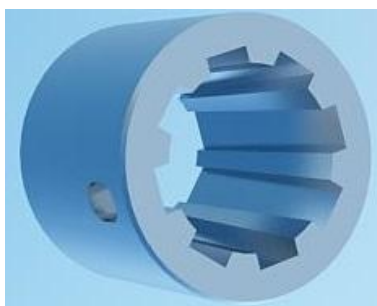
а



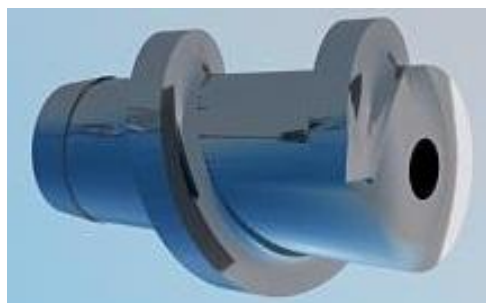
б

Рис. 2.7 – Зворотна трібосистема за матеріалами та геометрією «наконечник + філь'єра № 5»: а – нерухомий твердий елемент з більшою площею тертя (філь'єра № 5); б – рухомий м'який елемент з меншою площею тертя (наконечник)

і

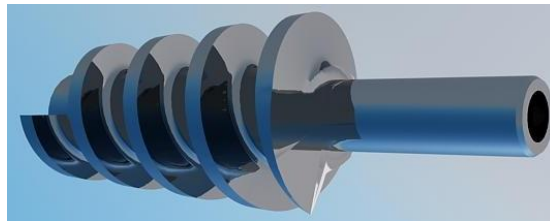


а

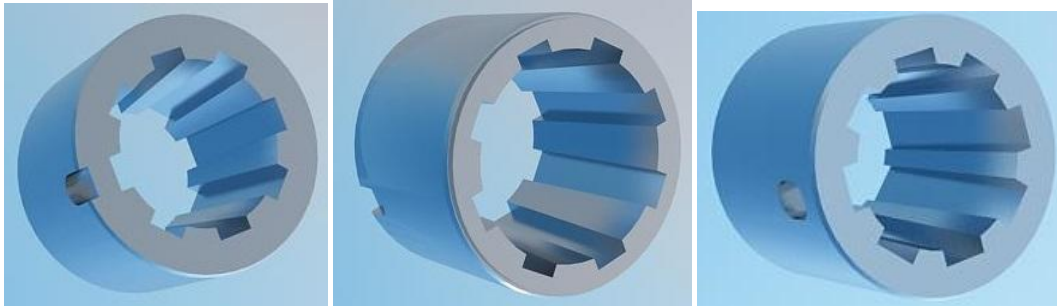


б

Рис. 2.8 – Зворотна трібосистема за матеріалами та геометрією «хвостовик + філь'єра № 4»: а – нерухомий твердий елемент з більшою площею тертя (філь'єра № 4); б – рухомий м'який елемент з меншою площею тертя (хвостовик)

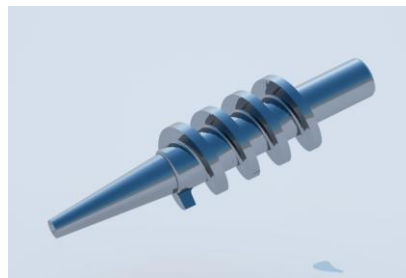


а

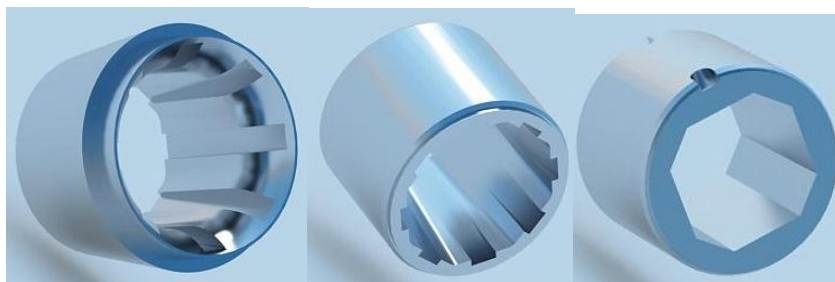


б

Рис. 2.9 – Зворотна трібосистема за матеріалами та геометрією «шнек малий + філь'єра № 1, 2 та 3»: а – рухомий м'який елемент з меншою площею тертя (шнек малий); б – нерухомий твердий елемент з більшою площею тертя (філь'єра №1, 2 та 3)



а



б

Рис. 2.10 – Зворотна трібосистема за матеріалами та геометрією «шнек конічний + філь'єра № 1, 2 та 3»: а – рухомий м'який елемент з меншою площею тертя (шнек конічний); б – нерухомий твердий елемент з більшою площею тертя (філь'єра № 1, 2 та 3)

Виходячи з паспорту екструдера для брикетування відходів ЕВ-350, гарантійний термін експлуатації екструдера складає 12 місяців (2000 годин) з дня вводу в експлуатацію, але не більше 18 місяців з дня відвантаження.

Гарантійне напрацювання хвостовика та наконечнику – 8 годин, інших швидкозношувальних частин – 150 годин. Перелік та креслення швидкозношувальних частин екструдера EB-350 представлено в додатку А.

Дані стосовно матеріалів, з яких виготовлені трібосистеми, були надані заводом-виробником ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» (м. Черкаси) відповідно до договору про співпрацю та відображено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Матеріали, з яких виготовлені натурні та модельні трібосистеми EB-350 та EB-350М

Марка екструдера	Трібосистема	Матеріал	
		Модель – Натура	Твердість
EB-350	Наконечник	40X	35-45 HRC
	Філь'єра № 5	ИЧХ22Н2	60 HRC
	Хвостовик	40X	35-45 HRC
	Філь'єра № 4	ИЧХ22Н2	60 HRC
	Шнек малий	40X	35-45 HRC
	Філь'єра № 1, 2 та 3	ИЧХ22Н2	65 HRC
EB-350М	Шнек конічний	40X	35-45 HRC
	Філь'єра № 1, 2 та 3	ИЧХ22Н2	60HRC

Лабораторні моделі натурних трібосистем, які враховують особливості конструкції та матеріали, представлено на рис. 2.11.

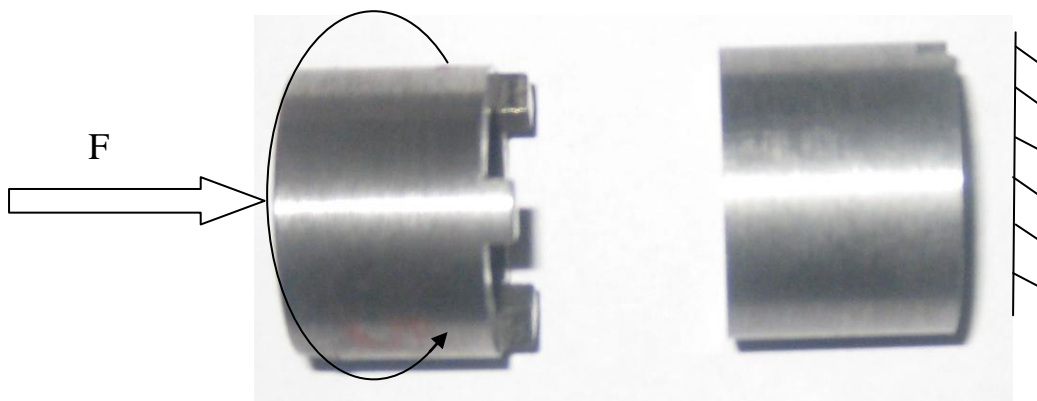


Рис. 2.11 – Зворотна трібосистема за матеріалами та геометрією «наконечник – філь'єра № 5»

Для виготовлення філь'єр були підбрані чавуни для відливок леговані з особливими властивостями. Марки та властивості чавунів, які підбрані, та які застосовувалися для виготовлення деталей шнекового преса, наведено в таблиці 2.2 та їх хімічний склад відповідно до [129].

Таблиця 2.2 – Марки та властивості чавунів

Вид чавуну	Марка	Експлуатаційні властивості	Тимчасовий опір, МПа, не менше		Твердість НВ, МПа
			розтягуванню $\sigma_r$	згину $\sigma_{zg}$	
Хромовий та високолегований	ИЧХ22Н2	Для деталей з високою стійкістю проти абразивного зносу та стиранню в умовах розмелювального обладнання, грохотів, агломашин та піско- і дробеструйних камер за підвищених температур	290	540	330–610
	ЧХ28	Використовується для деталей з високою корозійною стійкістю в розчинах кислот, луг та солей, в газах, які містять сірку або вуглекислий газ; з високим опором до абразивного зносу; жаростійкий до 1100–1300 °С	370	560	215–270
	ЧХ32		290	490	245–340

Для виготовлення філь'єр та шнеків застосовується чавун марки ИЧХ22, який має стійкість до абразивного зносу, але на відміну від чавуну ЧХ28 та ЧХ32 не володіє корозійною стійкістю в розчинах кислот, луг та солей. В газах, які містять сірку або вуглекислий газ, не є жаростійким. Виходячи з хімічного складу чавунів, чавуни ЧХ28 та ЧХ32 на відміну від ИЧХ22 в своєму складі має молібден, більше хрому, кремнію, що робить їх більш зносостійкими та корозійно-стійкими, тому були підібрані саме ці марки чавунів.

Для виготовлення шнеків були підібрані сталі, марка, класифікація, призначення яких наведено в таблиці 2.3. Виходячи з даних таблиці 2.3, сталь 95Х18, 40Х10С2М та 40Х13 на відміну від сталі 40Х мають високу зносостійкість, корозійностійкість, жаростійкість та твердість.

Для попередження виникнення корозійних процесів під впливом органічних кислот [130–136] була розроблена методика та визначена активна та загальна кислотність сировини для виробництва паливних брикетів та пеллетів з рослинної біомаси та були досліджені чинники, які впливають на визначення кислотності.

Методика визначення кислотності сировини для виробництва паливних брикетів та пеллетів з рослинної біомаси оснований на ГОСТ 26180-84 «Корма. Методи визначення аміачного азоту і активної кислотності (рН)», ГОСТ 28351-89 «Продукти хімічні органічні. Методи визначення кислотності і лужності», ГОСТ 16362-86 «Мука деревинна. Методи випробувань та ГОСТ 13496.12-98 «Комбікорми, комбікормова сировина».

Метод визначення загальної кислотності» [137–141] – це метод потенціометричного титрування світло- або темнозabarвленого екстракту сировини водним розчином гідроксиду калію. Перевагою цього методу є його точність та здатність визначати кислотність в мутних та темнозabarвлених розчинах.

Таблиця 2.3 – Властивості сталей для виробництва шнеків

Марка	Класифікація	Призначення	Твердість
90X18	Сталь корозійностійка, звичайна	Втулки, вісі, стержні, шарові та роликові підшипники та інші деталі, до яких висуваються вимоги високої твердості та зносостійкості і працюючі за температурах до 500 °С, або які зазнають дії помірних агресивних середовищ	НВ 259
40X10C2M	Сталь жароміцна, високолегована	Клапани авіадвигунів, автомобільних та тракторних дизельних двигунів, кріпильні деталі двигунів. Сталь має високі механічні властивості за температур до 600 °С та особливо за 600 °С ударна в'язкість різко знижується до 150 кДж/м <sup>2</sup> ; сталь мартенситного класу	НВ 197– 269
40X	Сталь конструкційна, легована	Вісі, вали, вал-шестерні, плунжери, штоки, колінчасті та кулачкові вали, кільця, шпинделя, оправки, рейки, губчаті венці, бовти, піввісі, втулки та інші деталі підвищеної міцності	НВ 179

Для визначення кислотності відбирали проби сировини та в різних місцях партії брали вибірку в розмірі 1 %, але не менше 3 і не більше 8 пакувальних одиниць. З кожної тари совком, або щупом (сипуча сировина), або пробовідбірником (не сипуча сировина) відбирали проби по 500 г.

Для визначення коефіцієнту поправки спиртового розчину гідроксиду калію близько 30 см<sup>3</sup> цього розчину виливали в хімічний стакан місткістю 50 см<sup>3</sup>, куди занурювали електродну пару та при постійному перемішуванні на магнітній мішалці вимірювали рН.

Коефіцієнт поправки розчину гідроксиду калію,  $k$  розраховували за формулою [139]:

$$k = \frac{10^{-(14-pH)}}{0,01}, \quad (2.1)$$

де  $10^{-(14-pH)}$  – точна концентрація розчину гідроксиду калію, моль/дм<sup>3</sup>;  
 $pH$  – активна кислотність гідроксиду калію;  
 $0,01$  – задана концентрація розчину гідроксиду калію, моль/дм<sup>3</sup>.

Для визначення коефіцієнту перерахунку на суху сировину визначили її вологість висушуванням наважки у стакані масою 5 г в сушильній електричній шафі за температури 105 °С до постійної маси та розраховували у відсотках за формулою [139]:

$$X = \frac{(m_1 - m_2) * 100}{(m_2 - m_0)}, \quad (2.2)$$

де  $m_1$  – маса стакану з наважкою до сушки, г;  
 $m_2$  – маса стакану з наважкою після сушки, г;  
 $m_0$  – маса стакану, г.

Коефіцієнт перерахунку на суху сировину розраховували за формулою [139]:

$$v = \frac{(100 - X)}{100}, \quad (2.3)$$

де  $X$  – вологість сировини, розрахована за формулою (2.2).

Для приготування водного екстракту сировини використовували установку для екстрагування. Екстракт фільтрували крізь воронку за допомогою фільтру, який промивали водою. Відміряли 200 см<sup>3</sup> фільтрату та кількісно переносили в хімічний стакан об'ємом 400 см<sup>3</sup>.

Перед початком вимірювання рН або іонометр калібрували за допомогою буферних розчинів стандарт-титрів.

Для вимірювання загальної та активної кислотності у склянку з екстрактом занурювали електроди рН-метра, визначали активну кислотність рН та за допомогою бюретки титрували розчином гідроксиду калію з концентрацією розчину 0,01 моль/дм<sup>3</sup> до рН 8,2 по рН- або іонометру, при цьому використовували магнітну мішалку.

Аналогічно, без проби проводили холостий дослід. Для цього дистильовану воду кип'ятили в тих же умовах 1 годину та титрували гідроксидом калію з концентрацією розчину 0,01 моль/дм<sup>3</sup> до рН 8,2 по рН або іонометру аналогічно екстракту.

Кислотність ( $Z$ ) в міліграмах КОН на грам сухої сировини визначали за формулою:

$$Z = \frac{(V_c - V_b) * 0,01 * k * 56,1 * 250}{(m_2 - m_1) * v * 200}, \quad (2.4)$$

де  $V_c$  – об'єм розчину гідроксиду калію з концентрацією 0,01 моль/дм<sup>3</sup>, використаного на титрування, см<sup>3</sup>;

$V_B$  – об’єм розчину гідроксиду калію з концентрацією 0,01 моль/дм<sup>3</sup>, використаного в холостому досліді, см<sup>3</sup>;

$k$  – коефіцієнт поправки гідроксиду калію, розраховували за формулою (2.1);

56,1 – молярна маса гідроксиду калію, г/моль;

250 – об’єм води, використаної для приготування екстракту, см<sup>3</sup>;

0,01 – молярна концентрація гідроксиду калію, моль/дм<sup>3</sup>;

$m_2$  – маса стакану для зважування з сировиною, г;

$m_1$  – маса стакану для зважування, г;

$v$  – коефіцієнт перерахунку на суху сировину, розраховували за (2.3);

200 – об’єм екстракту, взятого для титрування, см<sup>3</sup>.

За результат прийняли середнє арифметичне значення результатів двох паралельних експериментів, абсолютна різниця між якими не є більшою ніж 0,02 мг КОН/г. Результат експерименту округлили до другого десяткового знаку.

Масова доля кислот в сировині у відсотках (в перерахунку на оцтову кислоту) визначалася за формулою:

$$\omega = \frac{0,0006 \cdot (V_C - V_B) \cdot 250 \cdot (100 + X)}{(m_2 - m_1) \cdot 200} \quad (2.5)$$

де 0,0006 – маса оцтової кислоти, що відповідає 1 см<sup>3</sup> розчину гідроксиду калію концентрації 0,01 моль/дм<sup>3</sup>, г/см<sup>3</sup>.

Методика визначення активної та загальної кислотності паливних брикетів з рослинної біомаси опублікована в роботі [142].

Для визначення вмісту мінеральних домішок рослинної сировини для виробництва твердого біопалива була розроблена методика, яка оснований на ГОСТ 30483-97 «Зерно. Методи визначання загального і фракційного вмісту смітної та зернових домішок; вмісту дрібних зерен і крупності; вмісту зерен пшениці, пошкоджених клопом-черепашкою; вмісту металоманітних домішок» та ГОСТ 18320-78 «Тирса деревинна технологічна для гідролізу. Технічні умови». Її основою є метод просіювання сировини для визначення вмісту макрочастинок (гальки та каміння) сировини та відстоюванні – для визначення мікрочастинок (піску, ґрунту) мінеральних домішок. Перевагою цих методів є їх точність, здатність визначати вміст мінеральних домішок різних розмірів та всіх типів сировини.

Визначення вмісту мінеральних (абразивних) домішок в рослинній сировині для виробництва твердого біопалива проводили в два етапи. На першому етапі з наважки рослинної сировини виділяли та визначали масову долю мінеральних домішок (макрочастинок) розміром більше 3 мм.



На другому етапі визначали масову долю мікрочастинок абразивних, мінеральних домішок розміром менш 3 мм.

З середньої проби сировини виділяли наважку масою 10 г та зважували її з точністю до першого десятинного знаку. Наважку просівали на ситі діаметром отворів 3 мм на лабораторному розсіві протягом 15 хвилин. Виявлені на ситі мінеральні домішки зважували з точністю до другого десятинного знаку.

Вміст мінеральних домішок більше 3 мм визначали за формулою:

$$Z = \frac{m_{\text{мак.}} \cdot 100}{10} = 10 \cdot m_{\text{мак.}}, \quad (2.6)$$

де  $m_{\text{мак.}}$  – маса мінеральних макродомішок, г;  
10 – маса наважки, взятої для дослідження, г.

Для визначення вмісту мікродомішок мінерального походження наважку сировини масою 2 г, висушеної до постійної маси, яка попередньо була просіяна крізь сито діаметром отворів 3 мм, висипали в металевий стакан з отворами діаметром 3 мм, місткістю 250 мл, який ставили в фарфоровий або скляний стакан місткістю 500 мл, в який попередньо був залитий розчин повареної солі щільністю 1,6 г/см<sup>3</sup>. Після розмішування металевий стакан був закріплений на штативі, а суспензія відстоювалась. Після відстоювання металевий стакан з сировиною без домішок був вийнятий.

Отримані після відстоювання мінеральні домішки з розчином повареної солі переносили у воронку з фільтром, який попередньо зважували з похибкою не більше 0,01 г. Відкинутий з фільтру осад двічі промивали дистильованою водою, а фільтр з мінеральними домішками після промивання гарячою водою сушили у сушильній шафі за температури (105 ± 5) °С до постійної маси і зважували з похибкою не більше 0,01 г.

Масову долю мінеральних мікродомішок розраховували за формулою:

$$Y = \frac{m_{\text{мік.}} \cdot 100}{2} = \frac{100 \cdot (m_{\text{ф.2}} - m_{\text{ф.1}} + m_{\text{в.}})}{2} = 50 \cdot (m_{\text{ф.2}} - m_{\text{ф.1}} + m_{\text{в.}}), \quad (2.7)$$

де  $m_{\text{мік.}}$  – маса мінеральних мікродомішок, г;  
 $m_{\text{ф.2}}$  – маса фільтра після фільтрування, г;  
 $m_{\text{ф.1}}$  – маса фільтра до фільтрування, г;  
 $m_{\text{в.}}$  – маса відкинутого осаду, г;  
2 – маса наважки сировини, г.

Масову долю мінеральних мікро- та макродомішок розраховували за формулою:

$$X = Z + Y = 10 \cdot m_{\text{мак.}} + 50 \cdot (m_{\text{ф.2}} - m_{\text{ф.1}} + m_{\text{в.}}) \quad (2.8)$$

Дослідження проводили двома паралельними випробуваннями, різниця між якими не перевищувала 1 %.

### 2.3 Лабораторне обладнання для проведення експериментальних досліджень

Для дослідження швидкості зносу робочих органів трібосистем екструдера ЕВ-350 при використанні різних середовищ рослинної сировини та визначення коефіцієнту тертя було використано машину тертя, яку представлено на рис. 2.12. Для того, щоб зменшити витрати та час, необхідний для вивчення тріботехнічних характеристик тих чи інших трібосистем, застосовували методику фізичного моделювання, яка представлена в роботах [143–149].

При використанні фізичного моделювання вирішувалися завдання виявлення залежностей швидкості зношування, сили тертя для натурної трібосистеми за даними досліджень експерименту.



Рис. 2.12 – Зовнішній вигляд машини тертя

Приведена машина тертя має можливість визначити швидкість зношування всіх змодельованих у зменшеному масштабі трібосистем з урахуванням конструкційних особливостей, матеріалів робочих органів та середовища. За допомогою електронного тензодатчику – приладу, який вимірює прикладену силу, можливо визначити коефіцієнт тертя та силу тертя. Дослідження по визначенню швидкості зношування робили за схемою «кільце-кільце», розміри

та форма зразків для модельних тріботехнічних випробувань були відповідно до вимог ДСТУ 30480-97. При цьому коефіцієнт взаємного перекриття  $k_{вз} = 0,2$ . Випробування проводились при навантаженні від 800 Н до 1200 Н та швидкості ковзання 0,5 м/с. Час дослідження склав 10 – 30 хв. з попереднім відпрацюванням зразків [149–150]. Гострі кромки дослідних зразків притуплялися до радіусу 0,5 мм, а шорсткість зразків складала  $R_a \leq 0,20$  мкм, відбувався контроль спряження торцевих поверхонь за величиною контактної площі, яка повинна бути не менше 90 % робочої поверхні будь якого зразка.

Під час аналізу роботи [151], де наведено аналіз існуючих методів визначення зносу, найбільш вдалим для рішення поставленого завдання було обрано метод штучних баз, завдяки якому можливо визначити лінійний знос усіх елементів трібосистеми. Даний метод регламентується ГОСТ 23.301-78, сутність визначення зносу описана в роботі [152]. Головною відмінністю методики, яка була використана, від методики, що приведена в роботі [153] є застосування алмазного конуса з кутом при вершині  $120^\circ$  замість квадратної алмазної піраміди з кутом при вершині між протилежними гранями  $136^\circ$ .

Мікротвердість поверхонь тертя вимірювалась стаціонарним твердоміром по Мікро-Віккерсу UIT-NVmicro-1 УКРІНТЕХ.

Вимірювання мікротвердості робили за показником навантаження 0,5Н, результати фіксували в цифровому форматі, використовуючи спеціальне програмне забезпечення. Принцип методики полягає в тому, що визначення мікротвердості поверхні тертя відбувалося за різних навантажень алмазної пірамідки від 0,02Н до 2Н. При цьому за допомогою розрахунків визначалась глибина занурення піраміди. За допомогою цієї залежності можливо визначити глибину наклепаного шару дослідної поверхні тертя.

Шорсткість поверхні зразків трібосистем визначалась за допомогою портативного вимірювача шорсткості TR 100 (UIT) згідно ГОСТ 2789-73.

Металографічні дослідження проводилися з використанням методу растрової електронної мікроскопії (РЕМ) за допомогою автоемісійного растрового електронного мікроскопу моделі JSM-7001F (JEOL), який завдяки використанню у ньому електронної пушки з польовою емісією (катодом Шотки) (Т-FE), сучасної технології формування зображення та комп'ютерної технології дали можливість не тільки спостерігати тонкі структури поверхні зразка з високою роздільною здатністю (2 нм), але і виконати локальний аналіз елементного складу методом енергодисперсної спектроскопії (EDX).

## **2.4 Планування експерименту та обробка експериментальних даних**

Використовуючи аналіз літературних джерел [154–155], під час планування експерименту було використано повний трьохфакторний план Бокса-Бенкена (таблиця 2.4). Цей план дозволяє отримати однаково дисперсію значень функцій відклику в усіх рівновіддалених від центру плану експерименту точках.

Статистичну оцінку значущості коефіцієнтів регресії робили, використовуючи критерій Стьюдента, а перевірку відповідності регресійного рівняння – за допомогою критерія Фішера.

Розрахунок критерія Фішера проводили, використовуючи значення дисперсії відтворюваності та адекватності, які мають бути меншими від табличних, якщо довірна вірогідність склала 0,95.

Кількість дослідів, які повторювались, визначали за допомогою критерія Кохрена.

Обрані фактори, які впливають на протизносні та антикорозійні властивості:

- рівень активної кислотності середовища створений лугом NaOH, рН;
- відсотковий вміст абразивних домішок сировини створений діоксидом кремнію;
- навантаження на робочі органи шнекового преса для виробництва паливних брикетів.

Таблиця 2.4 – План трьохфакторного експерименту

Номер експерименту	Фактори		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	0	-1	-1
2	0	1	-1
3	0	-1	1
4	0	1	1
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	-1	-1	0
10	1	-1	0
11	-1	1	0
12	1	1	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Виходячи з аналізу літературних джерел [11, 129, 133–135], були визначені граничні межі рівня активної кислотності рН, вмісту легованих елементів чавунів, сталей та вмісту абразивних частинок.

Під час проведення експерименту в якості функції відклику були обрані такі показники:

- швидкість зношування I, мкм/год.;
- сила тертя  $F_{\text{тер.}}$ , Н.

Отримані регресійні рівняння дозволили вирішити оптимізаційну задачу щодо вибору відсоткового вмісту легуючих компонентів та рівня активної кислотності по наступним показникам:

$$I \rightarrow \min; F_{\text{тер.}} \rightarrow \min.$$

Кодування рівнів та факторів варіювання представлено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Рівні та фактори варіювання

Фактори	Одиниця виміру	Позначення	Рівні варіювання		
			-1	0	1
Рівень активної кислотності	pH	X1	5	8	11
Абразивність	%	X2	0	5	10
Навантаження	H	X3	800	1000	1200

Під час дослідження процесів тертя та зношування різних трібосистем з урахуванням конструкції, активного середовища, навантаження та швидкості ковзання функціями відклику є величина швидкості зношування та коефіцієнт тертя, який характеризує механічні втрати та час відпрацювання.

## 2.5 Висновки за другим розділом

1. Визначено структуру досліджень, яка включає три етапи. На першому етапі було обрано базове робоче середовище. Під час другого етапу заплановано лабораторні дослідження модельних трібосистем. Третій етап – за допомогою фізичного моделювання та критеріального підходу виконати оцінку ресурсу та витрат на тертя натурних трібосистем екструдера EB-350 та розробити рекомендації виробникам цих машин.

2. Наведено обґрунтування вибору матеріалів для виготовлення модельних трібосистем та робочих середовищ. Матеріали, з яких виготовлені лабораторні зразки, є такими, з яких виготовлені натурні трібосистеми.

3. Обрано лабораторне обладнання для проведення експериментальних досліджень, нормативна база (ГОСТ, ДСТУ та інструкції виробника) по застосуванню такого обладнання, методичний підхід для планування експерименту, визначення результатів експерименту, пошуку оптимальних рішень.

4. Розроблено та опубліковано методики визначення активної та загальної кислотності сировини та паливних брикетів, а також методика визначення вмісту абразиву в сировині для виробництва паливних брикетів.

5. Сплановано трьохфакторний експеримент для визначення рівня кислотності та вибору матеріалів залежно від легуючих компонентів, робочих рідин з лужним середовищем.

### РОЗДІЛ 3

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ТРІБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ЕКСТРУДЕРІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ У КИСЛОТНИХ ТА ЛУЖНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У цьому розділі монографії наведено вирішення основних завдань цієї роботи. Перше завдання полягає в розробці моделі трібологічної системи працюючої в умовах абразивно-корозійного зношування. Друге завдання полягає в дослідженні корозійних та абразивних властивостей різних типів біомаси та оцінці їх впливу на знос та втрати на тертя трібосистем. Вирішенням третього завдання є обґрунтування вибору матеріалів для шнека і філь'єр екструдера та оцінка експериментальним шляхом їх зносостійкості.

### **3.1 Визначення параметрів робочого середовища, в яких працюють трібосистеми екструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М, активної і загальної кислотності та абразивності сировини для виробництва паливних брикетів**

Під час вирішення другого завдання дослідження, а саме – виборі кислотного або лужного середовища рослинної сировини для виробництва паливних брикетів, було проведено лабораторні дослідження для визначення трібологічних характеристик за розробленими методиками, які приведено у другому розділі монографії.

Для дослідження основних чинників, які впливають на визначення кислотності, використовували деревинні залишки сосни, лушпиння соняшнику, пшеничну та ячмінну солому.

Таблиця 3.1 – Значення загальної кислотності залежно від ступеня подрібнення (дисперсності) сировини

Ступінь подрібнення (дисперсності) сировини, мм	Загальна кислотність деревинних залишків сосни, мг/г	% змінення загальної кислотності деревинних залишків	Загальна кислотність лузги соняшнику, мг/г	% змінення загальної кислотності лузги соняшнику	Загальна кислотність соломи, мг/г	% змінення загальної кислотності соломи
3,0	0,141	-	0,585	-	0,047	-
1,0	0,194	27,37	0,628	14,48	0,066	28,57
0,5	0,235	40,00	0,684	6,77	0,071	33,33

Подрібнення твердої сировини з метою прискорення процесу дифузії є однією з важливих стадій підготовки сировини, яка забезпечує повноту розчинності речовин. Для вивчення впливу ступеня подрібнення рослинної сировини

вини на розчинність органічних речовин сировину подрібнювали до часток, що проходять крізь сито з діаметром отворів 0,5, 1,0 та 3,0 мм та проводили екстракцію за температури 100 °С. Встановлено, що оптимальним ступенем подрібнення для екстракції даного виду сировини є розмір частинок від 0,5–1,0 мм (таблиця 3.1). З таблиці 3.1 видно, що зі збільшенням ступеня подрібнення загальна кислотність сировини зростає.

Для інтенсифікації процесу дифузії речовин з сировини необхідно враховувати чинник температури. Зі збільшенням температури розчинність компонентів збільшується. На підставі даних аналізу встановлено, що оптимальним розчинником для вилучення органічних речовин є кипляча вода (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Значення кислотності залежно від температури екстракції

Температура екстракції, °С	Загальна кислотність деревинних залишків сосни, мг/г	% зміння загальної кислотності деревинних залишків	Загальна кислотність лузги соняшнику, мг/г	% зміння загальної кислотності лузги соняшнику	Загальна кислотність соломи, мг/г	% зміння загальної кислотності соломи
20	0,214	-	0,638	-	0,069	-
50	0,248	13,75	1,270	49,76	0,123	43,99
100	0,397	46,09	1,401	54,44	0,131	47,33

Для визначення тривалості розчинення проводили екстракцію подрібненої сировини киплячою водою в співвідношенні 1:25 за температури 100 °С і постійному помішуванні через задані проміжки часу (30, 60, 90 хв.). Експериментальні дані свідчать про те, що розчинення органічних речовин достатньо проводити протягом 1 часу (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Значення кислотності залежно від часу екстракції

Час екстракції, хв.	Загальна кислотність деревинних залишків сосни, мг/г	Загальна кислотність лузги соняшнику, мг/г	Загальна кислотність соломи, мг/г
30	0,382	1,382	0,104
60	0,397	1,401	0,131
90	0,400	1,417	0,141

Для визначення необхідної кількості води для екстракції були проведені дослідження залежності виходу органічних кислот від співвідношення сировини та екстрагенту, в результаті чого були підібрані оптимальні співвідношення для екстракції водою з співвідношенням 1:50 (таблиця 3.4). Під час екстракції 1:10 відбулося набрякання сировини, особливо інтенсивно набрякали

деревинні залишки. Після фільтрування з 100 см<sup>3</sup> екстрагенту було отримано всього 25 см<sup>3</sup> фільтрату.

Врахувавши чинники, які впливають на кислотність, визначили за методикою активну (рН) та загальну кислотність (таблиця 3.5). Загальна кислотність лузги соняшнику більша, а активна менша, ніж у деревинних залишків, це обумовлено тим, що лузга соняшника містить 4–5 % жирних кислот, які погано дисоціюють у воді, але з лугом вступають у хімічну реакцію. Масова доля кислот в сировині у відсотках (в перерахунку на оцтову) наведено у таблиці 3.6.

Таким чином, визначивши рівень кислотності для моделювання середовища можливо провести експеримент з визначення зносостійкості та сумісності підібраних матеріалів, що дасть змогу зробити рейтинг зношування в кислотному та абразивному середовищах.

Таблиця 3.4 – Значення кислотності залежно від співвідношення «сировина та екстрагент»

Співвідношення, сировина та екстрагент	Загальна кислотність деревинних залишків сосни, мг/г	Загальна кислотність лузги соняшнику, мг/г	Загальна кислотність соломи, мг/г
1:10	0,032	0,213	0,034
1:25	0,093	0,375	0,043
1:50	0,214	0,638	0,069
1:60	0,227	0,647	0,068

Таблиця 3.5 – Активна та загальна кислотність, яка визначена за приведеною методикою

Тип сировини	Активна кислотність (рН)	Загальна кислотність, мг/г
Деревинні залишки	5,25	0,397
Лузга соняшнику	5,65	1,401
Солома	6,35	0,131
Пріла лузга соняшнику	4,25	5,693

Таблиця 3.6 – Масова доля кислот в сировині (в перерахунку на оцтову)

Тип сировини	Вміст кислот (в перерахунку на оцтову), %
Деревинні залишки	0,11
Лузга соняшнику	0,37
Солома	0,03

Найбільшу загальну кислотність має лузга соняшнику, потім деревинні залишки, а найменшу – солома. Пріла сировина, яка зберігалась у вологому



середовищі, збільшує свою загальну кислотність у 5–8 разів. Так, пріла лузга соняшнику, яка не має сторонніх запахів та зовнішніх негативних ознак, має загальну кислотність 5,693 мг/г.

Знання кислотності дозволить при розробці нового обладнання робити правильний вибір матеріалу робочих органів, яке контактує з сировиною для виробництва паливних брикетів та пеллетів з рослинної біомаси.

Основними чинниками, які впливають на визначення кислотності, є ступінь подрібнення, температура, час екстрагування та співвідношення сировини і екстрагенту. При збільшенні температури та ступеню подрібнення загальна кислотність зростає.

Для дослідження активної та загальної кислотності при виробництві паливних брикетів була взята деревинна жижка, яка є продуктом піролізу та накопичується на внутрішніх та зовнішніх поверхнях брикетів.

Для знаходження точки еквівалентності були побудовані криві титрування. На рис. 3.1 зображено інтегральну криву титрування деревинної жишки 0,1 нормальним розчином гідроксиду натрію. Завдяки методу Гоббса, була визначена точка переходу з кислого середовища в лужне та кінцева точка титрування, середні значення для двох паралельних вимірювань відповідно склали 8,4 рН та 11,4 мл 0,1 нормального розчину гідроксиду натрію.

Для більш точнішого визначення точки еквівалентності були побудовані диференціальні криві першого та другого порядку (рис. 3.2 та 3.3).

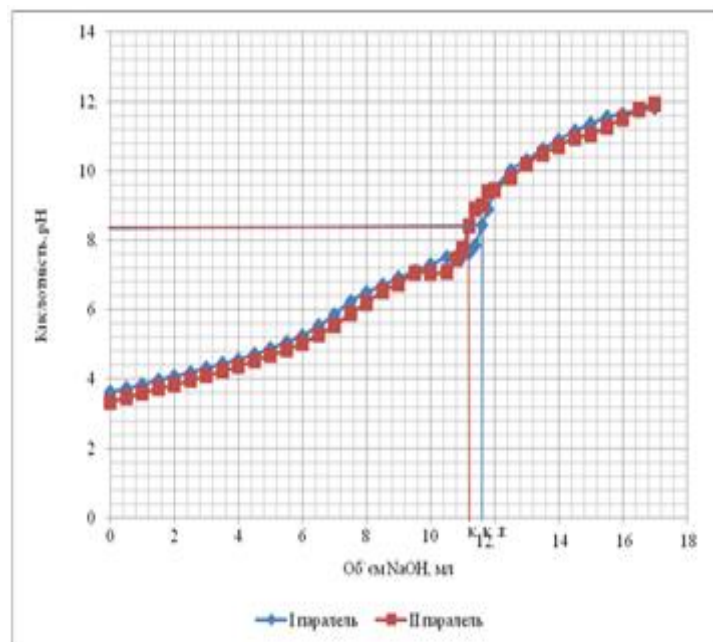


Рис. 3.1 – Інтегральна крива титрування деревинної жишки 0,1 нормальним розчином гідроксиду натрію

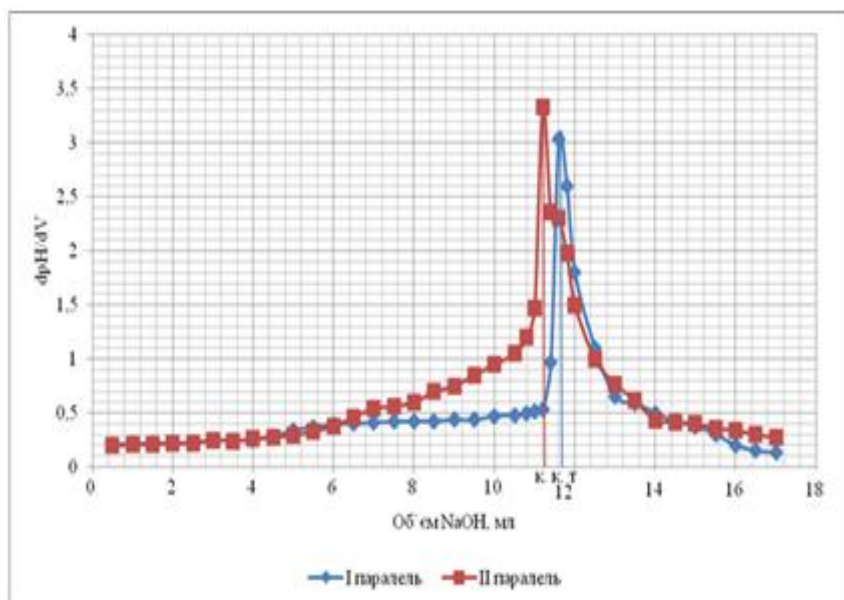


Рис. 3.2 – Диференціальна крива титрування I-го порядку деревинної жижки 0,1 нормальним розчином гідроксиду натрію

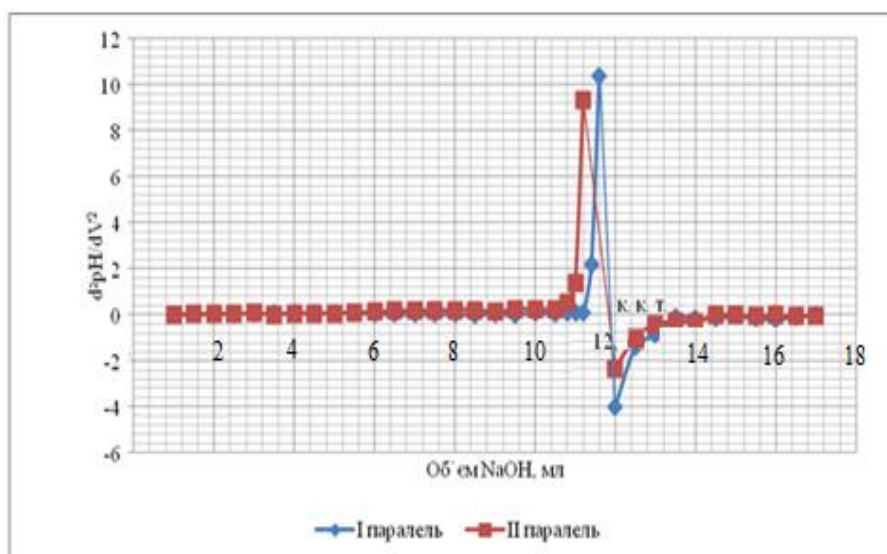


Рис. 3.3 – Диференціальна крива титрування II-го порядку деревинної жижки 0,1 нормальним розчином гідроксиду натрію

У таблиці 3.7 наведено активну загальну кислотність та вміст кислот (в перерахунку на оцтову) деревинної жижки та залишків, які визначені за наведеною методикою. Під час пресування деревинних залишків відбувається піроліз, що зменшує активну кислотність в 1,5 рази, збільшує загальну кислотність в 407 раз та вміст кислот (в перерахунку на оцтову) на 16,38 %.

Таблиця 3.7 – Активна загальна кислотність та вміст кислот (в перерахунку на оцтову) деревинної жишки та залишків, які визначені за наведеною методикою

Тип сировини	Активна кислотність (pH)	Загальна кислотність, мг/г	Вміст кислот (в перерахунку на оцтову), %
Жишка деревинна	3,48	109,931	16,49
Деревинні залишки	5,25	0,27	0,11

Розроблена методика для визначення загальної та активної кислотності, яка відрізняється від відомих методик тим, що дозволяє визначити активну та загальну кислотність паливних брикетів, а саме деревинної жишки, яка є рідким продуктом піролізу деревинних залишків, та визначити кількість необхідної луги для нейтралізації кислот. Це дає можливість розробити заходи щодо попередження корозійно-механічного зношування в кислотному середовищі та визначити якість паливних брикетів. Під час лабораторних досліджень за методикою, яка була наведена в другому розділі, було визначено вміст абразивних, мінеральних мікро- та мікрочасток рослинної сировини для виробництва твердого біопалива.

Для дослідження вмісту мінеральних мікро- та макродомішок рослинної сировини, твердого біопалива були взяті деревинна тирса (сосни), лушпиння соняшнику, солома ячменю, які є основною сировиною.

В таблиці 3.8 представлено результати досліджень мінеральних мікро- та макродомішок, динаміка яких співпадає з міжнародними та європейськими стандартами DIN 51731, DIN plus, EN-B на вміст золи у паливних гранулах за певним типом сировини.

Таблиця 3.8 – Вміст мінеральних, абразивних мікро- та макродомішок, рослинної сировини для виробництва твердого біопалива

Тип сировини	Вміст мінеральних макродомішок, %	Вміст мінеральних мікродомішок, %	Загальний вміст домішок, %
Деревина тирса з сосни	0,8	1	1,8
Лушпиння соняшника	3,9	2,8	6,7
Солома ячменю	3	9	12

Найбільший вміст мінеральних макродомішок має лушпиння соняшнику – 3,9 %, потім солома ячменю – 3 %, а найменший – деревинна тирса 0,8 %. Найменший вміст мінеральних мікродомішок має деревинна тирса – 1 %, потім лушпиння соняшнику – 2,9 %, а найбільший – солома ячменю.

Найбільший вміст мінеральних, абразивних мікро- та макродомішок, має солома ячменю – 12 %, що на 4 % більше від допустимого, лушпиння соняшнику – 6,7 %, що на 4,1 % більше від допустимого з міжнародними та європейськими стандартами DIN 51731, DIN plus, EN-B, а найменший – деревинна тирса – 1,8 %, що на 0,9 % більше від допустимого.

### 3.2 Математичне моделювання трибологічних характеристик сумісних матеріалів робочих органів екструдерів

Під час експлуатації екструдерів відбувається складний процес корозійно-абразивного зношування. При цьому загальна швидкість зношування буде залежати від середовища, абразивності, величини шорсткості, навантаження та швидкості ковзання. Загальна залежність швидкості зношування від перерахованих факторів буде мати вигляд:

$$I_{\text{заг.}} = I_{\text{сер.}} + I_{\text{абр.}} + I_{\text{шор.}}, \text{ мкм/год.}, \quad (3.1)$$

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 рН. Активна кислотність рН сировини характеризує силу водню та означає концентрацію іонів водню ( $\text{H}^+$ ) тобто, термодинамічну активність гідроксид-іонів. Активна лужність рОН характеризує силу гідроксид-іонів.

В нейтральному середовищі концентрації іонів водню ( $\text{H}^+$ ) і гідроксид-іонів ( $\text{OH}^-$ ) однакові і складають  $10^{-7}$  моль/л, тобто, середовище має нейтральний вплив на процес зношування. При додаванні до води кислоти сила іонів водню збільшується, а сила гідроксид-іонів, відповідно, зменшується. При додаванні луги – навпаки, зростає сила гідроксид-іонів, а сила іонів водню зменшується. Коли ( $\text{H}^+$ ) > ( $\text{OH}^-$ ) розчин є кислотним, а при ( $\text{OH}^-$ ) > ( $\text{H}^+$ ) – лужним [156]. З урахуванням параметра, який враховує структуру сполучених матеріалів у трібосистемі та їх сумісність між собою, –  $\alpha_{\text{вт.}}$ , 1/м [127], швидкість зношування під дією середовища буде мати вид:

$$\begin{aligned} I_{\text{сер.}} &= S \cdot (pH - pOH)^2 = S \cdot (pH - (14 - pH))^2 = \\ &= S \cdot (2pH - 14)^2, \text{ мкм/год.} \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $S$  – коефіцієнт, який враховує сумісність матеріалів, має вигляд:

$$S = K_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \text{ мкм/год.} \quad (3.3)$$

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. Для оцінки форми твердих часточок з врахуванням радіусів контактних поверхонь автором роботи [157] було запропоновано критерій, названий коефіцієнтом форми абразивної частинки:

$$K_a = \frac{M(n_i)M(D_i - d_i)}{M(r_i)}, \quad (3.4)$$

де  $M(n_i)$ ,  $M(D_i - d_i)$  та  $M(r_i)$  – математичне очікування відповідно для числа вершин, різницю діаметрів окружностей, описаних довкола контуру та вписаної в контур зерна, та їх радіусів при вершині одиничного виступу.

Здатність абразивних часточок впроваджуватися в поверхневий шар та руйнувати його при русі, наближено оцінюється по відношенню твердості абразиву  $H_a$  та випробуваного матеріалу  $H$ :

$$K_m = \frac{H_a}{H}, \quad (3.4)$$

Негативний вплив абразиву на швидкість зношування оцінюється за допомогою виразу:

$$I_{абр.} = K_2 \cdot K_a \cdot K_m \cdot A_{абр.}, \text{ мкм/год.} \quad (3.5)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт пропорційності для абразивного зношування, мкм/кг·год.;

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

Швидкість зношування залежно від шорсткості  $Ra$ , навантаження  $N$  та швидкості ковзання  $\vartheta$  розраховується за формулою:

$$I_{шор.} = K_{шор.} \cdot \vartheta \cdot N, \text{ мкм/год.} \quad (3.6)$$

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

$$K_{шор.} = K_3 \cdot \frac{Ra_{п.}}{Ra_{б.}}, \quad (3.7)$$

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

$Ra_{б.}$  – шорсткість базового трібоелемента, мкм;

$Ra_n$  – шорсткість підбраного трібоелемента, мкм.

Загальна швидкість зношування прийме вид:

$$I_{\text{заг.}} = S \cdot (2pH - 14)^2 + K_2 \cdot K_a \cdot K_T \cdot A_{\text{абр.}} + K_{\text{шор.}} \cdot \vartheta \cdot N, \text{ мкм/год.} \quad (3.8)$$

На підставі отриманого виразу (3.8) проведено моделювання зміни швидкості зношування трібосистем від різних вхідних факторів (рис. 3.4 – 3.6).

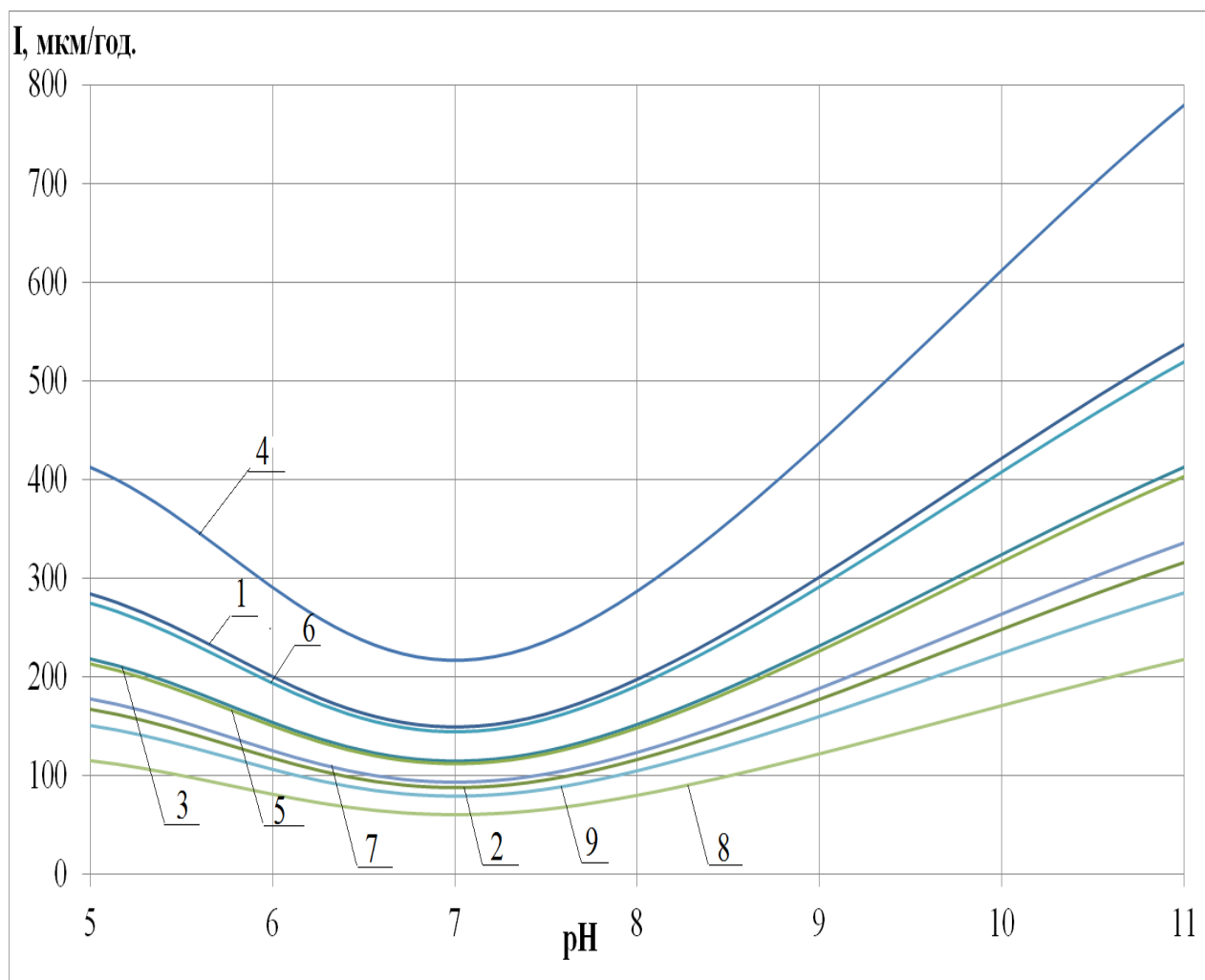


Рис. 3.4 – Теоретичні залежності швидкості зношування трібосистем від рівня активної кислотності при постійній абразивності 0 % та навантаженню 1000 Н: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ22Н2; 4 – сталь 40X та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95X18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ28; 7 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32

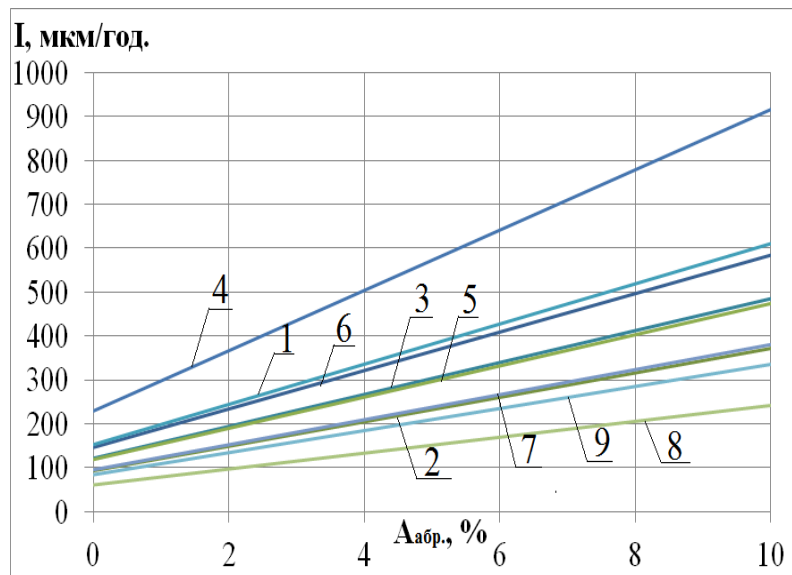


Рис. 3.5 – Теоретичні залежності швидкості зношування трібосистем від абразивності при постійній активній кислотності рН8 та навантаженню 1000 Н : 1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ22Н2; 4 – сталь 40Х та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95Х18 та чавун 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

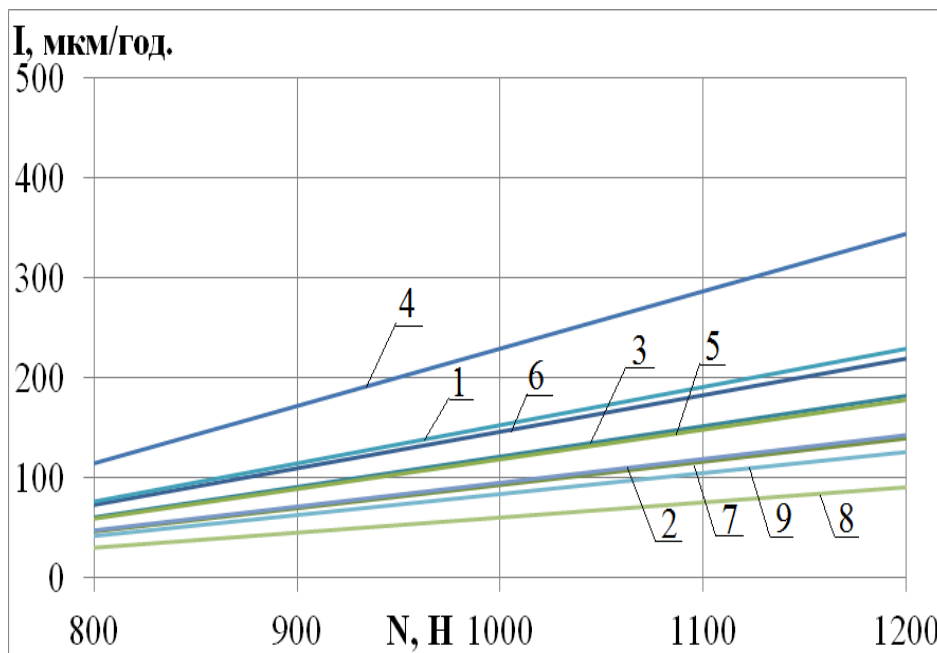


Рис. 3.6 – Теоретичні залежності швидкості зношування трібосистем від навантаження при постійній активній кислотності рН8 та абразивності 0 % : 1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ22Н2; 4 – сталь 40Х та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ28; 7 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Аналіз отриманих теоретичних залежностей, які представлені на рис. 3.4, дозволяє зробити висновок, що існує оптимальне значення активної кислотності рН7,4, яке забезпечує найменше 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 40X10С2М та чавун ЧХ32;
- сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2;
- сталь 40X та чавун ЧХ32;
- сталь 95X18 та чавун ЧХ28;
- сталь 40X10С2М та чавун ЧХ22Н2;
- сталь 40X10С2М та чавун ЧХ28;
- сталь 40X та чавун ЧХ22Н2;
- сталь 40X та чавун ЧХ28.

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

Аналогічний ефект збільшення швидкості зношування характерний для рН > 7,4 (лужне середовище). Необхідно відмітити, що лужне середовище збільшує швидкість зношування в 3,4 рази, на відміну від оптимального рівня активної кислотності рН7,4.

Аналіз теоретичних залежностей, представлених на рис. 3.5, дозволяє зробити висновок, що наявність абразиву в робочому середовищі пропорційне збільшенню швидкості зношування. Рейтинг трібосистем за швидкістю зношування за присутності абразиву при рН8 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 на першому місці.

Аналіз ступеня впливу навантаження (рис. 3.6) дозволяє стверджувати про монотонне збільшення швидкості зношування при збільшенні швидкості зношування за збільшення даного фактору. Збільшення навантаження від  $N = 800$  Н до  $N = 1200$  Н призводить до збільшення швидкості зношування у 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 – кислотне середовище та навантаження.



### 3.3 Експериментальне дослідження трибологічних характеристик конструкційних матеріалів у кислотному, лужному та абразивному середовищах

Як слідує з 3.2, рослина біомаса, така, як деревинна тирса, лузга соняшнику, солома, які використовуються для виробництва паливних брикетів та пеллетів, має слабокисле середовище.

Отримані вище результати показують, що висока температура та тиск, які виникають на поверхні металу при пресуванні біомаси, посилюють активність кислот і навіть слабкі кислоти мають значний вплив на протікання корозійних процесів. Продукти хімічної взаємодії кислот та металу видаляються з поверхні робочих органів при їх терті по біомасі, що призводить до корозійно-механічного зношування.

Автором роботи [136] доведено, що органічні кислоти зі сталями або чавунами утворюють мікрогальванічні пари, які визивають міжкристалічну електрохімічну корозію. Шари, які утворюються під час поляризації, а також пасивуючі плівки безперервно видаляються з поверхні металу при терті по ній подрібненої біомаси, що значно збільшує корозію.

Біомаса, яка використовується для виробництва паливних брикетів та пеллетів, має низьку вологість, до 10 %. Висока температура (до 450 °C) та тиск, які виникають на поверхні металу при пресуванні біомаси, призводять до піролізу, а продукти, які виділяються під час нього, впливають на протікання корозійних процесів, що доведено автором роботи [135].

Тому, для попередження виникнення корозійних процесів під впливом органічних кислот необхідно визначити кількість луку для їх нейтралізації та створити певне слаболужне середовище, при якому виникає найменша швидкість зношування, сила тертя та збільшується ресурс робочих органів екструдера.

Для підтвердження адекватності математичної моделі та визначення впливу активної кислотності рН, абразивності та навантаження, які характерні для рослинної сировини, на швидкість зношування та силу тертя робочих органів шнекового екструдера для виробництва паливних брикетів виникає необхідність проведення запланованих дослідів.

Для вирішення оптимізаційної задачі було сплановано експеримент, результати якого представлено у вигляді матриць в табл. 3.9–3.11 та регресійних рівнянь.

Параметрами оптимізації служили швидкість зношування ( $Y_1$ ) та сила тертя ( $Y_2$ ). Для перевірки можливості використання методу найменших квадратів при обробці отриманих результатів було виконано розрахунок характеристик випадкових величин та перевірка гіпотези нормального розподілення за допомогою методики, яка наведена в [154, 155].

Таблиця 3.9 – Матриця планування та результати дослідів з визначення впливу рівня активної кислотності, абразивності та навантаження на трибологічні характеристики трібосистем: сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; сталь 95Х18 та чавун ЧХ22Н2; сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ22Н2

№ екс.	Фактори			Функція відгуку трібосистеми сталь 40X та чавун ЧХ22Н2		Функція відгуку трібосистеми сталь 95Х18 та чавун ЧХ22Н2		Функція відгуку трібосистеми сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ22Н2	
	Рівень рН X <sub>1</sub>	Абразивність %, в масі X <sub>2</sub>	N (Н) X <sub>3</sub>	I (мкм/год.) Y <sub>1</sub>	F <sub>тер.</sub> (Н) Y <sub>2</sub>	I (мкм/год.) Y <sub>1</sub>	F <sub>тер.</sub> (Н) Y <sub>2</sub>	I (мкм/год.) Y <sub>1</sub>	F <sub>тер.</sub> (Н) Y <sub>2</sub>
1	8	0	800	80,23	100,70	122,26	70,66	57,59	82,08
2	8	10	800	320,93	402,80	489,05	282,64	230,37	328,32
3	8	0	1200	240,70	302,10	366,79	211,98	172,78	246,24
4	8	10	1200	962,78	1208,40	1467,14	847,92	691,10	984,96
5	5	5	800	328,31	411,97	500,06	289,09	235,56	335,72
6	11	5	800	620,18	778,12	944,56	546,04	444,93	634,14
7	5	5	1200	984,94	1235,91	1500,19	867,28	706,69	1007,16
8	11	5	1200	1860,55	2334,36	2833,67	1638,13	1334,80	1902,43
9	5	0	1000	262,65	329,58	400,05	231,28	188,45	268,58
10	11	0	1000	496,15	622,50	755,65	436,84	355,95	507,32
11	5	10	1000	1050,60	1318,30	1600,20	925,10	753,80	1074,30
12	11	10	1000	1984,58	2489,98	3022,58	1747,34	1423,78	2029,26
13	8	5	1000	401,16	503,50	611,31	353,30	287,96	410,40
14	8	5	1000	402,35	504,23	617,29	177,29	287,59	177,29
15	8	5	1000	401,27	505,10	611,15	171,15	289,37	171,15

Таблиця 3.10 – Матриця планування та результати дослідів з визначення впливу рівня активної кислотності, абразивності та навантаження на трибологічні характеристики трібосистем: сталь 40X та чавун ЧХ28; сталь 95X18 та чавун ЧХ28; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ28

№ экс.	Фактори			Функція відгуку трібосистеми сталь 40X та чавун ЧХ28		Функція відгуку трібосистеми сталь 95X18 та чавун ЧХ28		Функція відгуку трібосистеми сталь 40X10C2M та чавун ЧХ28	
	Рівень рН X <sub>1</sub>	Абразивність %, в масі X <sub>2</sub>	N (Н) X <sub>3</sub>	I (мкм/год.) Y <sub>1</sub>	F <sub>тер.</sub> (Н) Y <sub>2</sub>	I (мкм/год.) Y <sub>1</sub>	F <sub>тер.</sub> (Н) Y <sub>2</sub>	I (мкм/год.) Y <sub>1</sub>	F <sub>тер.</sub> (Н) Y <sub>2</sub>
1	8	0	800	126,08	115,46	66,58	90,66	83,99	91,37
2	8	10	800	504,34	461,83	266,31	362,66	335,95	365,48
3	8	0	1200	378,25	346,37	199,73	271,99	251,96	274,11
4	8	10	1200	1513,01	1385,50	798,94	1087,97	1007,86	1096,44
5	5	5	800	515,72	472,41	272,47	370,84	343,59	373,81
6	11	5	800	974,13	892,36	514,67	700,48	648,95	706,06
7	5	5	1200	1547,16	1417,22	817,41	1112,53	1030,78	1121,44
8	11	5	1200	2922,40	2677,08	1544,02	2101,45	1946,85	2118,19
9	5	0	1000	412,58	377,93	217,98	296,68	274,88	299,05
10	11	0	1000	779,31	713,89	411,74	560,39	519,16	564,85
11	5	10	1000	1650,30	1511,70	871,90	1186,70	1099,50	1196,20
12	11	10	1000	3117,23	2855,56	1646,96	2241,55	2076,64	2259,40
13	8	5	1000	630,42	577,29	332,89	453,32	419,94	456,85
14	8	5	1000	626,08	165,30	337,29	177,29	177,29	452,12
15	8	5	1000	624,34	164,62	336,15	171,15	171,15	451,33

На першому етапі було визначено середнє абсолютне відхилення ( $\Omega$ ) за формулою:

$$\Omega = \frac{\sum |y_j - \bar{y}|}{n}, \quad (3.9)$$

де  $y_j$  – поточне значення відгуку;  
 $\bar{y}$  – середнє значення відгуку;  
 $n$  – кількість дослідів.

Для вибірки, яка має нормальний закон розподілення, повинен бути справедливий вираз:

$$\left| \frac{\Omega}{\bar{S}} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{n}}, \quad (3.10)$$

де  $\bar{S}$  – середньоквадратичне відхилення.

Таблиця 3.11 – Матриця планування та результати дослідів з визначення впливу рівня активної кислотності, абразивності та навантаження на трибологічні характеристики трібосистем: сталь 40X та чавун ЧХ32; сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32

№ экс.	Фактори			Функція відгуку трібосистеми сталь 40X та чавун ЧХ32		Функція відгуку трібосистеми сталь 95X18 та чавун ЧХ32		Функція відгуку трібосистеми сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32	
	Рівень рН $X_1$	Абразивність %, в масі $X_2$	N (Н) $X_3$	I (мкм/год.) $Y_1$	$F_{тер.}$ (Н) $Y_2$	I (мкм/год.) $Y_1$	$F_{тер.}$ (Н) $Y_2$	I (мкм/год.) $Y_1$	$F_{тер.}$ (Н) $Y_2$
1	8	0	800	46,82	80,22	33,27	47,49	42,32	61,78
2	8	10	800	187,29	320,88	133,07	189,95	169,26	247,11
3	8	0	1200	140,47	240,66	99,80	142,46	126,95	185,33
4	8	10	1200	561,88	962,64	399,20	569,84	507,79	741,34
5	5	5	800	191,60	328,22	136,03	194,33	173,16	252,69
6	11	5	800	361,88	619,97	257,00	367,02	327,05	477,27
7	5	5	1200	574,80	984,66	408,08	582,98	519,49	758,06
8	11	5	1200	1085,64	1859,91	770,99	1101,06	981,14	1431,80
9	5	0	1000	153,28	262,58	108,84	155,46	138,53	202,15
10	11	0	1000	289,50	495,98	205,60	293,62	261,64	381,81
11	4	10	1000	613,12	1050,30	435,36	621,84	554,12	808,60
12	11	10	1000	1158,02	1983,90	822,38	1174,46	1046,55	1527,26
13	8	5	1000	234,12	401,10	166,34	237,44	211,58	308,89
14	8	5	1000	235,02	234,42	165,30	234,42	215,30	305,32
15	8	5	1000	233,05	235,30	164,62	235,30	214,62	304,687

Результати перевірки гіпотези нормальності розподілення використання середнього абсолютного відхилення показали, що гіпотеза у відповідності до масиву експериментальних даних нормального закону розподілення підтверджується.

В результаті математичної обробки експериментальних даних отримані закодовані регресійні рівняння, що адекватно описують вплив активної кислотності рН, абразивності та навантаження на швидкість зношування та силу тертя:

- для сталі 40X та чавуну ЧХ22Н2:

$$Y_1 = 401,59 + 337,42X_1 + 404,90X_2 + 291,87X_3 + 547,12X_1^2 \quad (3.11)$$

$$Y_2 = 504,28 + 423,40X_1 + 508,08X_2 + 366,15X_3 + 686,20X_1^2 \quad (3.12)$$

- для сталі 95X18 та чавуну ЧХ22Н2:

$$Y_1 = 613,25 + 513,98X_1 + 616,78X_2 + 616,78X_3 + 832,34X_1^2 \quad (3.13)$$

$$Y_2 = 233,91 + 297,11X_1 + 356,53X_2 + 256,95X_3 + 541,53X_1^2 \quad (3.14)$$

- для сталі 40X10C2M та чавуну ЧХ22Н2:

$$Y_1 = 288,318 + 242,12X_1 + 290,54X_2 + 209,37X_3 + 392,36X_1^2 \quad (3.15)$$

$$Y_2 = 252,95 + 345,07X_1 + 414,08X_2 + 298,42X_3 + 638,19X_1^2 \quad (3.16)$$

- для сталі 40X та чавуну ЧХ28:

$$Y_1 = 626,95 + 530,07X_1 + 636,08X_2 + 458,41X_3 + 861,17X_1^2 \quad (3.17)$$

$$Y_2 = 302,40 + 485,51X_1 + 582,62X_2 + 419,95X_3 + 924,92X_1^2 + \quad (3.18)$$

- для сталі 95X18 та чавуну ЧХ28:

$$Y_1 = 335,44 + 280,01X_1 + 336,01X_2 + 242,20X_3 + 452,98X_1^2 \quad (3.19)$$

$$Y_2 = 267,25 + 381,16X_1 + 457,40X_2 + 457,40X_3 + 711,04X_1^2 \quad (3.20)$$

- для сталі 40X10C2M та чавуну ЧХ28:

$$Y_1 = 256,13 + 353,12X_1 + 423,75X_2 + 305,36X_3 + 654,51X_1^2 \quad (3.21)$$

$$Y_2 = 453,43 + 384,18X_1 + 461,02X_2 + 332,25X_3 + 453,43X_1^2 \quad (3.22)$$

- для сталі 40X та чавуну ЧХ32:

$$Y_1 = 234,06 + 196,90X_1 + 236,28X_2 + 170,28X_3 + 319,39X_1^2 \quad (3.23)$$

$$Y_2 = 29,27 + 337,32X_1 + 404,79X_2 + 291,75X_3 + 602,50X_1^2 \quad (3.24)$$

- для сталі 95X18 та чавуну ЧХ32:

$$Y_1 = 165,42 + 139,84X_1 + 167,81X_3 + 120,96X_1^2 \quad (3.25)$$

$$Y_2 = 235,72 + 199,69X_1 + 239,63X_2 + 172,69X_3 + 324,77X_1^2 \quad (3.26)$$

- для сталі 40X10C2M та чавуну ЧХ32:

$$Y_1 = 213,83 + 177,95X_1 + 213,54X_2 + 153,89X_3 + 287,50X_1^2 \quad (3.27)$$

$$Y_2 = 306,30 + 259,71X_1 + 311,66X_2 + 224,58X_3 + 422,36X_1^2 \quad (3.28)$$

Проаналізувавши регресійні рівняння (3.11) – (3.28), можливо зробити висновок про ступінь впливу факторів на функцію відклику.

З рівнянь (3.13) – (3.28) видно, що на швидкість зношування та силу тертя трібосистем, в першу чергу, впливає абразивність, потім – небагато менше активна кислотність, а, в останню чергу, – навантаження.

Дані висновки підтверджують теоретичні висновки, отримані під час моделювання швидкості зношування.

Завдяки отриманим розкодованим регресійним рівнянням, було побудовано поверхні відклику швидкості зношування та сили тертя трібосистем залежно від активної кислотності, абразивності та навантаження.

Для трібосистеми, яка має мінімальне значення швидкості зношування (сталь 95X18 та чавун ЧХ32), поверхні відклику наведено на рис. 3.7, 3.8.

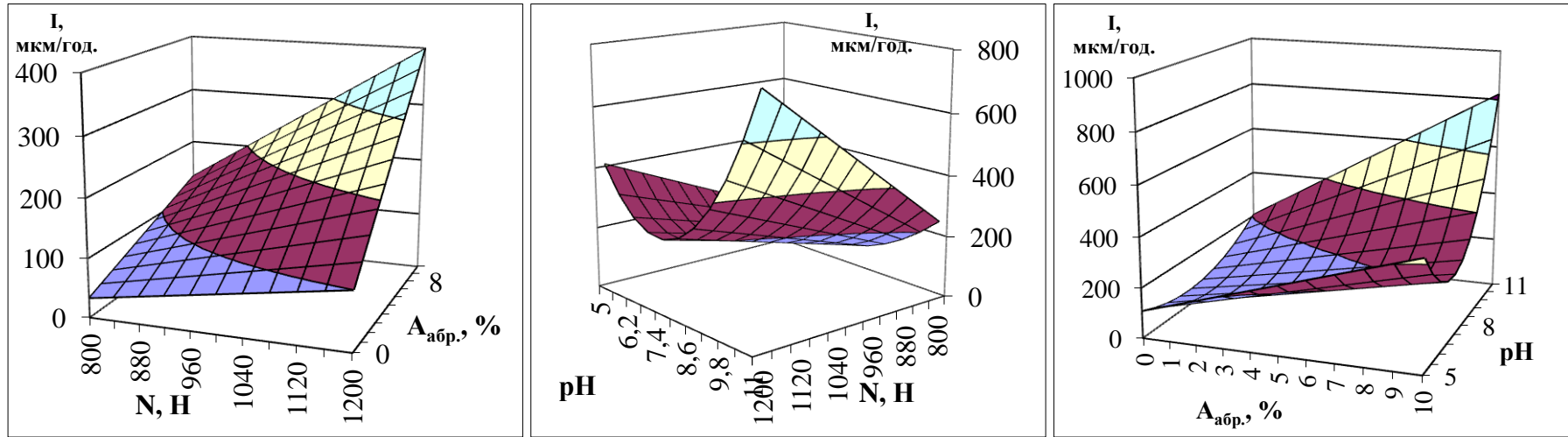


Рис. 3.7 – Поверхні відгуку швидкості зношування трібосистеми сталь 95X18 та чавун ЧХ32

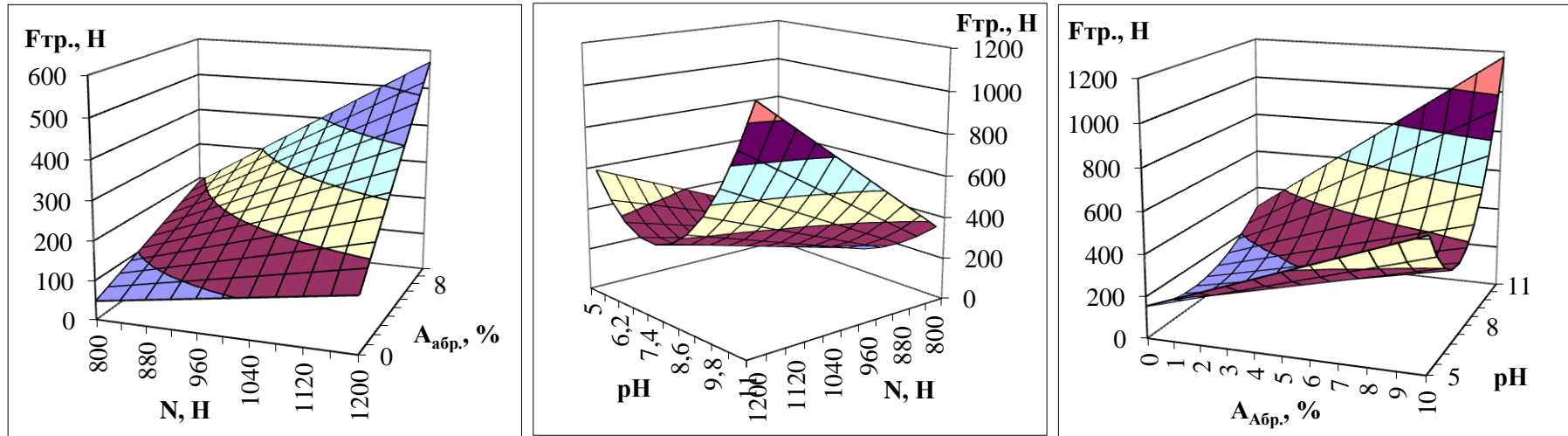


Рис. 3.8 – Поверхні відгуку сили тертя трібосистеми сталь 95X18 та чавун ЧХ32

Оптимізаційне завдання стосовно вибору найбільш оптимальної активної кислотності рН, за якої виникає найменша швидкість зношування та сила тертя, вирішувалась за допомогою програми Mathad 15.

В основу рішення оптимізаційної задачі було покладено умови, які були описані у другому розділі та попередньо визначені і описані в третьому розділі даної монографії:

$$I \text{ та } F_{\text{тер.}} \rightarrow \min \begin{cases} 5 \leq X_1 \leq 11 \\ 0 \leq X_2 \leq 10 \\ 800 \leq X_3 \leq 1200. \end{cases}$$

Після проведення певних розрахунків з визначення оптимальної кислотності, за якої виникає найменша швидкість зношування та сила тертя, було отримано оптимальний рівень активної кислотності рН для трібосистеми:

- сталь 40X та чавун ЧХ22Н2 – 7,46 рН;
- сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2 – 7,53 рН;
- сталь 40X10С2М та чавун ЧХ22Н2 – 7,49 рН;
- сталь 40X та чавун ЧХ28 – 7,71 рН;
- сталь 95X18 та чавун ЧХ28 – 7,90 рН;
- сталь 40X10С2М та чавун ЧХ28 – 7,78 рН;
- сталь 40X та чавун ЧХ32 – 7,78 рН;
- сталь 95X18 та чавун ЧХ32 – 7,26 рН;
- сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32 – 7,52 рН.

Після вибору оптимального рівня активної кислотності було проведено дослідження з визначення трібологічних характеристик сумісних трібосистем у порівнянні з базовою. Результати представлено в табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Трібологічні характеристики: швидкість зношування та сила тертя залежно від різних матеріалів в трібосистемі

Трібосистема	Швидкість зношування I, мкм/год.	Сила тертя $F_{\text{тер.}}$ , Н
Сталь 40X та чавун ЧХ22Н2 (базова трібосистема)	78,94	91,55
Сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2	43,31	64,25
Сталь 40X10С2М та чавун ЧХ22Н2	52,34	74,59
Сталь 40X та чавун ЧХ28	111,11	105,00
Сталь 95X18 та чавун ЧХ28	61,57	82,40
Сталь 40X10С2М та чавун ЧХ28	72,98	83,07
Сталь 40X та чавун ЧХ32	49,39	72,94
Сталь 95X18 та чавун ЧХ32	32,01	43,19
Сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32	38,49	56,14

Аналіз значень, які представлено в таблиці, дозволяє зробити висновок, що найбільш сумісною трібосистемою є сталь 95X18 та чавун ЧХ32, яка перевищує за своїми трібологічними характеристиками – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2 та має в 2,47 рази меншу швидкість зношування та в 2,12 рази меншу силу тертя за мінімальної абразивності, навантаженні та слаболужній активній кислотності, близької до нейтральної.

За отриманими результатами можливо зробити висновок про те що, найменша швидкість зношування та сила тертя притаманні слаболужному середовищі, близькому до нейтрального, що підтверджують результати досліджень, які наведено в 3.2.

На рис. 3.9 та 3.10 зображено теоретичні та експериментальні залежності швидкості зношування та сили тертя. Дослідження проводили при постійному навантаженні 1000Н, абразивності 0 % в масі та певному рівні активної кислотності.

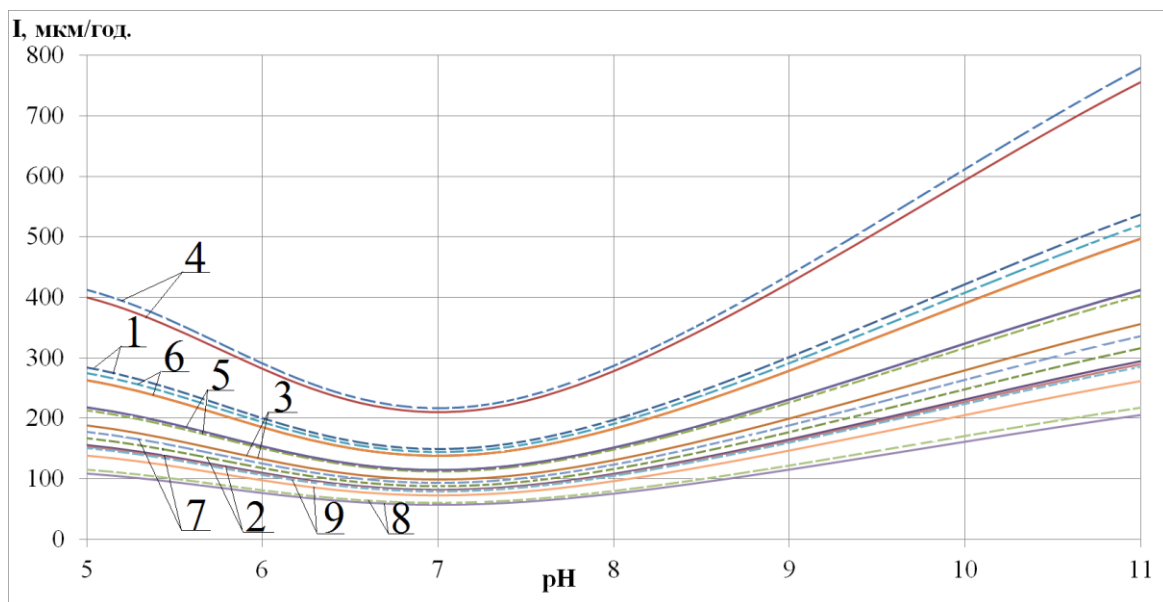


Рис. 3.9 – Теоретичні та експериментальні залежності швидкості зношування трібосистем від рівня активної кислотності при постійній абразивності та навантаженню:

----- розрахунок; \_\_\_\_\_ експеримент.

1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ22Н2; 4 – сталь 40X та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95X18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ28; 7 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32

Рослинна сировина для виробництва твердого палива має слабокисле середовище та активну кислотність рН5. За таких умов рейтинг трібосистем за швидкістю зношування і силі тертя в бік збільшення має вид: трібосистема сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32; сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2 і на останньому місці – сталь 40X та чавун ЧХ28.



При додаванні до сировини луги – гідроксиду натрію до рН7,4, відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування. Рейтинг трібосистем залишається без змін.

При подальшому додаванні луги створюється сильнолужне середовище рН11 та відбувається зворотний процес, при якому зростає швидкість зношування та сили тертя. За таких умов рейтинг трібосистем за швидкістю зношування і сили тертя має вид: сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32; сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2 і на останньому місці – сталь 40X та чавун ЧХ28.

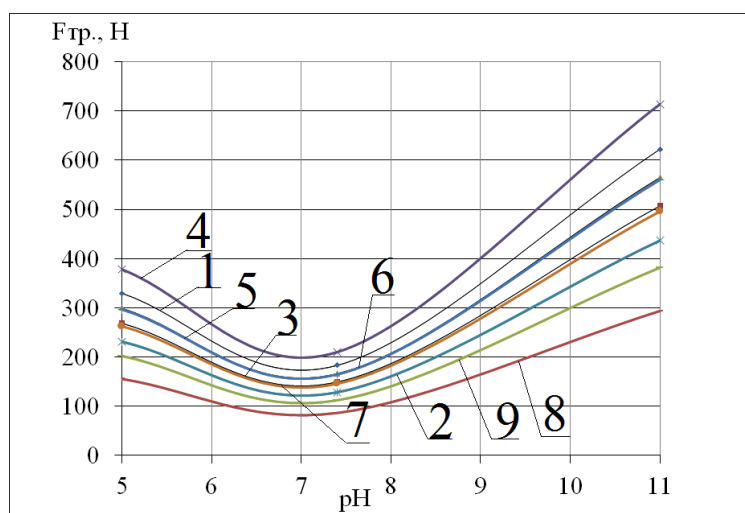


Рис. 3.10 – Залежності сили тертя трібосистем від рівня активної кислотності при постійному навантаженні та абразивності: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ22Н2; 4 – сталь 40X та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95X18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ28; 7 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32

Найменше значення швидкості зношування та сили тертя для всіх трібосистем при рН7,4.

На рис. 3.11 та 3.12 представлено залежності швидкості зношування та сили тертя за постійного навантаження у 1000Н, нейтрального рівня активної кислотності від абразивності. Рослина сировина для виробництва твердого палива має абразивність близько 10 %. За таких умов рейтинг трібосистем за швидкістю зношування та сили тертя в бік збільшення має вид: трібосистема сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32; сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2 і на останньому місці – сталь 40X та чавун ЧХ28, тобто залишається без змін.

При очищенні сировини від абразивних домішок на 5 % відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування. За подальшого очищення сировини від абразивності до 0 % відбувається зменшення швидкості зношування та сили тертя. За відсутності абразивності рейтинг трібосистем за швидкістю зношування та сили тертя в бік збільшення має вид: трібосистема

сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32; сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2 і на останньому місці – сталь 40X та чавун ЧХ28.

Найменше значення швидкості зношування та сили тертя для всіх трібосистем – за показника абразивності 0 %.

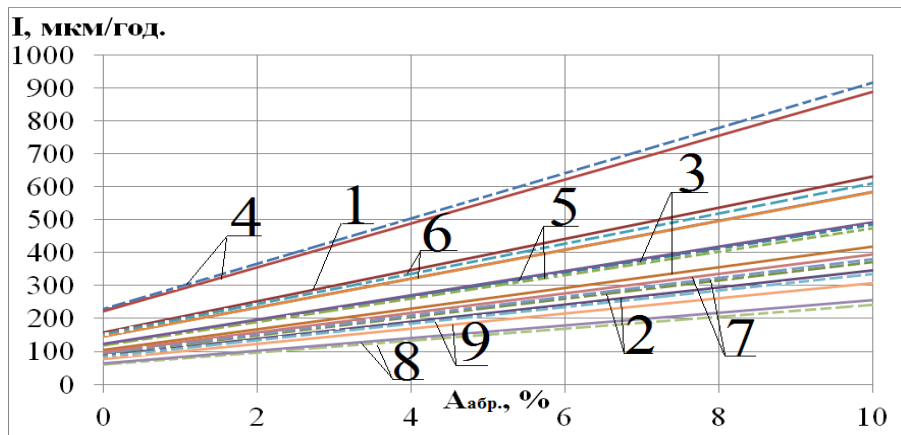


Рис. 3.11 – Теоретичні та експериментальні залежності швидкості зношування трібосистем від абразивності при постійній активній кислотності та навантаженню:

----- розрахунок; \_\_\_\_\_ експеримент;

1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ22Н2; 4 – сталь 40X та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95X18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ28; 7 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32

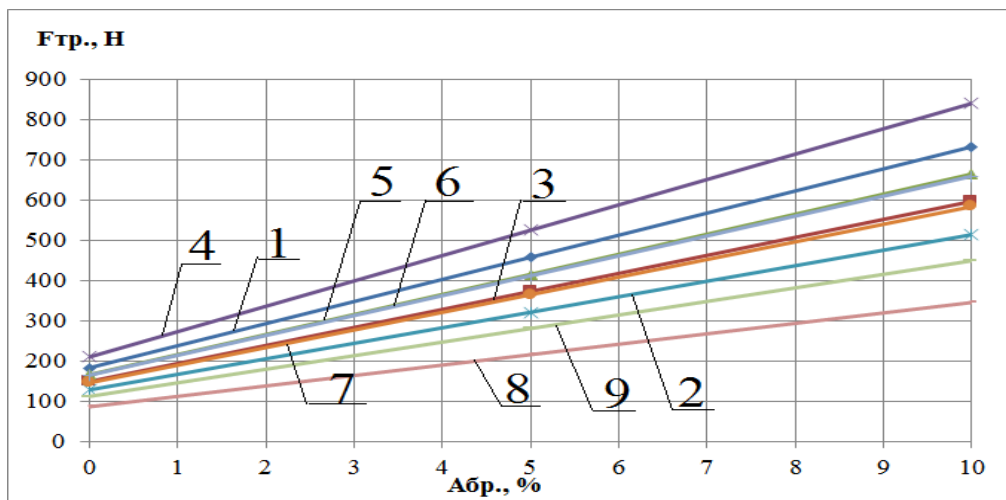


Рис. 3.12 – Залежності сили тертя трібосистем від рівня абразивності при постійному навантаженні та рівня активної кислотності: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ22Н2; 4 – сталь 40X та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95X18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ28; 7 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32

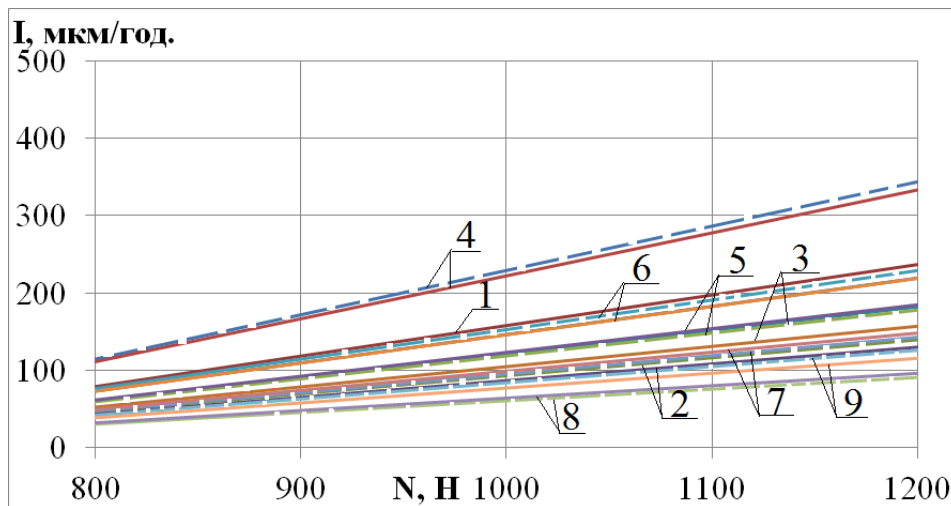


Рис. 3.13 – Теоретичні та експериментальні залежності швидкості зношування трібосистем від навантаження при постійній активній кислотності та абразивності:

----- розрахунок; \_\_\_\_\_ експеримент;

1 – сталь 40X 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

На рис. 3.13 – 3.14 представлено залежності швидкості зношування та сили тертя за постійної абразивності 0 %, нейтрального рівня активної кислотності рН7,4 від навантаження.

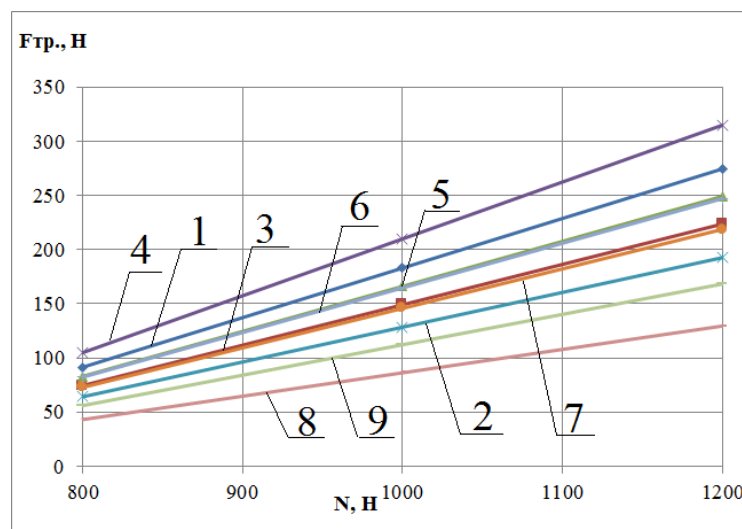


Рис. 3.14 – Залежності швидкості зношування та сили тертя трібосистем від навантаження при постійній абразивності та рівня активної кислотності: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ22Н2; 4 – сталь 40Х та чавун ЧХ28; 5 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ28; 6 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ28; 7 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 8 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 9 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Похибку моделювання, тобто різницю між розрахунковим ( $I_T$ ) і середньоарифметичним експериментальним ( $I_e$ ) значеннями в кожній серії експериментів, визначається як наведена похибка, віднесена до експериментального значення:

$$\Delta_I = \left| \frac{I_e - I_T}{I_e} \right| \cdot 100\%, \quad (3.29)$$

Результати розрахунку похибки моделювання швидкості зношування не перевищують 15,98 %, сили тертя – 16,19 %.

Адекватність теоретичних кривих отриманих за допомогою математичного моделювання експериментальним даним перевіряли за допомогою критерія Фішера  $F$ :

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (3.30)$$

де  $S_{ад}^2$  – дисперсія адекватності та дисперсія відтворюваності експерименту. Оцінка дисперсії адекватності розраховується за формулою [156]:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^n (y_i - y_T), \quad (3.31)$$

де  $n$  – число дослідів;  
 $k$  – число коефіцієнтів в рівнянні (число факторів);  
 $y_i$  – поточне експериментальне значення швидкості зношування;  
 $y_T$  – поточне розрахункове теоретичне значення швидкості зношування.  
 Дисперсію відтворюваності визначають за формулою [155]:

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.32)$$

де  $\bar{y}$  – середнє значення по кожній серії дослідів для швидкості зношування. Результати розрахунків значень  $F$ -критерію представлені в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Результати розрахунків значень  $F$ -критерію для швидкості зношування I

Трібосистема	$S_{ад}^2$	$S_y^2$	$F$	$F_{табл}$
Сталь 40X та чавун ЧХ22Н2 (базова трібосистема)	0,00378	0,00157	2,41	2,5
Сталь 95X18 та чавун ЧХ22Н2	0,007,97	0,00344	2,32	2,5
Сталь 40X10С2М та чавун ЧХ22Н2	0,00195	0,00092	2,12	2,5
Сталь 40X та чавун ЧХ28	0,01057	0,00487	2,17	2,5
Сталь 95X18 та чавун ЧХ28	0,00407	0,00195	2,09	2,5
Сталь 40X10С2М та чавун ЧХ28	0,00953	0,00404	2,36	2,5
Сталь 40X та чавун ЧХ32	0,00395	0,00163	2,42	2,5
Сталь 95X18 та чавун ЧХ32	0,00678	0,00278	2,44	2,5
Сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32	0,00378	0,00164	2,31	2,5

Математична модель адекватно описує експериментальні дані, якщо виконує умову:

$$F < F_{\text{табл}}, \quad (3.33)$$

де  $F_{\text{табл}}$  – табличне значення критерія Фішера за ймовірності  $p = 0,9$  та ступенях свободи  $n-1$  і  $n-k$  [155].

Порівняння розрахункового значення  $F$  та табличного  $F_{\text{табл}}$  дозволяють зробити висновок, що умова (3.33) виконується. З проведених досліджень можливо сформулювати оптимальне значення активної кислотності, яке дорівнює рН7,4. За відсутності абразивності та постійного навантаження найменше значення швидкості зношування та сили тертя має трібосистема – сталь 95X18 та чавун ЧХ32.

### 3.4 Висновки за третім розділом

1. 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 лузга соняшника, а найбільший вміст абразивних частинок – солома ячменю.

2. Розроблено математичну модель розрахунку швидкості зношування трібосистеми, яка працює в умовах корозійно-абразивного зношування. Теоретичним шляхом встановлено ступінь впливу наведених вище факторів на швидкість зношування. Виконано моделювання та встановлено оптимальний рівень активної кислотності рН7,4.

3. Виконано експериментальну оцінку адекватності розроблених математичних моделей за результатами експерименту, а також ступінь впливу вхідних в математичні моделі факторів на результати моделювання. За допомогою критерія Фішера встановлено, що результати моделювання швидкості зношування адекватні результатам експерименту з ймовірністю 0,9. Розрахована похибка моделювання по кожній серії експериментів, показано, що при моделюванні швидкості зношування похибка не перевищує 15,98 %, сили тертя 16,19 %, що можна визнати як задовільну.

4. Експериментальним шляхом встановлено, що рослина сировина для виробництва твердого палива має слабокисле середовище та активну кислотність рН5. Визначено, що при додаванні до сировини луги – гідроксиду натрію до рН7,4 відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування.

5. Встановлено, що найменша швидкість зношування та сила тертя при слаболужному середовищі, близькому до нейтрального, має трібосистема сталь 95X18 та чавун ЧХ32, яка перевищує за своїми трібологічними характеристиками – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2 та має в 2,47 рази меншу швидкість зношування і в 2,12 рази меншу силу тертя за мінімальної абразивності, навантаженням та слаболужній активній кислотності, близької до нейтральної.

## РОЗДІЛ 4

### ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ ТРІБОСИСТЕМ ЕКСТРУДЕРІВ ЕВ-350 ТА ЕВ-350М

#### 4.1 Методика фізичного моделювання тріботехнічних процесів

Під час розробки нових конструкцій трібосистем, дослідженні впливу рівня активної кислотності, абразивності рослинної сировини, з якої виробляються паливні брикети та навантаження на роботу трібосистеми, виникає необхідність визначення тріботехнічних властивостей реального складного об'єкту. Такі трібологічні завдання вирішуються успішно за допомогою методики фізичного моделювання, докладне висвітлення якої розглянуто в роботах [158–160]. В роботі авторів [160] визначено, що фізичне моделювання – це моделювання подібних процесів на установках (моделях), які зберігають фізичну природу явищ та процесів, але відображають їх в іншому масштабі, а саме в геометричному або фізичному.

Моделі при фізичному моделюванні процесу тертя та зношування мають особливість – однакову природу з натурним об'єктом (натурою), тобто використовуються однакові (зменшеними в масштабі) трібосистеми, матеріали, з яких вони вироблені, та робоче середовище. Модель відрізняється від природи не тільки своїми масштабними розмірами, а й штучно створеними умовами експлуатації. За лабораторних випробувань створюються більш складні умови, такі, як абразивність, рівень активної кислотності та навантаження, які необхідні для зменшення часу випробувань.

Фізичне моделювання дозволяє вирішити завдання знаходження залежностей сили тертя та швидкості зношування, коефіцієнту тертя для натурної трібосистеми за результатами досліджень, які отримані на моделі в лабораторних умовах. Основними перевагами використання методу фізичного моделювання є зменшення витрат часу, які пов'язані з дослідженням трібологічних характеристик тих чи інших трібосистем та можливість отримати рівняння з критеріями, що враховують масштабні коефіцієнти, за допомогою яких можливо зробити перехід від модельних випробувань в лабораторних умовах до натурних з подальшим наступним розрахунком залежностей сили тертя та швидкості зношування.

За допомогою критеріальних рівнянь можливо прогнозувати ресурс натурних трібосистем за результатами лабораторних досліджень їх моделей та дослідження впливу абразивного, кислотного, лужного середовищ (агресивного) на трібосистеми з метою підбору сумісних матеріалів.

Закон моделювання визначається за допомогою розрахункового масштабного фактору, який є сукупністю масштабних коефіцієнтів переходу від природи до моделі для параметрів, які належать до критеріїв подібності. Для того, щоб виконати всі умови закону фізичного моделювання необхідно визначити певні масштабні коефіцієнти, за допомогою яких можливо отримати залежності швидкості зношування натурних трібосистем та сили тертя за до-

помогою даних, отриманих в лабораторних умовах на моделях. До них відносяться коефіцієнт взаємного перекриття ( $K_{\text{вз}}$ ), який дорівнює співвідношенню площі рухомого елемента трібосистеми до площі нерухомого, значення якого лежить в межах від 0 до 1.

Основним та дуже важливим показником є коефіцієнт форми трібосистеми ( $K_{\text{ф}}$ ), який залежить від робочої площі та об'єму рухомого та нерухомого елементів. Зі збільшенням коефіцієнта форми  $K_{\text{ф}}$ , покращується тріботехнічні характеристики, якими володіє трібосистема [159]. За допомогою цього коефіцієнта можливо зробити експертну оцінку спроектованих трібосистем та знайти шляхи підвищення їх зносостійкості на етапі проектування.

Цей коефіцієнт можливо використати для урахування конструктивних особливостей трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M для визначення сили тертя та швидкості зношування натурних трібосистем за допомогою даних, які отримані при використанні моделей. Для визначення коефіцієнта форми використовували вираз, який представлено в [161]:

$$K_{\text{ф}} = \frac{A_{\text{amin}}}{V_{\text{amax}} + \frac{V_{\text{Amin}}}{K_{\text{вз}}}} \quad (4.1)$$

де  $A_{\text{amin}}$  – менша робоча площа тертя одного з трібоелементів, м<sup>2</sup>;  
 $K_{\text{вз}}$  – коефіцієнт взаємного перекриття;  
 $V_{\text{amax}}$  – об'єм трібоелемента з більшою площею тертя, м<sup>3</sup>;  
 $V_{\text{Amin}}$  – об'єм трібоелемента з меншою площею тертя, м<sup>3</sup>.

Для того, щоб визначити коефіцієнти, які враховують геометричні особливості трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M було проведено аналіз конструкторської документації та розрахунки площ тертя та об'ємів. Вхідні дані для розрахунків коефіцієнтів форми використовувались з нормативно-технічної документації, паспортів та креслень, які були надані конструкторським бюро заводу-виробника ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» (додаток А). Визначені результати значень коефіцієнтів форми  $K_{\text{ф}}$ , навантаження  $N$ , швидкості ковзання  $v$ , кислотності  $Q$  і абразивності  $A_{\text{абр}}$  модельних та натурних трібосистем шнека та філь'єр екструдера EB-350 та EB-350M наведено в табл. 4.1.

З таблиці 4.1 видно, що всі моделі трібосистем мають однаковий  $K_{\text{ф}}$  в зв'язку з тим, що об'єми та площі, які лежать під ними, не змінюються та не змінюється їхнє взаємне розташування. Це дає можливість змоделювати натурні трібосистеми з усіма геометричними особливостями.  $K_{\text{вз}}$  для всіх моделей трібосистем ідентичний та становить 0,2. Навантаження на досліджувані зразки було підібрано для зменшення часу випробувань, а швидкість ковзання було встановлене відповідно до методик та рекомендацій з здійснення прискорених тріботехнічних випробувань [161].

Таблиця 4.1 – Коефіцієнт форми  $K_f$ , навантаження  $P$ , швидкість ковзання  $v$ , кислотність  $Q$  і абразивність  $A_{abr}$  модельних та натурних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M

Трібосистеми	$K_f$ , 1/М	$K_{ВЗ}$	$A_{amin}$ , (м <sup>2</sup> )	$V_{amax}$ , (м <sup>3</sup> )	$V_{amin}$ , (м <sup>3</sup> )	$N$ , (Н)	$v$ , м/с	$Q$ , кг/м <sup>3</sup>	$A_{abr}$ · кг/ м <sup>3</sup>
Модель									
«наконечник + філь'ера № 5»	1,76	0,2	$6,32 \cdot 10^{-5}$	$6,51 \cdot 10^{-6}$	$5,54 \cdot 10^{-6}$	1000	0,5	$1,0794 \cdot 10^{-5}$	100
«хвостовик + філь'ера № 4»									
«шнек малий + філь'ера № 1, 2 та 3»									
«шнек конічний + філь'ера № 1, 2 та 3»									
Натура EB-350									
«наконечник + філь'ера № 5»	16,62	0,44	$804,22 \cdot 10^{-5}$	$45,95 \cdot 10^{-6}$	$379,33 \cdot 10^{-6}$	58700	1,4	$1,0794 \cdot 10^{-5}$	100
«хвостовик + філь'ера № 4»	4,87	0,03	$1897,73 \cdot 10^{-5}$	$105,72 \cdot 10^{-6}$	$368,26 \cdot 10^{-6}$	47000	1,2	$1,0794 \cdot 10^{-5}$	100
«шнек малий + філь'ера № 1, 2 та 3»	1,81	0,11	$929,99 \cdot 10^{-5}$	$1446,79 \cdot 10^{-6}$	$406,9 \cdot 10^{-6}$	11700	0,8	$1,0794 \cdot 10^{-5}$	6
Натура EB-350M									
«шнек конічний + філь'ера № 1, 2 та 3»	6,57	0,3	$2067,68 \cdot 10^{-5}$	$944,19 \cdot 10^{-6}$	$528,02 \cdot 10^{-6}$	50000	1,18	$1,0794 \cdot 10^{-5}$	100



Параметри натурних трібосистем суттєво відрізняються один від одного та певною мірою характеризують трібосистему. Коефіцієнт взаємного перекриття був розрахований за даними з паспортів на обладнання за допомогою програми SolidWorks 2012, побудованих 3D моделей та нормативно-технічної документації екструдера EB-350 та EB-350M. Коефіцієнти, які враховують геометричні параметри натурних трібосистем, були розраховані з урахуванням конструктивних особливостей певної трібосистеми.

#### 4.2 Визначення швидкості зношування натурних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M та прогнозування їх ресурсу

Для того, щоб визначити силу тертя та швидкість зношування натурних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M для виробництва паливних брикетів був спланований експеримент та проведені лабораторні дослідження їх моделей з урахуванням теорії моделювання та подібності [158–161], результати яких представлено в третьому розділі даної монографії. Для того, щоб розрахувати швидкість зношування та силу тертя натурних трібосистем за результатами лабораторних досліджень їх зменшених моделей, було застосовано критеріальний підхід та використовувалися вирази, які були визначені автором роботи [127].

Для того, щоб зменшити кількість факторів були об'єднані в один параметр  $A_{нег.}$ ,  $\text{кг}^2/\text{м}^6$  величини, які характеризують активну кислотність  $Q$   $\text{кг}/\text{м}^3$  та абразивність  $A_{абр.}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :

$$A_{нег.} = Q \cdot A_{абр.} \quad (4.2)$$

Фізичним смислом величини  $A_{нег.}$  є кількість негативних факторів в одиниці об'єму сировини чи продукту. Перелік параметрів та їх розмірності, які були використані при моделюванні тертя в умовах граничного мащення, наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Визначальні параметри тертя в умовах граничного мащення та їх розмірності

Параметр	Розмірність в системі	
	СІ	М L T
Навантаження, $N$	Н	$\text{M}^1 \text{L}^1 \text{T}^{-2}$
Швидкість ковзання, $v$	м/с	$\text{M}^0 \text{L}^1 \text{T}^{-1}$
Масштабний фактор пари тертя, $K_f$	1/м	$\text{M}^0 \text{L}^{-1} \text{T}^0$
Властивості (структура) сполучених матеріалів, $\alpha_{ат}$	Дб/м	$\text{M}^{-1} \text{L}^0 \text{T}^0$
Абразивність сировини чи продукту, $A_{абр.}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	$\text{M}^1 \text{L}^{-3} \text{T}^0$
Кислотність сировини чи продукту, $Q$	$\text{кг}/\text{м}^3$	$\text{M}^1 \text{L}^{-3} \text{T}^0$
Швидкість зношування, $I$	м/с	$\text{M}^0 \text{L}^1 \text{T}^{-1}$
Сила тертя, $F_{тер.}$	Н	$\text{M}^1 \text{L}^1 \text{T}^{-2}$

У відповідності з другою теоремою подібності ( $\pi$ -теоремою), будь-яке рівняння фізичного процесу, яке записано в певній системі одиниць, може бути наведено у вигляді функціональних залежностей між критеріями подібності [165]:

$$F(\pi_i) = 0, \quad (4.3)$$

де  $\pi_i$  – критерії подібності, які характеризують фізичний процес.

Причому, число критеріїв подібності ( $i$ ) менше числа параметрів, які характеризують процес на кількість незалежних змінних. Число незалежних змінних визначається на основі аналізу розмірностей величин.

У відповідності з правилами отримання критеріїв подібності методом аналізу розмірностей у якості одиниць вимірювання обрані: довжина –  $L$ , м; маса –  $M$ , кг; час –  $T$ , с. В якості базисних змінних в обраній системі одиниць вимірювання можливо використовувати наступні сполучення параметрів процесу:  $W = \frac{N \cdot v}{k_f}$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^3 / \text{с}^3$ ;  $\alpha_{вт}$ ,  $1/\text{м}$ ;  $A_{нег.}$ ,  $\text{кг}^2 / \text{м}^6$ . В число параметрів не включено вихідні параметри трібосистем, за якими виконується моделювання.

Про незалежність базисних параметрів свідчить нерівність нулю базисного визначника, складеного з степенів розмірностей вказаних величин:

$$D_0 = \begin{vmatrix} W & L & M & T \\ A_{нег.} & 3 & 1 & -3 \\ \alpha_{вт} & -6 & 2 & 0 \\ & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -6. \quad (4.4)$$

З базисними параметрами  $W$ ,  $\alpha_{вт}$ ,  $A_{нег.}$  зв'язують інші параметри, які входять в опис процесів  $I$ ,  $F_{мер.}$ , отримавши критерії подібності.

Для визначення форми критеріїв подібності необхідно знати значення показників:

– для критерію швидкості зношування  $I$ :

$$\begin{vmatrix} I & L & M & T \\ A_{нег.} & 1 & 0 & -1 \\ \alpha_{вт} & -6 & 2 & 0 \\ & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -2; \quad \begin{vmatrix} W & L & M & T \\ I & 3 & 1 & -3 \\ \alpha_{вт} & 1 & 0 & -1 \\ & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 1; \quad \begin{vmatrix} W & L & M & T \\ A_{нег.} & 3 & 1 & -3 \\ I & -6 & 2 & 0 \\ & 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} = -6, \quad (4.5)$$

– для критерію сили тертя  $F_{тер.}$ :

$$F_{тер.} \begin{vmatrix} L & M & T \\ 1 & 1 & -2 \\ -6 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -4; \quad W \begin{vmatrix} L & M & T \\ 3 & 1 & -3 \\ 1 & 1 & -2 \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -1; \quad A_{нез.} \begin{vmatrix} L & M & T \\ 3 & 1 & -3 \\ -6 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & -2 \end{vmatrix} = 0. \quad (4.6)$$

Відповідно до правил запису формул критеріїв подібності [188] отримаємо:

– критерій швидкості зношування:

$$\pi_I = \frac{I \cdot A_{обр.}^{1/6} \cdot Q^{1/6} \cdot K_{\phi}^{1/3}}{N^{1/3} \cdot \vartheta^{1/3} \cdot \alpha_{\text{вм}}}, \quad (4.7)$$

– критерій сили тертя:

$$\pi_{F_{тер.}} = \frac{F_{тер.} \cdot K_{\phi}^{2/3}}{A_{обр.}^{1/6} \cdot Q^{1/6} \cdot N^{2/3} \cdot \vartheta^{2/3}}. \quad (4.8)$$

Перша теорема подібності теорії подібності та моделювання визначає рівність критеріїв подібності в подібних явищах. В тому випадку, якщо наведений вище висновок критеріїв подібності фізичного моделювання тертя в умовах граничного мащення було наведено коректно, слідче очікувати виконання рівнянь для отримання критеріїв швидкості зношування та критеріїв сили тертя:

$$(\pi_i)_n = (\pi_i)_m, \quad (4.9)$$

де «*n*» та «*m*» – індекси натури та моделі.

Проведемо перевірку даного припущення. Для цього запишемо в обидві частини припущених рівнянь (4.9) в розгорнутому вигляді критерії подібності, формули (4.7) та (4.8):

– для критерію швидкості зношування:

$$\frac{I_m \cdot A_{обр.м}^{1/6} \cdot Q_m^{1/6} \cdot K_{\phi м}^{1/3}}{N_m^{1/3} \cdot \nu_m^{1/3} \cdot \alpha_{\text{вм}м}} = \frac{I_n \cdot A_{обр.н}^{1/6} \cdot Q_n^{1/6} \cdot K_{\phi н}^{1/3}}{N_n^{1/3} \cdot \nu_n^{1/3} \cdot \alpha_{\text{вм}н}}, \quad (4.10)$$

– для критерію сили тертя:

$$\frac{F_{тер.м} \cdot K_{\phi м}^{2/3}}{N_m^{2/3} \cdot v_m^{2/3} \cdot Q_m^{1/6} \cdot A_{обр.м}^{1/6}} = \frac{F_{тер.н} \cdot K_{\phi н}^{2/3}}{N_n^{2/3} \cdot v_n^{2/3} \cdot Q_n^{1/6} \cdot A_{обр.н}^{1/6}}. \quad (4.11)$$

Враховуючи першу теорему подібності моделювання, коли будуть рівні визначальні критерії подібності у моделі та природи, можливо отримати із рівняння (4.10) та (4.11) параметри натурної трібосистеми за допомогою параметрів модельної:

– для швидкості зношування природи:

$$I_n = I_m \left(\frac{N_n}{N_m}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{v_n}{v_m}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{K_{\phi м}}{K_{\phi н}}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\alpha_{втн}}{\alpha_{втм}}\right) \cdot \left(\frac{A_{обр.м}}{A_{обр.н}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Q_m}{Q_n}\right)^{1/6}, \quad (4.12)$$

– для сили тертя природи:

$$F_n = F_{тер. м} \left(\frac{N_n}{N_m}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{v_n}{v_m}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{K_{\phi м}}{K_{\phi н}}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{A_{обр.н}}{A_{обр.м}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Q_n}{Q_m}\right)^{1/6}. \quad (4.13)$$

Враховуючи те, що структури матеріалів натурних та модельних трібосистем є однаковими, то частини виразів (4.12), (4.13)  $\left(\frac{\alpha_{втм}}{\alpha_{втн}}\right)$  дорівнюють одиниці. Тоді вирази для знаходження сили тертя та швидкості зношування головних трібосистем екструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М можливо отримати за допомогою виразів:

$$I_n = I_m \cdot K_{Ij}, \quad (4.14)$$

$$F_{тер.н} = F_{тер.м} \cdot K_{Fj}, \quad (4.15)$$

де  $I_m$  та  $F_{тер.м}$  – швидкість зношування та сила тертя, які отримані експериментально на моделях та відображено у третьому розділі даної монографії;  
 $K$  – коефіцієнт подібності, що враховує зміни  $v$ ,  $N$ ,  $K_{\phi}$  в моделі та природі.

Коефіцієнт подібності для швидкості зношування:

$$K_I = \left(\frac{N_H}{N_M}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{v_H}{v_M}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{K_{\phi M}}{K_{\phi H}}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{A_{абр.М}}{A_{нег.Н}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Q_M}{Q_H}\right)^{1/6}. \quad (4.16)$$

Коефіцієнт подібності для сили тертя:

$$K_{F_{тер}} = \left(\frac{N_H}{N_M}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{v_H}{v_M}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{K_{\phi M}}{K_{\phi H}}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{A_{абр.Н}}{A_{нег.М}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Q_H}{Q_M}\right)^{1/6}. \quad (4.17)$$

Значення  $P$ ,  $v$ ,  $K_{\phi}$  та  $Q$  представлено в таблиці 4.1.

Значення коефіцієнтів  $K_I$  для визначення швидкості зношування натурних трібосистем представлені в таблиці 4.3 та коефіцієнтів  $K_{F_{тер}}$  для визначення сили тертя – таблиці 4.4.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнт подібності для розрахунку швидкості зношування натурних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350-М

Трібосистеми екструдера EB-350			Трібосистема екструдера EB-350М
«наконечник – філь’ера № 5»	«хвостовик – філь’ера № 4»	«шнек малий – філь’ера № 1, 2 та 3»	«шнек конічний – філь’ера № 1, 2 та 3»
2,6	3,52	4,29	3,16

Таблиця 4.4 – Коефіцієнт подібності для розрахунку сили тертя натурних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350-М

Трібосистеми екструдера EB-350			Трібосистема екструдера EB-350М
«наконечник – філь’ера № 5»	«хвостовик – філь’ера № 4»	«шнек малий – філь’ера № 1, 2 та 3»	«шнек конічний – філь’ера № 1, 2 та 3»
6,75	12,37	11,52	10,00

Представлені коефіцієнти в таблицях 4.2, 4.3, підставивши в вирази (4.14) та (4.15), отримаємо значення сили тертя та швидкості зношування натурних трібосистем. Отримані результати розрахунку швидкості зношування та сили тертя натурних трібосистем при експлуатації на різних видах робочого середовища представлені на рис. 4.1–4.8. Аналіз отриманих залежностей дає змогу визначити та спрогнозувати ресурс кожної трібосистеми та екструдера EB-350 та EB-350М в цілому.

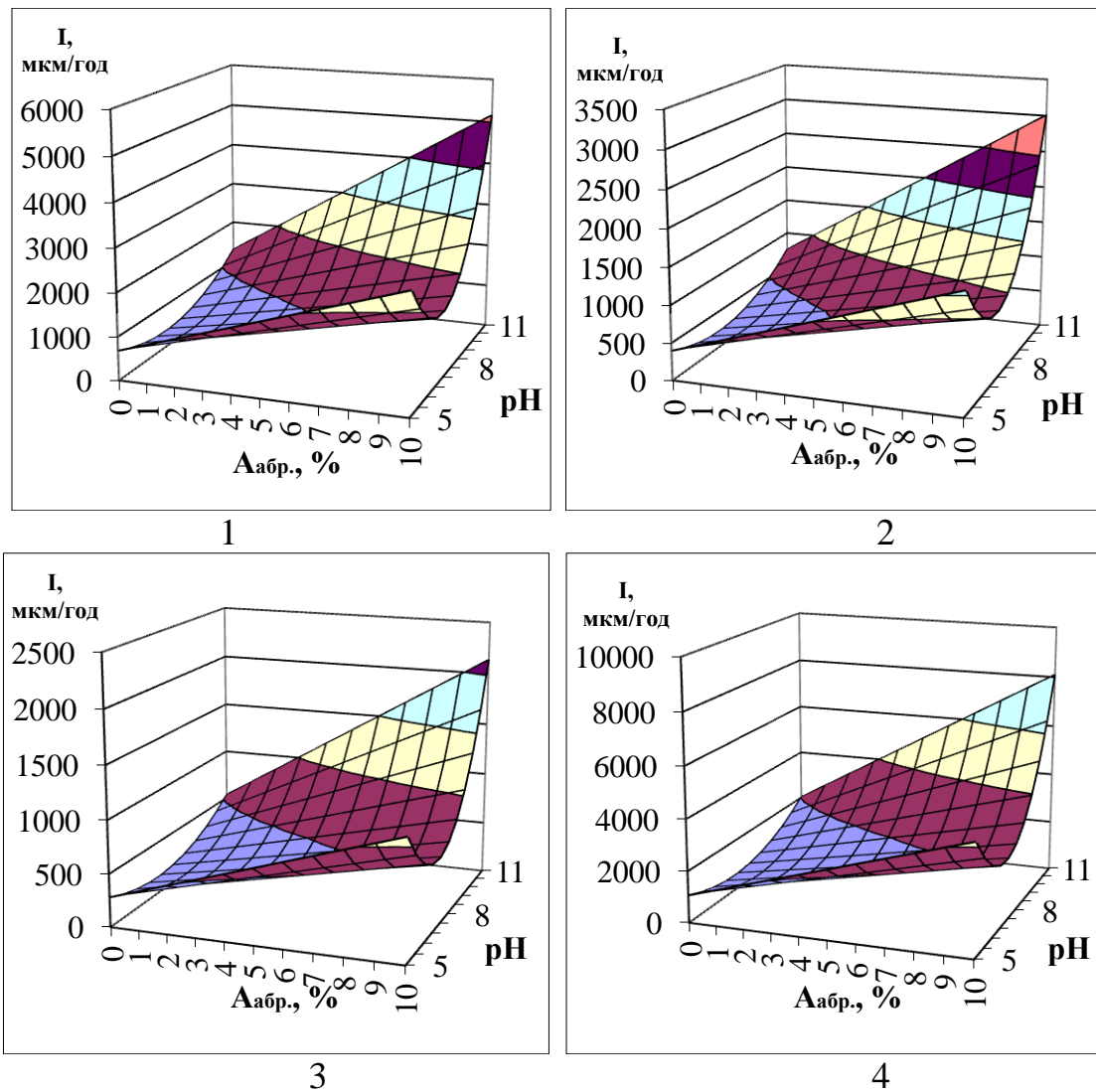


Рис. 4.1 – Розрахункові значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера EB-350, «наконечник – філь’ера № 5»: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32

Залежності, які представлені на рис. 4.1, описують рівняння (4.18)–(4.21). Індекс рівняння також є номером поверхні, яку вона описує:

$$I_1 = 158,12pH_1^2 + 30,35pH_1 \cdot A_{абр.1} - 2428,72pH_1 - 3,83A_{абр.1} + 9158,14; \quad (4.18)$$

$$I_2 = 96,26pH_2^2 + 17,71pH_2 \cdot A_{абр.2} - 1417,15pH_2 - 2,20A_{абр.2} + 5343,80; \quad (4.19)$$

$$I_3 = 65,49pH_3^2 + 12,58pH_3 \cdot A_{абр.3} - 1005,98pH_3 - 1,57A_{абр.3} + 3793,41; \quad (4.20)$$

$$I_4 = 248,28pH_4^2 + 64,54pH_4 \cdot A_{абр.4} - 6292,39pH_4 - 7,23A_{абр.4} + 17477,77. \quad (4.21)$$

З отриманих рівнянь (4.18)–(4.21) видно, що розрахункова швидкість зношування натурної трібосистеми екструдера EB-350, «наконечник – філь’ера № 5» є нелінійною. При збільшенні рівня рН від 5 до 7,4 відбувається зменшення швидкості зношування та при подальшому збільшенні рН від 7,4 до 11 відбувається зворотній процес, швидкість зношування стрімко зростає. Це свідчить про те, що експлуатація приведеної трібосистеми при використанні сировини з слабокислим та сильнолужним середовищем значно зменшує її ресурс.

Підставивши значення таблиці 3.5 та 3.8, розділу 3 в отримані вирази (4.18)–(4.21) можливо отримати значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера EB-350 «наконечник – філь’ера № 5» в слабокислому, базовому середовищі залежно від типу сировини та трібосистеми, які наведено в таблиці 4.5. З таблиці 4.5 видно, що найменше значення швидкості зношування має трібосистема – сталь 95X18 та чавун ЧХ32.

Таблиця 4.5 – Значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера EB-350, «наконечник – філь’ера № 5» в слабокислому базовому середовищі залежно від типу сировини та трібосистеми

Тип сировини	Швидкість зношування, мкм/год.			
	Сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	Сталь 40X та чавун ЧХ32	Сталь 95X18 та чавун ЧХ32	Сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32
Солома ячменю	2400,21	1400,58	994,81	3770,63
Деревинні залишки	1032,26	602,53	427,81	1621,73
Лузга	1610,85	940,07	667,63	2530,64
Пріла лузга	2540,17	1482,31	1052,47	3989,60

Швидкість зношування натурної трібосистеми екструдера EB-350 «хвостовик – філь’ера № 4», яка зображена в вигляді залежностей на рис. 4.2 та рівнянь, які їх описують (4.22)–(4.25), має не лінійну форму та не суттєво відрізняється від трібосистеми «наконечник – філь’ера № 5».

В інтервалі активної кислотності від 5 до 7,4 рН швидкість зношування зменшується, а при подальшому збільшенні до рН11 – зростає.

$$I_1 = 214,07pH_1^2 + 41,10pH_1 \cdot A_{абр.1} - 3288,12pH_1 - 6,32A_{абр.1} + 11130,66; \quad (4.22)$$

$$I_2 = 124,91pH_2^2 + 23,98pH_2 \cdot A_{абр.2} - 1918,60pH_2 - 2,98A_{абр.2} + 7234,68; \quad (4.23)$$

$$I_3 = 88,67pH_3^2 + 17,03pH_3 \cdot A_{абр.3} - 1361,94pH_3 - 2,13A_{абр.3} + 5135,69; \quad (4.24)$$

$$I_4 = 336,13pH_4^2 + 64,54pH_4 \cdot A_{абр.4} - 6292,39pH_4 - 9,81A_{абр.4} + 23727,73. \quad (4.25)$$

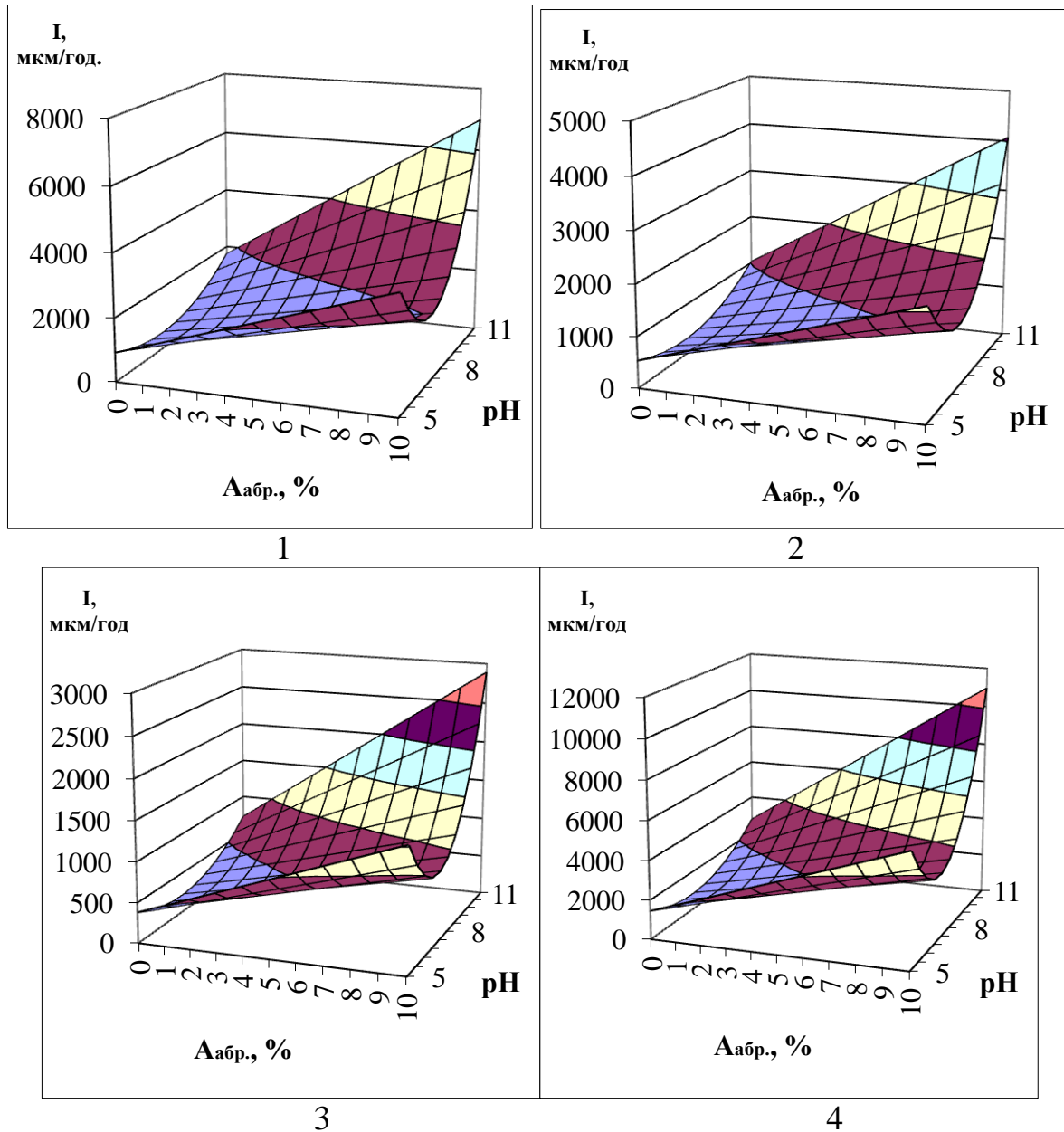


Рис. 4.2 – Розрахункові значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350, «хвостовик – філь’єра № 4»: 1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Підставивши значення таблиці 3.5 та 3.8 розділу 3 в отриманні вирази (4.22) – (4.25) можливо отримати значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «хвостовик – філь’єра № 4» в слабкислому,



базовому середовищі залежно від типу сировини та трібосистеми, які наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера EB-350 «хвостовик – філь’єра № 4» в слабокислому, базовому середовищі залежно від типу сировини та трібосистеми

Тип сировини	Швидкість зношування, мкм/год.			
	Сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	Сталь 40X та чавун ЧХ32	Сталь 95X18 та чавун ЧХ32	Сталь 40X10C2M та чавун ЧХ32
Солома ячменю	3249,51	1896,17	1346,82	5104,86
Деревинні залишки	1397,51	815,73	579,19	2195,57
Лузга	2180,85	1272,71	903,87	3426,09
Пріла лузга	3439,00	2006,82	1424,88	5401,31

Залежності (4.26)–(4.29) описують зміну швидкості зношування при використанні різних робочих середовищ для натурної трібосистеми екструдера EB-350 «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» (рис. 4.3).

$$I_1 = 260,90pH_1^2 + 50,08pH_1 \cdot A_{обр.1} - 4007,39pH_1 - 6,32A_{обр.1} + 15110,93; \quad (4.26)$$

$$I_2 = 152,23pH_2^2 + 29,22pH_2 \cdot A_{обр.2} - 2338,29pH_2 - 3,63A_{обр.2} + 8817,27; \quad (4.27)$$

$$I_3 = 108,07pH_3^2 + 20,75pH_3 \cdot A_{обр.3} - 1659,86pH_3 - 2,60A_{обр.3} + 6259,12; \quad (4.28)$$

$$I_4 = 409,66pH_4^2 + 78,66pH_4 \cdot A_{обр.4} - 6292,39pH_4 - 9,81A_{обр.4} + 23727,73. \quad (4.29)$$

Підставивши значення таблиці 3.5 та 3.8 розділу 3 в отриманні вирази (4.26)–(4.29) можливо отримати значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера EB-350 «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» в слабокислому, базовому середовищі залежно від типу сировини та трібосистеми, які наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» в слабокислому, базовому середовищі залежно від типу сировини та трібосистеми

Тип сировини	Швидкість зношування, мкм/год.			
	Сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	Сталь 40X та чавун ЧХ32	Сталь 95X18 та чавун ЧХ32	Сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32
Солома ячменю	3960,35	2310,95	1641,43	1641,43
Деревинні залишки	1703,22	994,17	705,88	705,88
Лузга	2657,91	1551,12	1101,59	1101,59
Пріла лузга	4191,28	2445,81	1736,57	1736,57

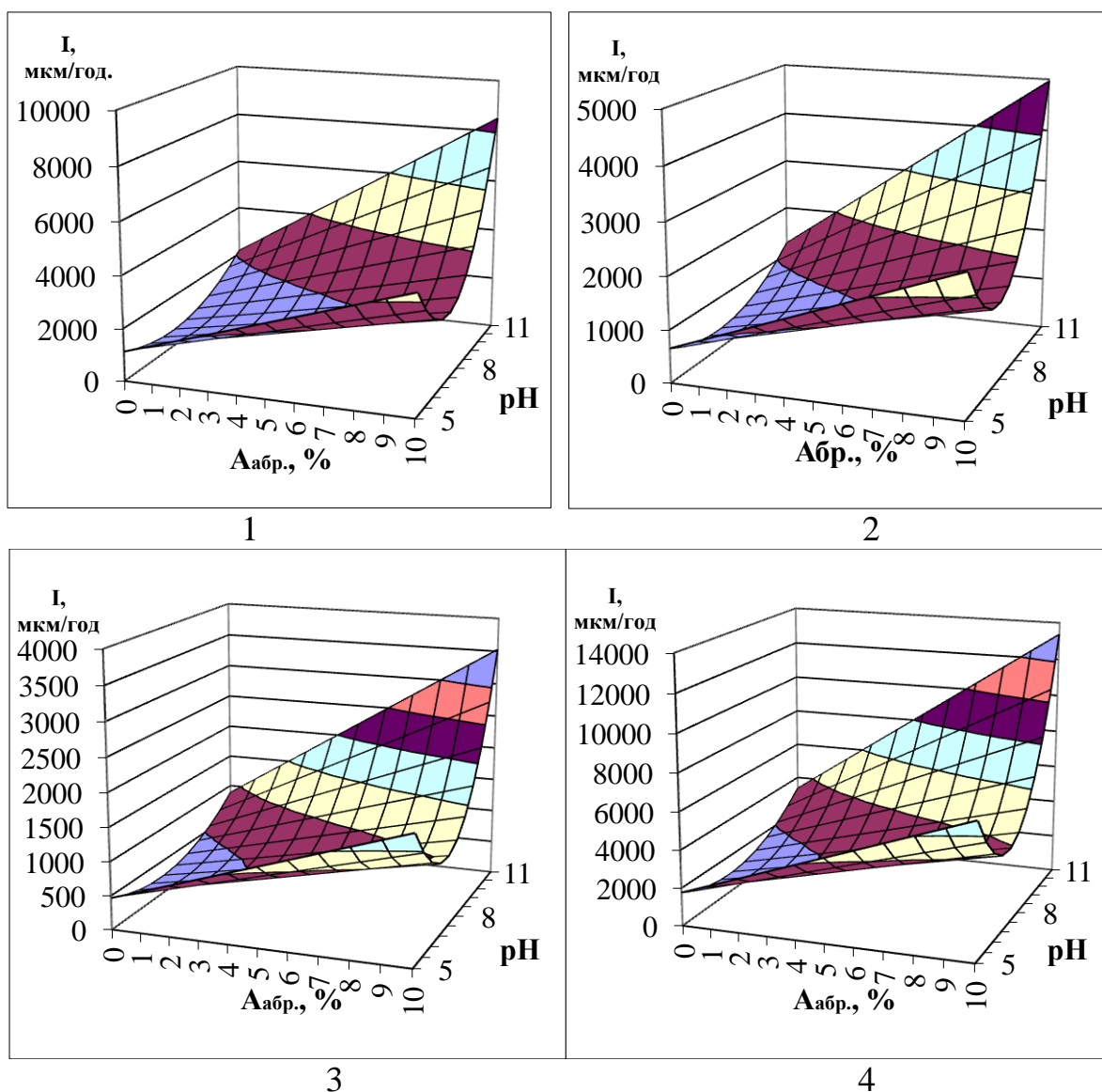


Рис. 4.3 – Розрахункові значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3»: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32

Для трібосистеми екструдера ЕВ-350М «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» зміна швидкості зношування описується (4.30)–(4.33) (рис. 4.4).

$$I_1 = 192,18pH_1^2 + 36,89pH_1 \cdot A_{абр.1} - 2951,83pH_1 - 4,65A_{абр.1} + 11130,66; \quad (4.30)$$

$$I_2 = 112,13pH_2^2 + 29,22pH_2 \cdot A_{абр.2} - 2338,29pH_2 - 3,63A_{абр.2} + 8817,27; \quad (4.31)$$

$$I_3 = 79,60pH_3^2 + 15,29pH_3 \cdot A_{абр.3} - 1222,65pH_3 - 1,91A_{абр.3} + 4610,45; \quad (4.32)$$

$$I_4 = 301,76pH_4^2 + 57,94pH_4 \cdot A_{абр.4} - 4634,96pH_4 - 7,23A_{абр.4} + 17477,77. \quad (4.33)$$

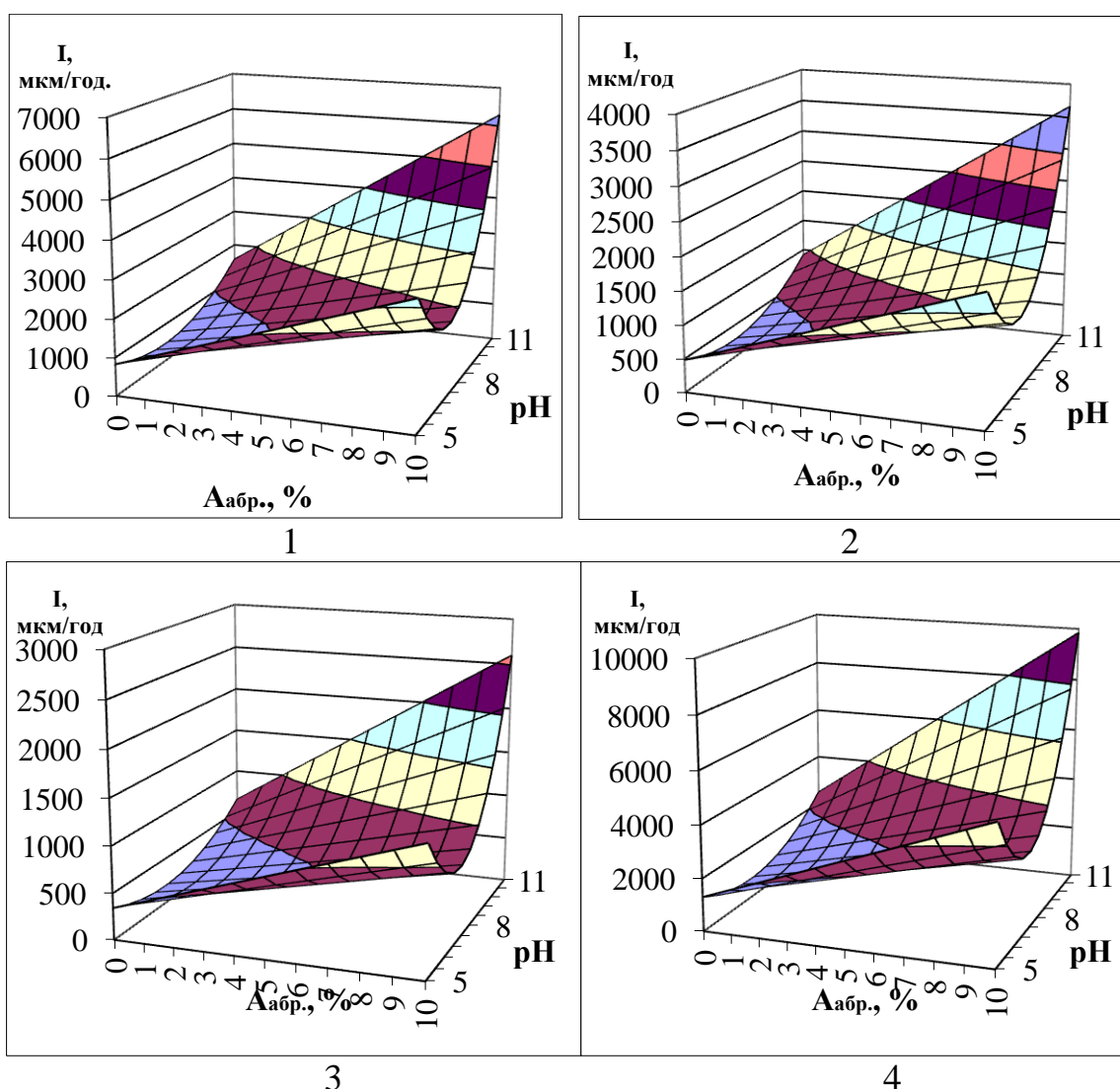


Рис. 4.4 – Розрахункові значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350М «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3»: 1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

На величину швидкості зношування в трібосистемах великий вплив має абразивність та кислотність. З результатів розрахунку швидкості зношування, представлених на рисунках 4.1 – 4.4, видно, що слаболужне робоче середовище значно краще, ніж слабокисле та сильнолужне.

Підставивши значення таблиці 3.5 та 3.8 в (4.30)–(4.33), можливо отримати значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350М «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» в слабокислому, базовому середовищі залежно від типу сировини та трібосистеми, які наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Значення швидкості зношування натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350М «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» в слабокислому, базовому середовищі залежно від типу сировини та трібосистеми

Тип сировини	Швидкість зношування, мкм/год.			
	Сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2	Сталь 40Х та чавун ЧХ32	Сталь 95Х18 та чавун ЧХ32	Сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32
Солома ячменю	2917,18	1702,24	1209,07	4582,77
Деревинні залишки	1254,59	732,30	519,95	1971,02
Лузга	1957,81	1142,55	811,43	3075,70
Пріла лузга	3087,28	1801,58	1279,15	4848,90

Сили тертя при використанні різних робочих середовищ та матеріалів для натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «наконечник – філь’єра № 5» представлена на рис. 4.5 та описується залежностями:

$$F_{тер.1} = 514,94pH_1^2 + 98,86pH_1 \cdot A_{абр.1} - 7909,52pH_1 - 12,29A_{абр.1} + 29825,58; \quad (4.34)$$

$$F_{тер.2} = 410,32pH_2^2 + 78,77pH_2 \cdot A_{абр.2} - 6302,48pH_2 - 9,86A_{абр.2} + 6302,48; \quad (4.35)$$

$$F_{тер.3} = 242,93pH_3^2 + 46,63pH_3 \cdot A_{абр.3} - 3731,49pH_3 - 5,79A_{абр.3} + 14070,79; \quad (4.36)$$

$$F_{тер.4} = 414,60pH_4^2 + 79,58pH_4 \cdot A_{абр.4} - 6368,42pH_4 - 9,88A_{абр.4} + 24014,15 \quad (4.37)$$

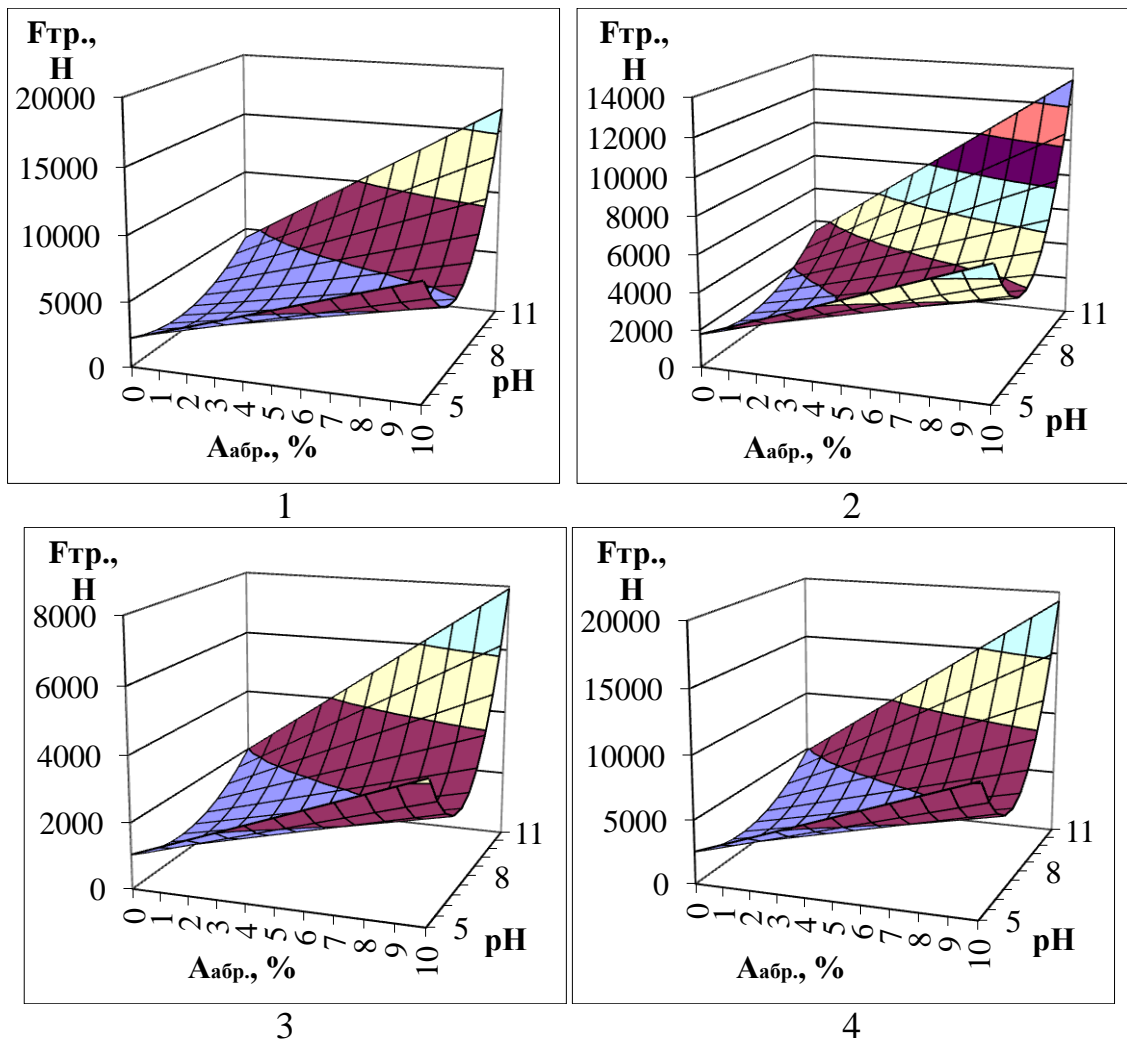


Рис. 4.5. Розрахункові значення сили тертя натурної трібосистеми екструдера EB-350 «наконечник – філь’ера № 5»: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Для трібосистеми екструдера EB-350 «хвостовик – філь’ера №4» зміна сили тертя зображена на рис. 4.6 та описується залежностями:

$$F_{\text{тер.1}} = 943,68pH_1^2 + 181,17pH_1 \cdot A_{\text{абр.1}} - 14494,92pH_1 - 22,53A_{\text{абр.1}} + 54658,14; \quad (4.38)$$

$$F_{\text{тер.2}} = 751,94pH_2^2 + 144,36pH_2 \cdot A_{\text{абр.2}} - 11549,87pH_2 - 18,07A_{\text{абр.2}} + 43552,36; \quad (4.39)$$

$$F_{\text{тер.3}} = 445,20pH_3^2 + 85,45pH_3 \cdot A_{\text{абр.3}} - 6838,31pH_3 - 10,61A_{\text{абр.3}} + 25786,03; \quad (4.40)$$

$$F_{\text{тер.4}} = 1082,34pH_4^2 + 207,79pH_4 \cdot A_{\text{абр.4}} - 16624,86pH_4 - 26,13A_{\text{абр.4}} + 62688,85.$$

(4.41)

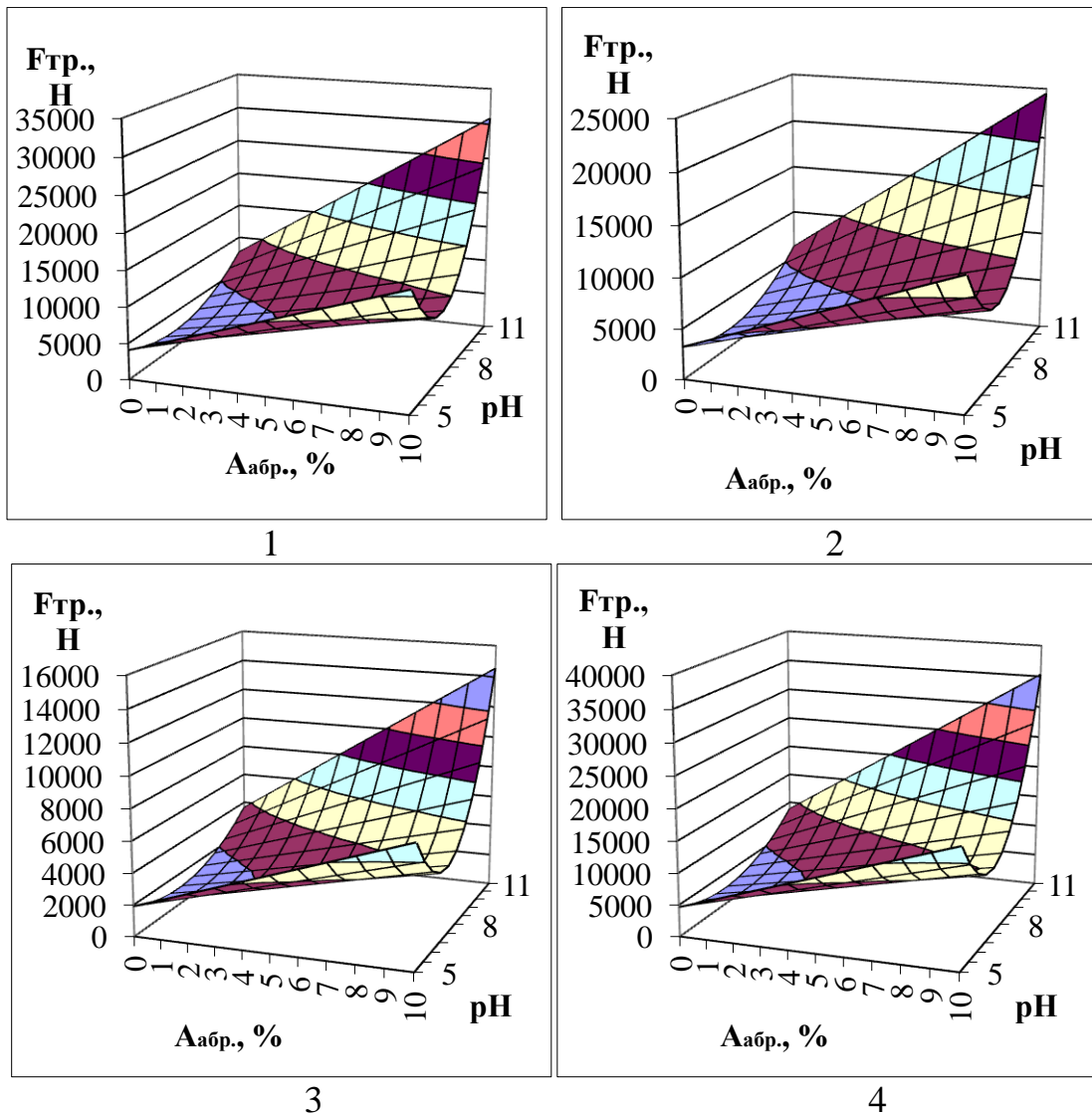


Рис. 4.6 – Розрахункові значення сили тертя натурної трібосистеми екструдера EB-350 «хвостовик – філь’єра № 4»: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Для трібосистеми екструдера EB-350 «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» зміна сили тертя зображена на рис. 4.7 та описується залежностями:

$$F_{\text{тер.1}} = 878,83pH_1^2 + 168,72pH_1 \cdot A_{\text{абр.1}} - 13498,91pH_1 - 20,98A_{\text{абр.1}} + 50902,33;$$

(4.42)

$$F_{тер.2} = 700,27pH_2^2 + 134,44pH_2 \cdot A_{абр.2} - 10756,22pH_2 - 16,83A_{абр.2} + 40559,67; \quad (4.43)$$

$$F_{тер.3} = 414,60pH_3^2 + 79,58pH_3 \cdot A_{абр.3} - 6368,42pH_3 - 9,88A_{абр.3} + 24014,15; \quad (4.44)$$

$$F_{тер.4} = 1007,97pH_4^2 + 193,52pH_4 \cdot A_{абр.4} - 15482,49pH_4 - 24,34A_{абр.4} + 58381,21. \quad (4.45)$$

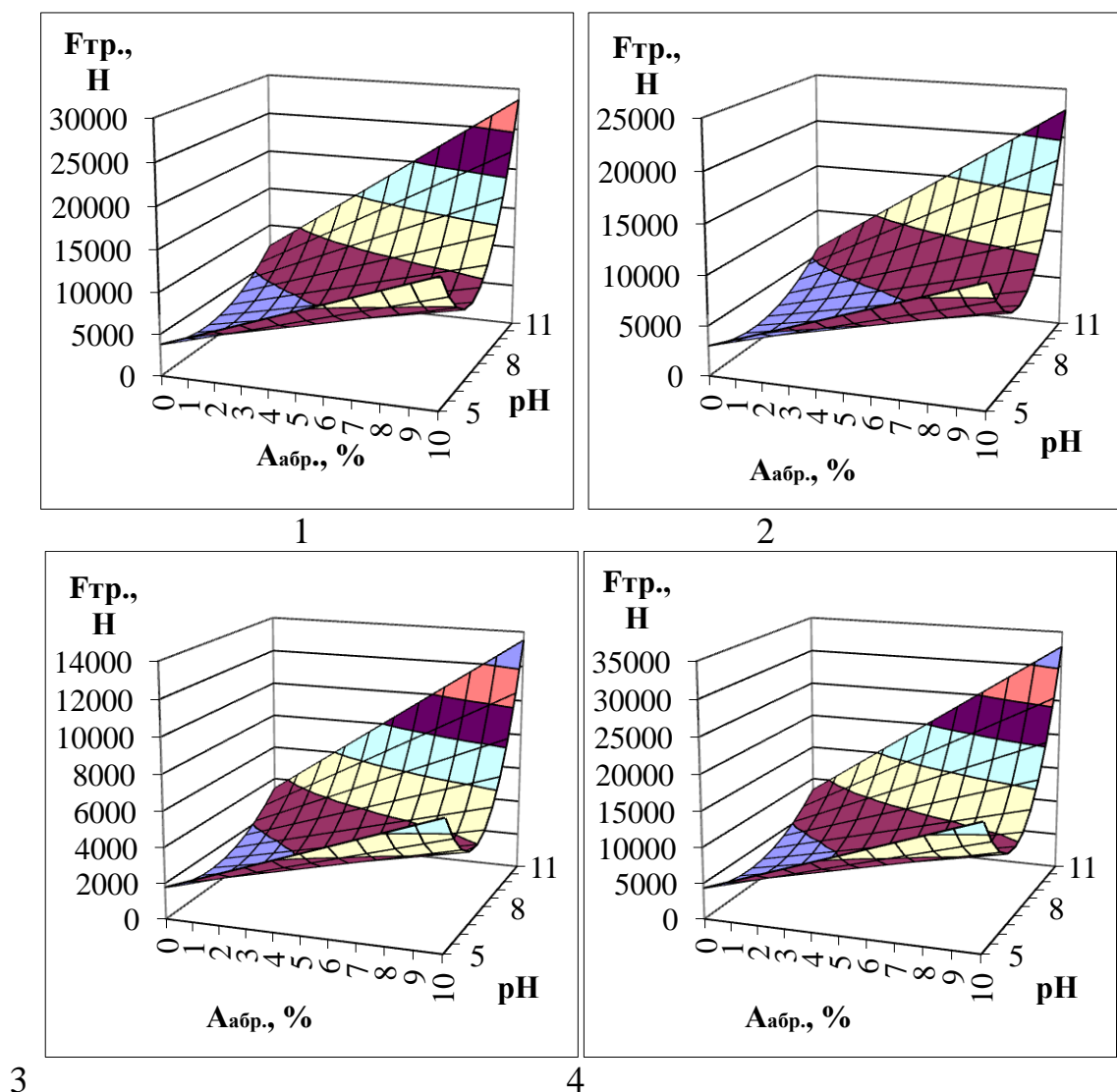


Рис. 4.7 – Розрахункові значення сили тертя натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «шнек конічний – філь’ера № 1, 2 та 3»: 1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

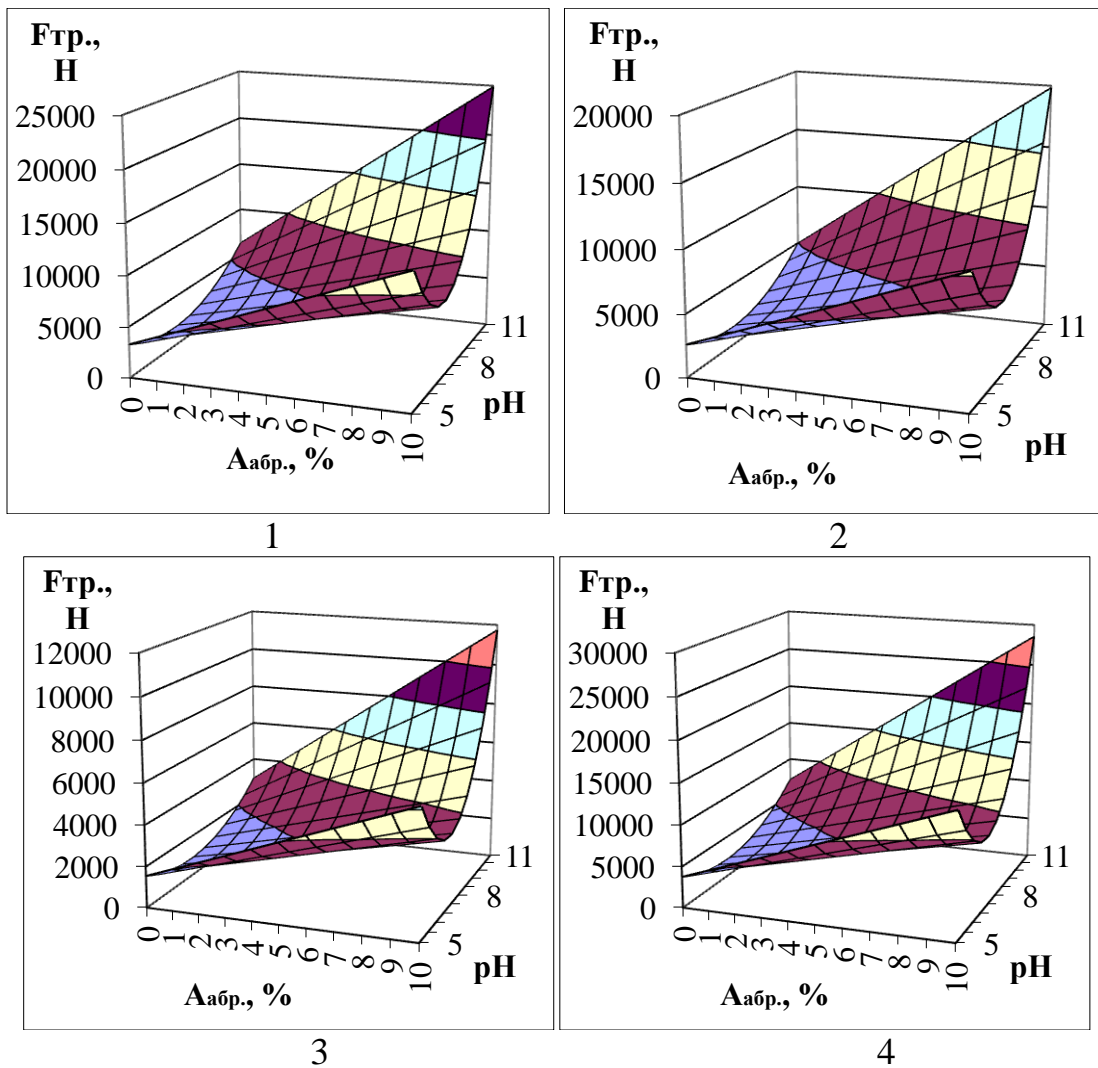


Рис. 4.8 – Розрахункові сили тертя натурної трібосистеми екструдера EB-350M «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3»: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Для трібосистеми екструдера EB-350M «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» зміна сили тертя зображена на рис. 4.8 та описується залежностями:

$$F_{тер.1} = 762,88pH_1^2 + 146,46pH_1 \cdot A_{абр.1} - 11717,80pH_1 - 18,21A_{абр.1} + 44186,05; \quad (4.46)$$

$$F_{тер.2} = 607,88pH_2^2 + 116,70pH_2 \cdot A_{абр.2} - 9337pH_2 - 14,61A_{абр.2} + 35208,05; \quad (4.47)$$

$$F_{тер.3} = 359,9pH_3^2 + 69,08pH_3 \cdot A_{абр.3} - 5528,14pH_3 - 8,57A_{абр.3} + 20845,62;$$



(4.48)

$$F_{\text{тер.4}} = 874,97pH_4^2 + 167,98pH_4 \cdot A_{\text{обр.4}} - 13439,66pH_4 - 21,13A_{\text{обр.4}} + 50678,13.$$

(4.49)

З результатів, які представлені на рисунках 4.5–4.8, видно, що використання слаболужного середовища є значно кращим, ніж слабокисле та сильнолужне середовище. Це свідчить про те, що на подолання сили тертя при використанні слаболужного середовища порівняно з слабокислим та сильнолужним, необхідно менше енергії, а, відповідно, і менше електроенергії.

Також вагомими факторами, від яких залежить величина сили тертя, є сумісність матеріалів з яких виготовлені трібосистеми, та їхні конструктивні особливості. До конструктивних особливостей можливо віднести співвідношення площ тертя, геометричних розмірів трібосистем. Найменше значення сили тертя спостерігається в трібосистемі екструдера ЕВ-350М «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» та в трібосистемі екструдера ЕВ-350 «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3».

Для прогнозування та розрахунків ресурсу екструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М було визначено граничну величину зносу трібосистем  $\Delta$ , яка для певних трібосистем після експлуатації та їх демонтажу була обрана на підставі даних статистичного аналізу підприємств, які їх виготовляють та експлуатують:

- натурні трібосистеми екструдера ЕВ-350:
- «наконечник – філь’єра № 5» – 6000 мкм;
- «хвостовик – філь’єра № 4» – 10000 мкм;
- «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» – 50000 мкм;
- натурна трібосистема екструдера ЕВ-350М «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» – 25000 мкм.

Ресурс трібосистем екструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М розраховується за допомогою виразу (4.82), який наведений в роботі [162]. Всі розрахунки проводились на основі результатів, отриманих під час лабораторних випробувань:

$$R = \frac{\Delta}{I_n(pH; A_{\text{обр.}})}, \quad (4.50)$$

де  $R$  – ресурс, години;

$\Delta$  – гранична величина зносу трібосистеми, мкм;

$I_n$  – швидкість зношування натурної трібосистеми, яка є функцією від абразивності та кислотності, мкм/год.

Ресурс натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «наконечник – філь’єра № 5» при використанні різних робочих середовищ та матеріалів представлено на рис. 4.9 та описується залежностями:

$$R_1 = -0,47pH_1^2 + 0,08A_{абр.1}^2 + 0,05pH_1 \cdot A_{абр.1} + 6,85pH_1 - 1,94A_{абр.1} - 12,79; \quad (4.51)$$

$$R_2 = -0,8pH_2^2 + 0,14A_{абр.2}^2 + 0,09pH_2 \cdot A_{абр.2} + 11,75pH_2 - 3,33A_{абр.2} - 21,91; \quad (4.52)$$

$$R_3 = -1,88pH_3^2 + 0,34A_{абр.3}^2 + 0,21pH_3 \cdot A_{абр.3} + 27,54pH_3 - 7,81A_{абр.3} - 51,32; \quad (4.53)$$

$$R_4 = -0,3pH_4^2 + 0,05A_{абр.4}^2 + 0,03pH_4 \cdot A_{абр.4} + 4,36pH_4 - 1,24A_{абр.4} - 8,13. \quad (4.54)$$

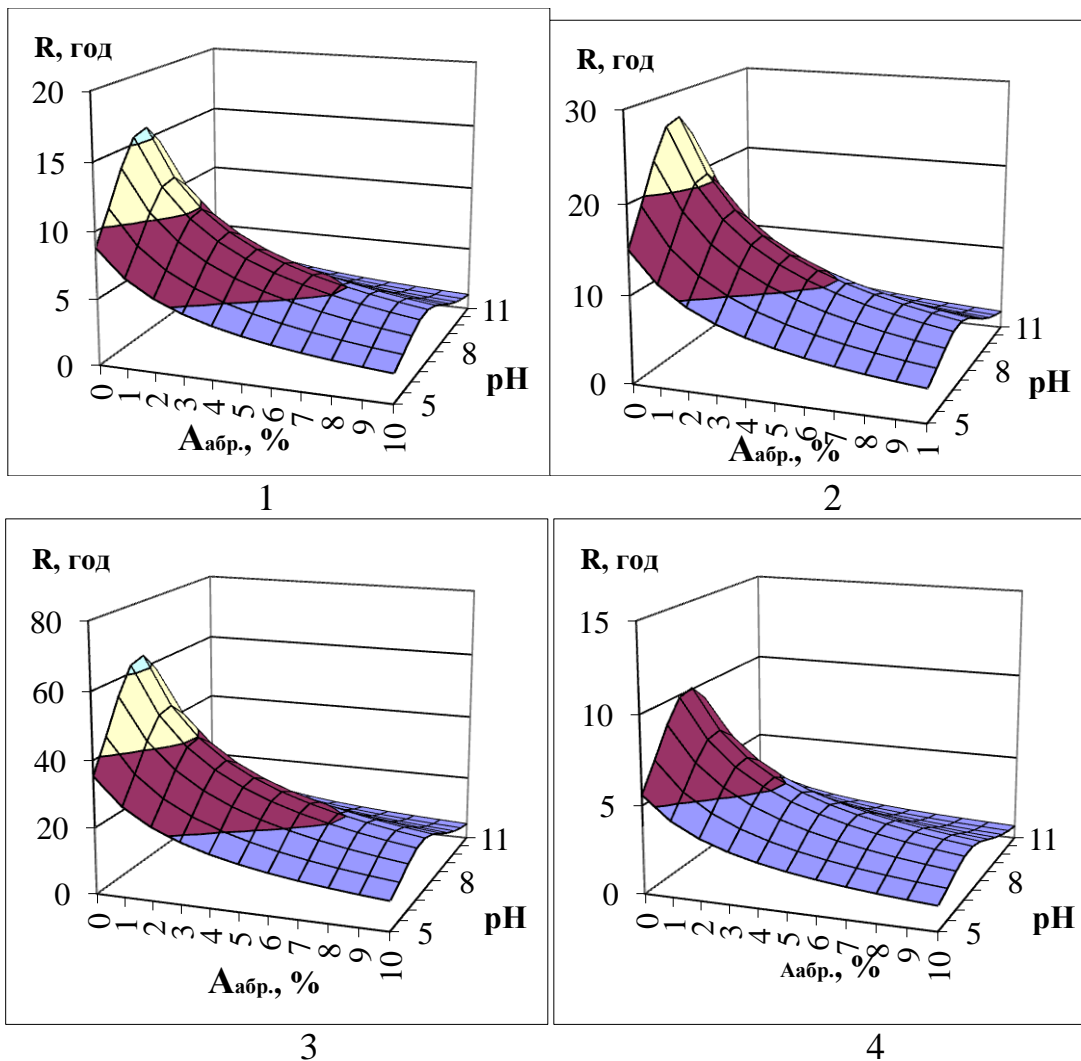


Рис. 4.9 – Розрахункові значення ресурсу натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «нако-  
нечник – філь’єра № 5»: 1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40Х та чавун ЧХ32;  
3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Для трібосистеми екструдера ЕВ-350 «хвостовик – філь’єра № 4» зміна  
ресурсу зображена на рис. 4.10 та описується залежностями:

$$R_1 = -0,58pH_1^2 + 0,10A_{абр.1}^2 - 0,06pH_1 \cdot A_{абр.1} + 8,44pH_1 - 2,39A_{абр.1} - 15,74; \quad (4.55)$$

$$R_2 = -0,99pH_2^2 + 0,18A_{абр.2}^2 - 0,11pH_2 \cdot A_{абр.2} + 14,46pH_2 - 4,10A_{абр.2} - 26,97; \quad (4.56)$$

$$R_3 = -1,39pH_3^2 + 0,25A_{абр.3}^2 + 0,15pH_3 \cdot A_{абр.3} + 20,34pH_3 - 5,77A_{абр.3} - 37,91; \quad (4.57)$$

$$R_4 = -0,37pH_4^2 + 0,07A_{абр.4}^2 + 0,04pH_4 \cdot A_{абр.4} + 5,37pH_4 - 1,52A_{абр.4} - 10,01. \quad (4.58)$$

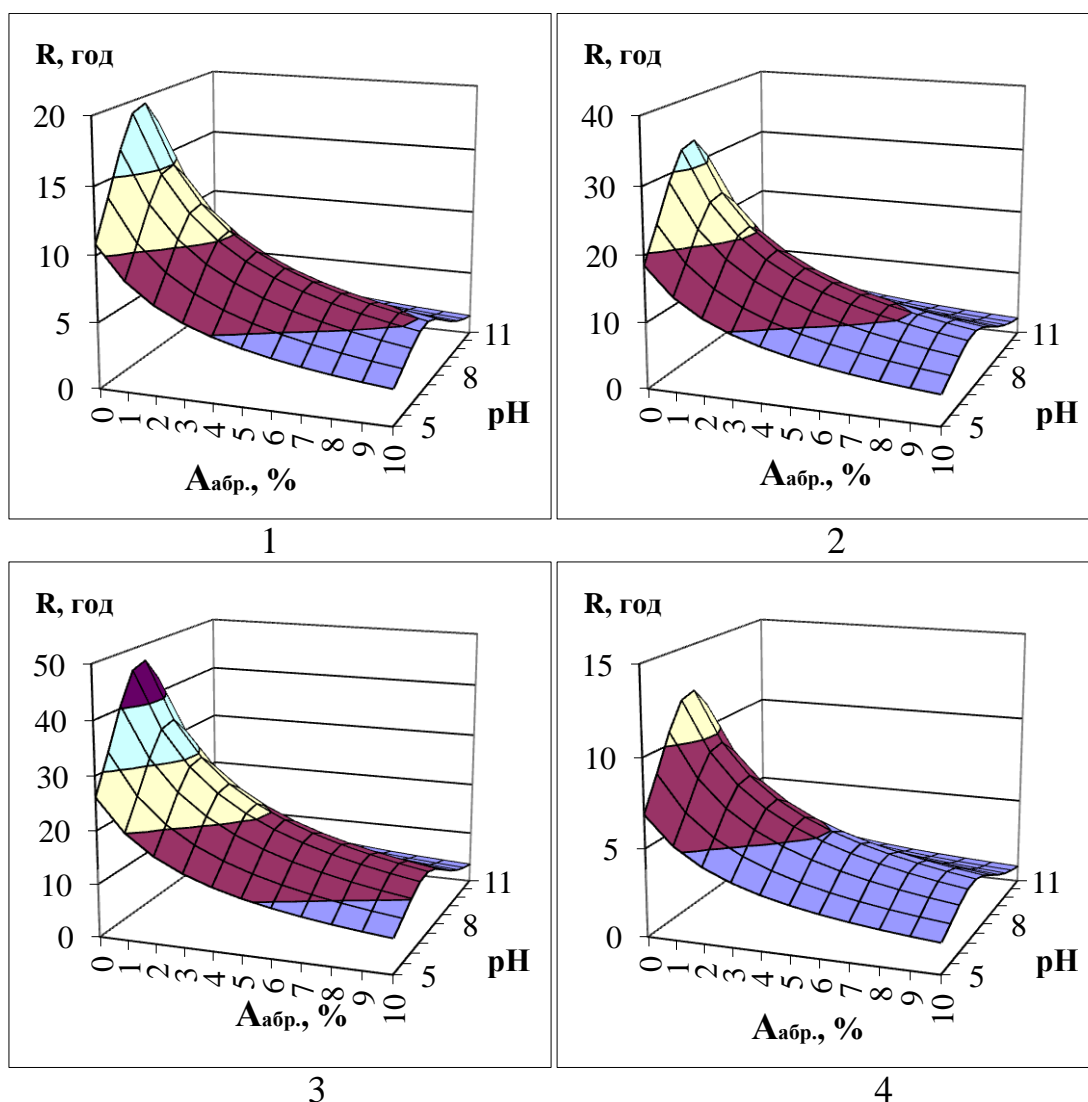


Рис. 4.10 – Розрахункові значення ресурсу натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «хвостовик – філь’єра № 4»: 1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Для трібосистеми екструдера ЕВ-350 «шнек конічний – філь’єра №1, 2 та 3» зміна ресурсу зображена на рис. 4.11 та описується залежностями:

$$R_1 = -2,37pH_2^2 + 0,42A_{абр.2}^2 + 0,26pH_2 \cdot A_{абр.2} + 34,62pH_2 - 9,82A_{абр.2} - 64,58; \quad (4.59)$$

$$R_2 = -4,05pH_2^2 + 0,72A_{абр.2}^2 + 0,45pH_2 \cdot A_{абр.2} + 59,32pH_2 - 16,82A_{абр.2} - 110,65; \quad (4.60)$$

$$R_3 = -5,7pH_2^2 + 1,02A_{абр.2}^2 + 0,63pH_2 \cdot A_{абр.2} + 83,45pH_2 - 23,68A_{абр.2} - 155,52; \quad (4.61)$$

$$R_4 = -1,5pH_2^2 + 0,27A_{абр.2}^2 + 0,17pH_2 \cdot A_{абр.2} + 22,02pH_2 - 6,25A_{абр.2} - 41,05. \quad (4.62)$$

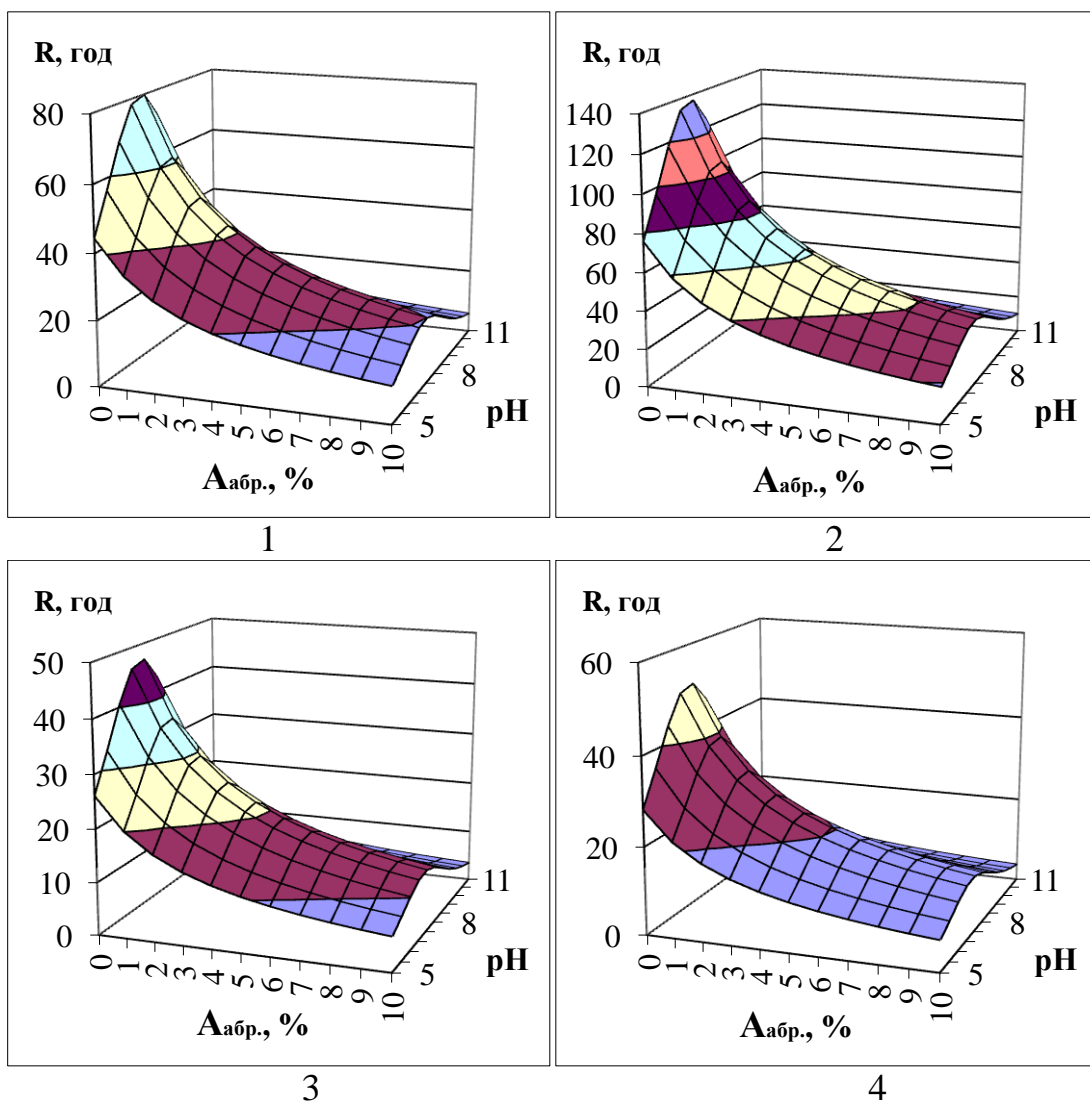


Рис. 4.11 – Розрахункові значення ресурсу натурної трібосистеми екструдера ЕВ-350 «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3»: 1 – сталь 40Х та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40Х та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95Х18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40Х10С2М та чавун ЧХ32

Для трібосистеми екструдера ЕВ-350М «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» зміна ресурсу зображена на рис. 4.8 та описується залежностями:

$$R_1 = -1,61pH_2^2 + 0,29A_{обр.2}^2 + 0,18pH_2 \cdot A_{обр.2} + 23,5pH_2 - 6,66A_{обр.2} - 43,84; \quad (4.63)$$

$$R_2 = -2,75pH_2^2 + 0,49A_{обр.2}^2 + 0,3pH_2 \cdot A_{обр.2} + 40,27pH_2 - 11,42A_{обр.2} - 75,11; \quad (4.64)$$

$$R_3 = -3,87pH_2^2 + 0,69A_{обр.2}^2 + 0,43pH_2 \cdot A_{обр.2} + 56,64pH_2 - 16,07A_{обр.2} - 105,56; \quad (4.65)$$

$$R_4 = -1,02pH_2^2 + 0,18A_{обр.2}^2 + 0,11pH_2 \cdot A_{обр.2} + 14,95pH_2 - 4,24A_{обр.2} - 27,86. \quad (4.66)$$

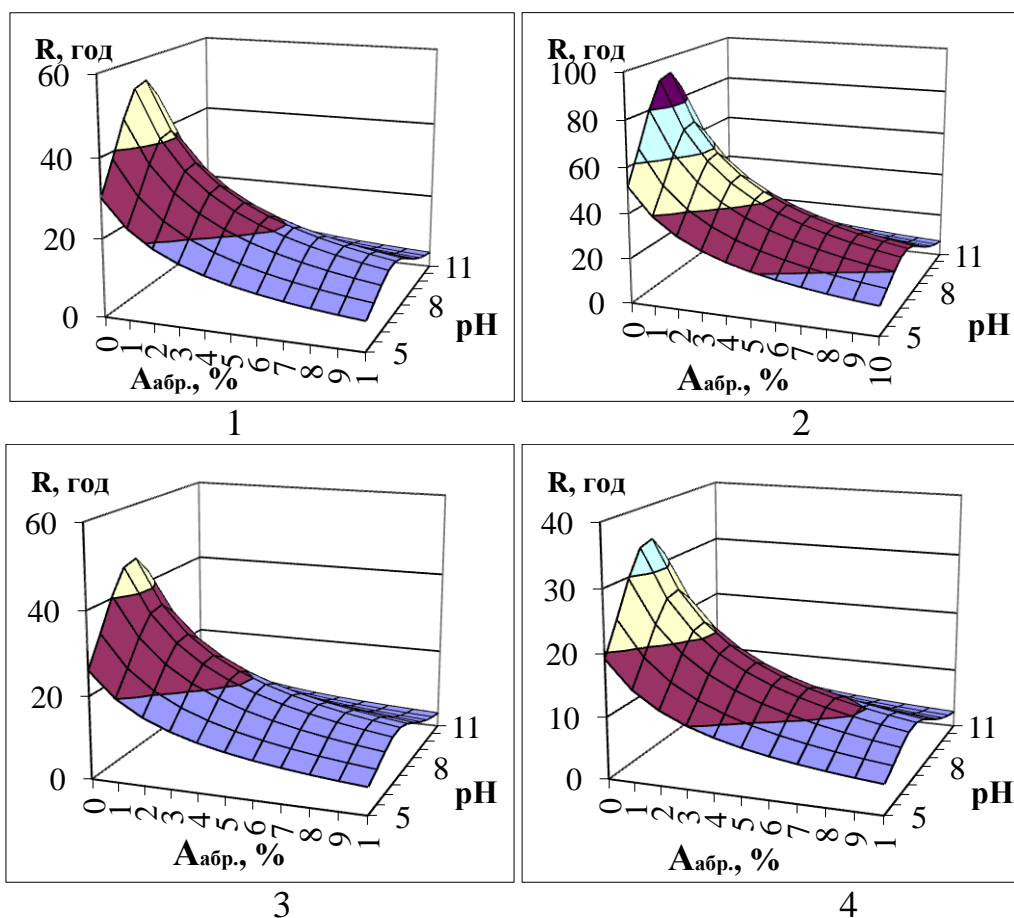


Рис. 4.12 – Розрахункові значення ресурсу натурної трібосистеми екструдера EB-350M «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3»: 1 – сталь 40X та чавун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X та чавун ЧХ32; 3 – сталь 95X18 та чавун ЧХ32; 4 – сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32

Підставивши рівняння (4.18)–(4.33) до виразу (4.50), які описують зміну швидкості зношування натурних трібосистем від навантаження, отримаємо значення ресурсу кожної трібосистеми екструдера EB-350 та EB-350M при застосуванні різних робочих середовищ, які наведено у вигляді рисунків 4.9–4.12 та залежностей (4.51)–(4.66).

Ресурс екструдера EB-350 в цілому буде визначати трібосистеми з мінімальним розрахунковим ресурсом. З рисунків 4.9–4.12 видно, що максимальний ресурс є характерним для трібосистеми екструдера EB-350 «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3». На другому місці – трібосистема «наконечник – філь’єра № 5», а мінімальний ресурс характерний для натурної трібосистеми «хвостовик – філь’єра № 4». Зношування даної трібосистеми суттєво впливає на продуктивність екструдера EB-350.

За даними нормативно-технічної документації заводу-виробника ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» гарантійне напрацювання хвостовика і наконечника екструдера EB-350 – 8 годин, інших частин – 150 годин [128]. Середнє напрацювання шнека конічного екструдера EB-350M – 24 години, інших частин – 150 годин [162].

Було проведено експертне опитування інженерів підприємств виробників паливних брикетів, яке показало, що ресурс частин, окрім хвостовика та наконечника екструдера EB-350, не перевищує 100 годин, за винятком конічного шнека екструдера EB-350M – 120 годин, що співпадає з даними моделювання.

На ресурс трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M найбільш впливає робоче середовище, в якому вони експлуатуються, та сумісність матеріалів, з яких вони виготовлені. Виходячи з результатів, представлених на рисунках 4.9–4.12, можливо зробити висновок, що найбільшим ресурсом екструдерів EB-350 та EB-350M буде володіти трібосистема – сталь 95X18 та чавун ЧХ32 при експлуатації в слаболужному середовищі, близькому до нейтрального.

Використання слаболужного робочого середовища рН7,4 та повне очищення сировини від абразивних домішок призводить до збільшення ресурсу екструдера EB-350 при пресуванні соломи – в 1,41 рази, деревинних залишків – в 2,33 рази, лузги насіння соняшнику – в 13,16 разів, прілої лузги – в 10,23 рази.

При зміні матеріалів на сталь 95X18 та чавун ЧХ32 відбувається збільшення ресурсу екструдера EB-350 при пресуванні соломи – в 2,76 рази, деревинних залишків – в 4,56 рази, лузги насіння соняшнику – в 25,76 рази, прілої лузги – в 20,02 рази.

### 4.3 Висновки за четвертим розділом

1. Застосовуючи теорію подібності та моделювання, отримані критеріальні рівняння подібності та визначені масштабні коефіцієнти переходу від моделі до натури. 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. Було встановлено, що при збільшенні рН від 5 до 7,4 відбувається зменшення швидкості зношування та сили тертя. При подальшому збільшенні рН від 7,4 до 11 відбувається зворотній процес, швидкість зношування та сила тертя стрімко зростає.

2. Встановлено, що для соломи ячменю, лузги насіння соняшнику, деревинних залишків та прілої лузги соняшнику найменше значення швидкості зношування має трібосистема – сталь 95X18 та чавун ЧХ32. Швидкість зношування при рН7,4 та абразиву 1 % трібосистеми (сталь 40X та чавун ЧХ22Н2) менша, ніж швидкість зношування за базових умов. При очищенні до абразивності 1 %, нейтралізації кислотності до рН7,4 та зміні трібосистеми для соломи ячменю найменше значення швидкості зношування має трібосистема – сталь 95X18 та чавун ЧХ32.

3. Фізичним моделюванням визначено, що використання слаболужного робочого середовища рН7,4 призводить до збільшення ресурсу екструдера EB-350 при пресуванні соломи ячменю – в 1,41 рази, деревинних залишків – у 2,33 рази, лузги насіння соняшнику – у 13,16 рази, прілої лузги – у 10,23 рази. При зміні матеріалів на сталь 95X18 та чавун ЧХ32 відбувається збільшення ресурсу екструдера EB-350 при пресуванні соломи ячменю – у 2,76 рази, деревинних залишків – 4,56 рази, лузги насіння соняшнику – у 25,76 рази, прілої лузги – у 20,02 рази.

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПОВЕРХНЯХ ТЕРТЯ ТРІБОСИСТЕМ

Даний розділ присвячений дослідженню робочих поверхонь тертя трібосистем, які змінюються під впливом механохімічних процесів. Наведено оцінку впливу робочого середовища (активної кислотності рН та абразивності) на поверхні тертя трібосистем. Досліджено наявність продуктів корозії та механічних дефектів на робочих поверхнях тертя, які утворюються після абразивно-корозійного зношування. Проведено лабораторні дослідження механохімічних процесів на поверхнях тертя модельних трібосистем екструдера EB-350, які полягали у визначенні мікротвердості поверхневого шару робочих поверхонь та шорсткості поверхонь тертя.

#### **5.1 Дослідження мікротвердості та процесів зношування на робочих поверхнях тертя модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M**

Мікротвердість поверхневого шару на робочих поверхнях тертя модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M вимірювали за допомогою стаціонарного мікротвердоміру по Мікро-Вікерсу UIT-NVmikro-1 УКРІНТЕХ.

Результати вимірювань мікротвердості поверхневого шару були отримані в цифровому форматі за допомогою спеціального програмного забезпечення та були отримані мікрофотографії робочих поверхонь модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M при використанні сировини з слаболужним середовищем в порівнянні з сировиною з слабокислим та сильнолужним середовищем, які представлено на рис. 5.1–5.12 та у таблиці 5.1.

Мікротвердість поверхневого шару визначалась на ділянках робочої поверхні з 10-ти кратним повторюванням.

Випробування різних варіантів трібосистем (сталь 40X і чавун ЧХ22Н2 та сталь 95X18 і чавун ЧХ32) показали, що на поверхнях тертя при використанні слабокислого середовища, рН5, без абразиву спостерігається крапкова корозія, яка характерна для пасивних металів та сплавів та кислого середовища, при цьому утворюються точкові язви (рис. 5.1). Зародження язви відбувається в місцях дефектів пасивної плівки (подряпини, розриви) або її слабкі місця, в зв'язку з неоднорідністю сплаву.

Зростає крапкова корозія у зв'язку з активним розчиненням крихкої оксидної плівки. На поверхні сталі 40X (рис. 5.1а), спостерігається не тільки загальна, але й велика крапкова корозія. На відміну від сталі 40X у сталі 95X18 загальна кількість крапкових уражень значно менше, що пов'язано з меншою швидкістю корозійних процесів (рис. 5.1а та 5.1б). Така тенденція характерна для чавуну ЧХ22Н2 та ЧХ32. Чавун ЧХ22Н2 має більше дефектів, язв від корозійних процесів, ніж чавун ЧХ32 (рис. 5.1в та 5.1г). При цьому мікротвердість поверхневого шару базової сталі 40X зменшується до 8445 МПа, сталі 95X18 – до 10349 МПа.



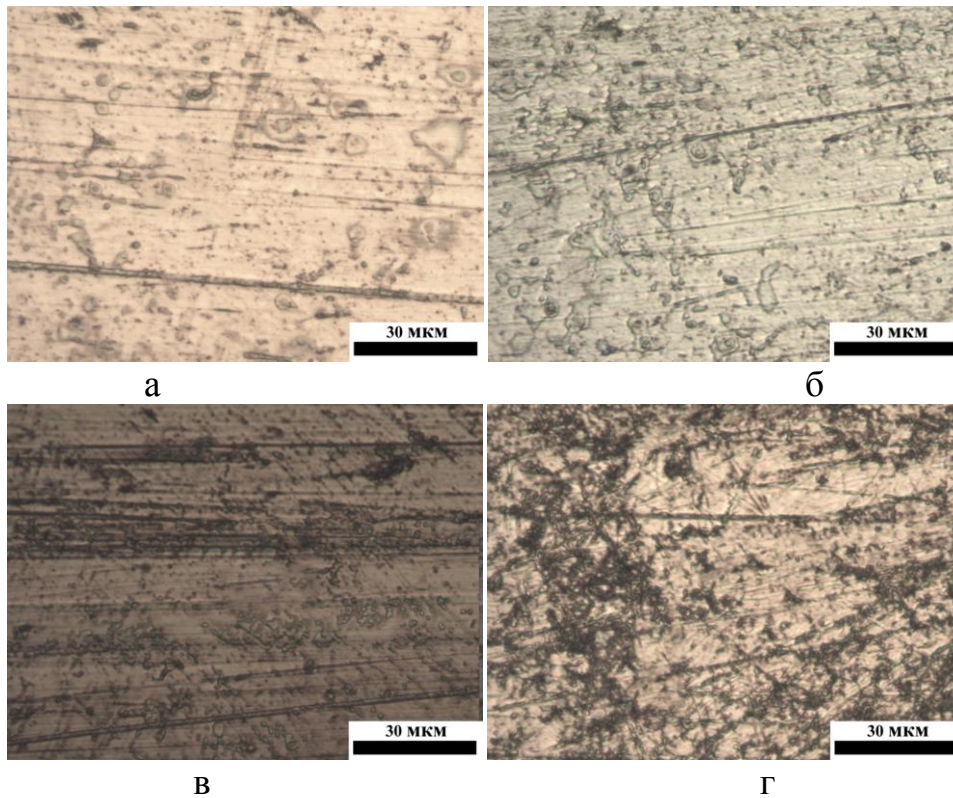


Рис. 5.1 – Мікрофотографії поверхонь тертя сталей при використанні слабкислого середовища рН5 без абразиву (x600): а – сталь 40Х; б – чавун ЧХ22Н2; в – сталь 95Х18; г – чавун ЧХ32

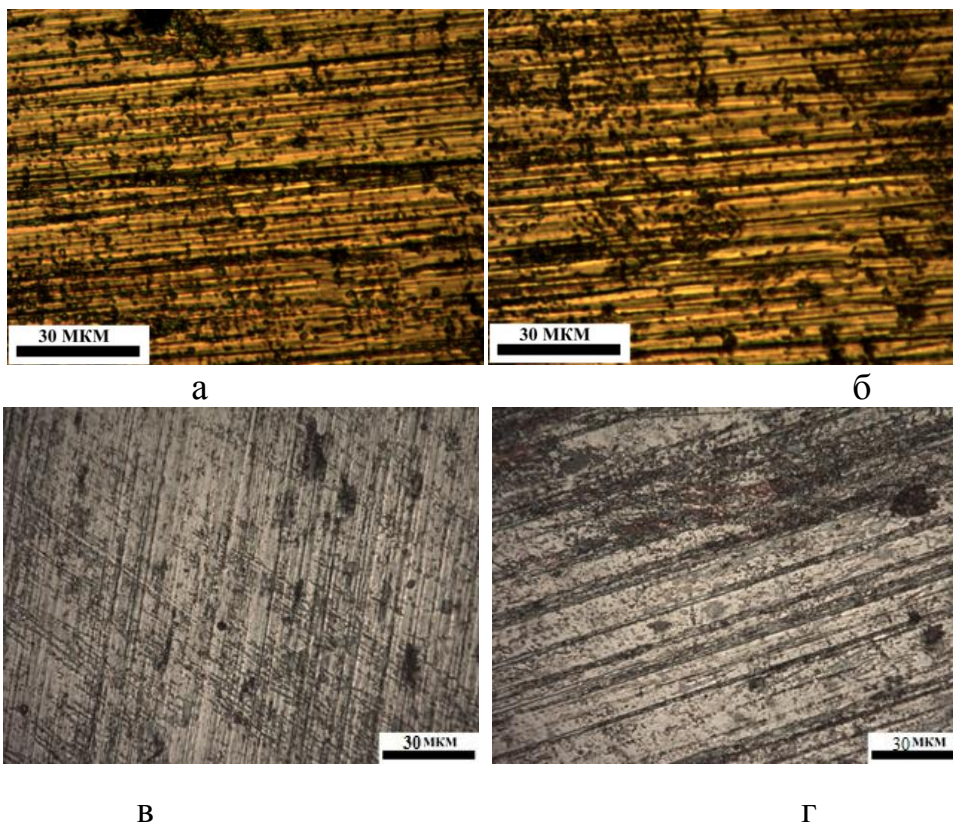


Рис. 5.2 – Мікрофотографії поверхонь тертя сталей при використанні слабкислого середовища рН5 та 10 % абразиву (x600): а – сталь 40Х; б – чавун ЧХ22Н2; в – сталь 95Х18; г – чавун ЧХ32

Наявність абразиву призводить до збільшення шорсткості та у зв'язку з наявністю дефектів підвищується гетерогенність поверхні, що призводить до збільшення схильності до точкової корозії та загальної корозії в цілому, що зображено на рис. 5.2. При цьому мікротвердість сталей та чавунів стає ще меншою, ніж без абразиву – у 1,03–1,25 рази.

У слаболужному середовищі при рН8 поверхня елементів трібосистем меш уражена корозією ніж у слабокислому середовищу, що зображено на рис. 5.3. На зразках, які випробовувались без абразиву, спостерігається гомогенна поверхня з наявністю слідів відпрацювання та утворення однорідної, не крихкої, захисної плівки. При цьому мікротвердість поверхневого шару базової сталі 40Х збільшується до 10280 МПа, підібраної сталі 95Х18 – до 11105 МПа.

Наявність абразиву призводить до збільшення шорсткості та у зв'язку з наявністю дефектів підвищується гетерогенність поверхні, що зображено на рис. 5.4. При цьому мікротвердість сталей та чавунів стає ще меншою, ніж без абразиву – в 1,03–1,3 рази.

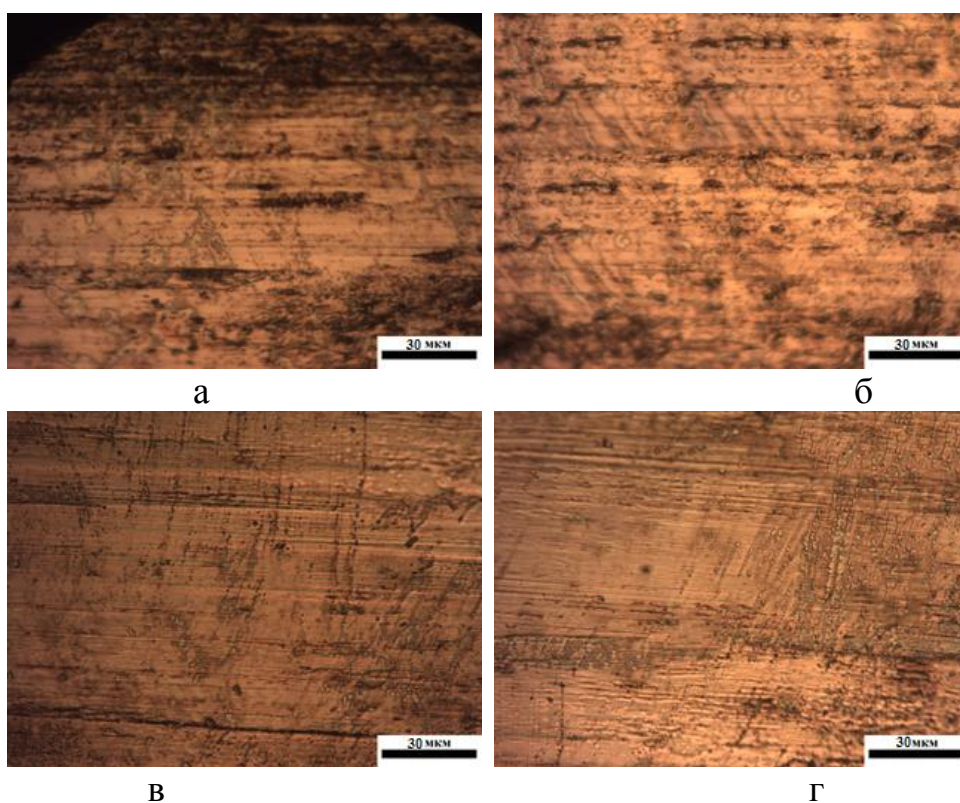


Рис. 5.3 – Мікрофотографії поверхонь тертя сталей при використанні слаболужного середовища рН8 без абразиву (х600): а – сталь 40Х; б – чавун ЧХ22Н2; в – сталь 95Х18; г – чавун ЧХ32

Найбільш уражені гетерогенні поверхні точковою корозією спостерігаються на рівні активної кислотності рН11 (рис. 5.5). Поверхня сталі 40Х та чавуну ЧХ22Н2 більш уражена корозією та дією абразивних часток, ніж поверхня сталі 95Х18.

При рН11 та 0 % абразиву мікротвердість поверхневого шару базової сталі 40Х зменшується до 6710 МПа, сталі 95Х18 – до 9549 МПа.

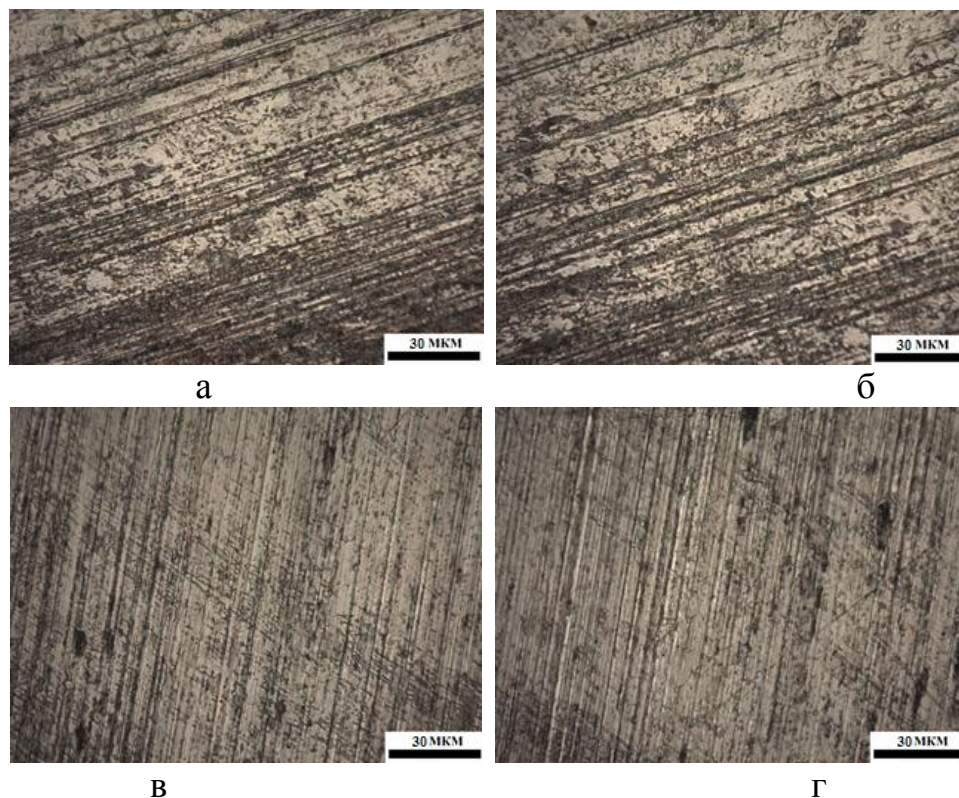


Рис. 5.4 – Мікрофотографії поверхонь тертя сталей при використанні слаболужного середовища рН8 та 10 % абразиву (х 600): а – сталь 40Х; б – чавун ЧХ22Н2; в – сталь 95Х18; г – чавун ЧХ32

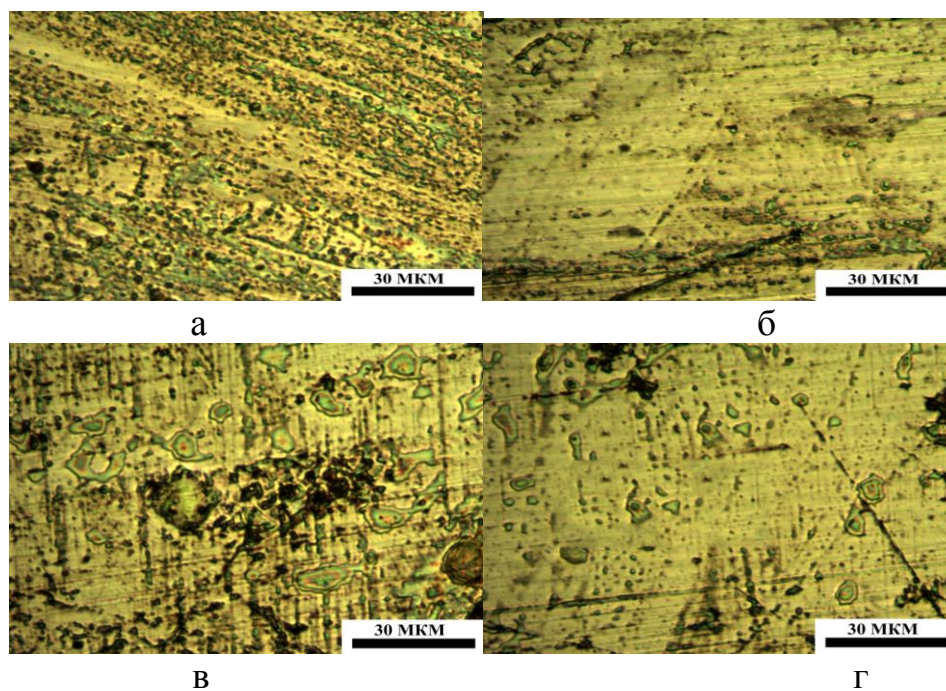


Рис. 5.5 – Мікрофотографії поверхонь тертя сталей при використанні сильнолужного середовища рН11 без абразиву (х 600): а – сталь 40Х; б – чавун ЧХ22Н2; в – сталь 95Х18; г – чавун ЧХ32

Наявність абразиву призводить до збільшення шорсткості та у зв'язку з наявністю дефектів підвищується гетерогенність поверхні, збільшується схильність до точкової та загальної корозії. При цьому мікротвердість сталей та чавунів стає ще меншою, ніж без абразиву – в 1,17–1,33 рази.

Таблиця 5.1 – Мікротвердість поверхневого шару на робочих поверхнях тертя модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M

Матеріал	Абразивність, %	Рівень активної кислотності, pH		
		5	8	11
		Мікротвердість, МПа		
Чавун ЧХ22Н2	0	7103	12543	6412
	10	6924	9676	5466
Сталь 40Х	0	8445	10280	6710
	10	6729	8056	5301
Чавун ЧХ32	0	12651	14805	8639
	10	10498	12000	6510
Сталь 95Х18	0	10349	11105	9549
	10	9673	10799	8066

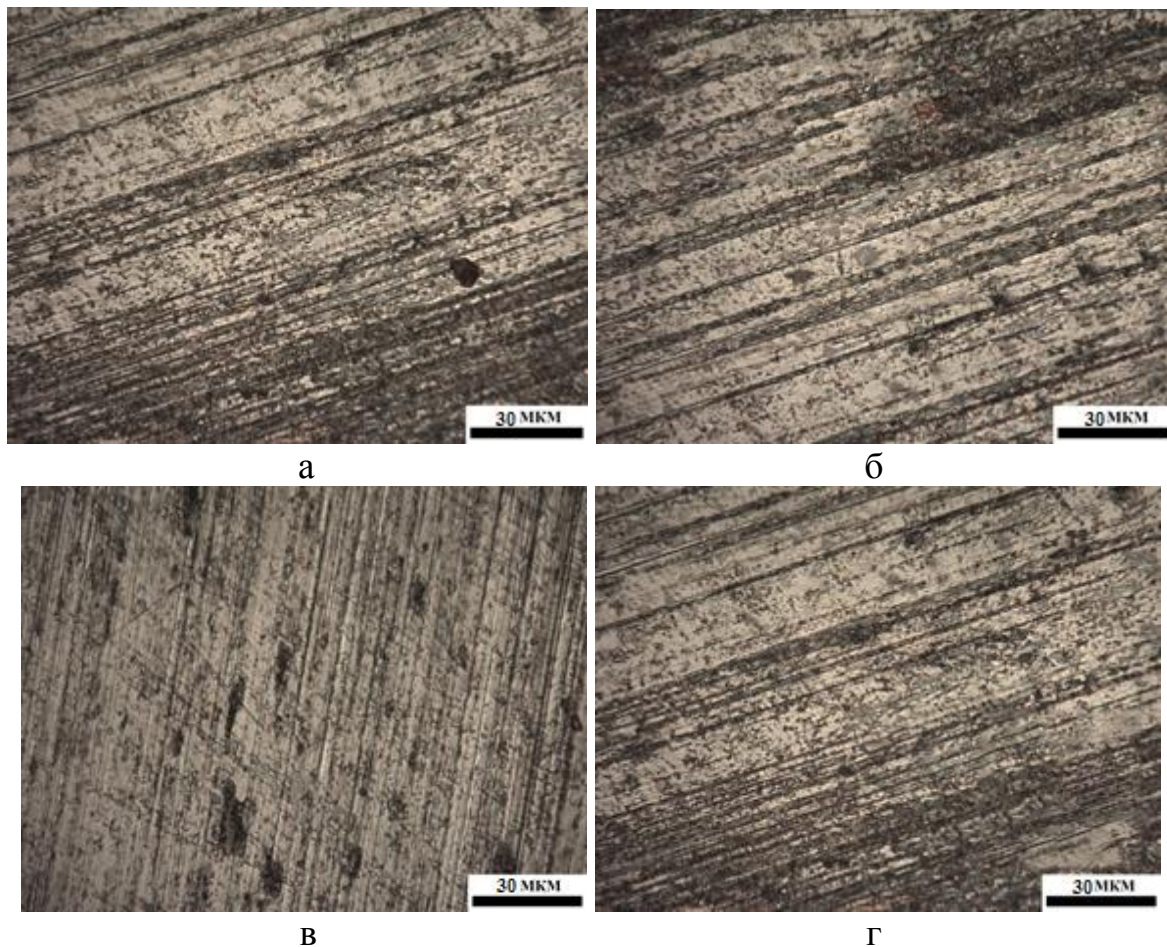


Рис. 5.6 – Мікрофотографії поверхонь тертя чавунів при використанні сильнолужного середовища pH11 та 10 % абразиву (x 600): а – сталь 40Х; б – сталь 95Х18; в – чавун ЧХ22Н2; г – чавун ЧХ32

## 5.2 Дослідження хімічного складу корозійних плівок на поверхнях тертя трібосистем

Для того, щоб підтвердити характер протікання корозійних процесів на поверхнях тертя при використанні різних середовищ, було досліджено хімічний склад продуктів корозії та корозійних плівок, які утворилися на поверхнях модельних трібосистем. Хімічний склад матеріалів, з яких були виготовлені моделі трібосистем, представлено у табл. 5.2–5.3.

Таблиця 5.2 – Хімічний склад сталевих трібоелементів [129–130]

Марка сталі	Масова доля, %								
	C	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu	Si
95X18	0,9–1	до 0,8	0	до 0,025	до 0,03	17–19	до 0,2	до 0,3	до 0,6
40X	0,36–0,44	0	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8–1,1	0	до 0,3	0,17–0,37

Таблиця 5.3 – Хімічний склад чавунних трібоелементів [122]

Марка чавуна	Масова доля, %									
	C	Si	Mn	F	S	Cr	V	Mo	Ti	Ni
			не більш							
ЧХ22Н2	2,4–3,6	0,2–1,0	1,5–2,5	0,10	0,08	19,0–25,0	0,15–0,35	0	0,15–0,35	1,5–2
ЧХ32	1,6–3,2	1,5–2,5	1,0	0,10	0,08	30,0–34,0	0	0	0,1–0,3	

До випробувань на поверхні матеріалів моделей трібосистем знаходився шар окислів, який утворився при взаємодії металу з киснем повітря. Цей тонкий шар міцно зв'язаний з поверхнею трібоелементу та повторює його топографію.

При цьому окисна плівка утворюються з оксидів металів, які входять до сплаву, а саме: окису заліза  $FeO$ , окису заліза  $Fe_3O_2$ , окису заліза  $Fe_2O_3$ , окису хрому  $Cr_2O_3$  (при вмісті більш 12 %), окису міді  $CuO$ . Хімічний склад поверхонь тертя при рН5 представлено в таблицях 5.4–5.7 і в додатку Б на рис. Б.1–Б.21.

При слабкокислому середовищі рН5 на поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 збільшується атомний вміст кисню – у 6,87 разів, кремнію – у 7,87 разів, а зменшується заліза – у 6,65 рази, нікелю – у 21,4 рази, хрому – у 2,32 рази, тобто відбувається складний процес корозійного зношування з перерозподілом елементів по глибині від поверхні (таблиця 5.4).

Такий процес, але з меншою інтенсивністю відбувається і на поверхні чавуну ЧХ32, зменшується атомний вміст заліза – у 3,7 рази, хрому – у 1,43 рази та збільшується кисню – у 2,82 рази, кремнію – у 4,4 рази згідно таблиці 5.5.

Таблиця 5.4 – Хімічний склад поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент											
		Вид ан.	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Na	Cl	K	Ca
Б.1	1	Ваг., %	2,89	0,09	1,54	1,96	1,54	72,31	2,14	-	-	-	-
		Атом., %	9,17	0,09	2,77	1,91	2,77	65,62	1,85	-	-	-	-
Б.2	2	Ваг., %	31,62	0,34	17,10	3,33	0,29	44,01	0,35	1,99	0,27	0,72	-
		Атом., %	55,31	0,35	17,04	1,79	0,15	22,05	0,16	2,42	0,21	0,52	-
Б.3	3	Ваг., %	30,57	0,31	16,54	3,12	0,35	47,07	0,29	1,38	-	0,37	-
		Атом., %	54,67	0,33	16,85	1,72	0,18	24,12	0,14	1,72	-	0,27	-
Б.4	1	Ваг., %	30,11	0,31	14,90	3,33	0,27	48,55	0,27	1,66	-	0,48	0,12
		Атом., %	54,48	0,33	15,36	1,86	0,14	25,17	0,1	2,09	-	0,36	0,09
Б.5	2	Ваг., %	25,16	0,32	14,97	3,43	0,34	54,39	0,27	0,96	-	0,10	0,06
		Атом., %	48,94	0,36	16,58	2,05	0,19	30,30	0,14	1,30	-	0,08	0,05
Б.6	1	Ваг., %	42,27	0,27	25,66	1,67	0,18	27,17	-	1,79	0,22	0,70	0,08
		Атом., %	63,04	0,23	21,79	0,77	0,18	11,61	-	1,86	0,15	0,43	0,05
Б.7	1	Ваг., %	22,34	0,33	17,39	3,06	0,27	53,66	0,30	1,66	0,09	0,72	0,17
		Атом., %	44,25	0,39	19,63	1,87	0,15	30,45	0,16	2,29	0,08	0,59	0,13
Б.8	1	Ваг., %	36,40	0,83	20,10	3,54	0,32	36,16	0,48	3,48	0,11	0,46	0,11
		Атом., %	58,57	0,79	18,42	1,75	0,15	15,75	0,21	3,90	0,08	0,30	0,07

Таблиця 5.5 – Хімічний склад поверхні тертя підбраного чавуну ЧХ32 при рН5 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент										
		Вид аналізу	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Na	Cl	K	Ca
Б.9	1	Ваг., %	7,93	-	2,52	20,69	0,25	68,35	0,26	-	-	-
		Атом., %	22,29	-	4,03	17,90	0,20	55,06	0,52	-	-	-
Б.10	2	Ваг., %	31,88	0,30	17,16	11,50	0,32	38,31	0,39	-	0,07	0,07
		Атом., %	56,16	0,31	17,22	6,23	0,16	19,33	0,48	-	0,05	0,05
Б.11	3	Ваг., %	11,01	0,09	4,98	32,46	0,42	50,65	0,39	-	-	-
		Атом., %	28,38	0,13	7,31	25,75	0,32	37,41	0,71	-	-	-
Б.12	4	Ваг., %	37,28	0,43	19,03	10,16	0,19	32,07	0,32	0,45	-	0,07
		Атом., %	60,92	0,42	17,71	0,33	0,09	15,01	0,36	0,33	-	0,05
Б.13	5	Ваг., %	39,15	0,43	17,75	9,83	0,14	32,26	0,33	0,11	-	-
		Атом., %	63,04	0,42	16,28	4,87	0,06	14,88	0,37	0,08	-	-

Таблиця 5.6 – Хімічний склад поверхні тертя базової сталі 40X при рН5 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент											
		Вид аналізу	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Mg	Na	Cl	Ti	Ca
Б.14	1	Ваг., %	3,93	-	0,64	0,94	0,51	93,98	-	-	-	-	-
		Атом., %	12,41	-	1,16	0,91	0,47	85,06	-	-	-	-	-
Б.15	2	Ваг., %	49,93	8,30	15,94	0,46	0,09	10,62	14,67	-	-	-	-
		Атом., %	65,02	6,41	11,82	0,19	0,03	3,96	12,57	-	-	-	-
Б.16	3	Ваг., %	23,36	2,10	16,19	0,93	0,32	56,41	-	-	0,09	0,46	0,15
		Атом., %	46,15	2,46	18,22	0,56	0,18	31,92	-	-	0,08	0,30	0,12
Б.17	1	Ваг., %	33,65	4,15	27,46	0,60	-	31,75	-	0,77	0,19	0,19	0,41
		Атом., %	54,4	3,95	25,11	0,29	-	14,60	-	0,86	0,14	0,10	0,26
Б.18	2	Ваг., %	40,85	2,92	30,44	0,52	0,14	22,36	-	0,26	-	2,23	0,15
		Атом., %	60,46	2,56	25,66	0,24	0,06	9,48	-	0,27	-	1,10	0,09

Таблиця 5.7 – Хімічний склад поверхні тертя підібраної сталі 95X18 при рН5 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент											
		Вид ан.	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	K	Na	Cl	V	Ca
Б.19	1	Ваг., %	26,52	0,49	14,22	14,03	0,21	43,44	0,18	0,72	0,07	-	0,11
		Атом., %	50,62	0,56	15,46	8,24	0,12	23,76	0,14	0,95	0,06	-	0,08
Б.20	2	Ваг., %	2,70	-	0,55	37,87	0,49	58,26	-	-	-	0,12	-
		Атом., %	8,56	-	1,00	36,94	0,46	52,92	-	-	-	0,12	-
Б.21	3	Ваг., %	4,13	-	1,19	14,56	0,44	79,68	-	-	-	-	-
		Атом., %	12,81	-	2,11	13,89	0,39	70,79	-	-	-	-	-

Виходячи з таблиці 5.6, на поверхні базової сталі 40X відбуваються ідентичні процеси, зменшується атомний вміст хрому – у 3,17 рази, заліза – у 5,83 рази та збільшується кисню – у 4,87 рази, кремнію – у 23,67 рази. На поверхні сталі 95X18 відбувається менш інтенсивне зменшення атомного вмісту хрому – у 1,68 рази, заліза – у 2,98 рази та збільшення кисню – у 3,95 рази, кремнію – у 7,33 рази відповідно до таблиці 5.7.

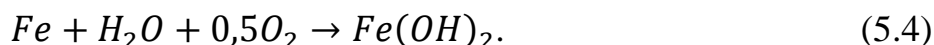
Окисли мають відмінні властивості від металічної основи. За нормальної температури окиснення вони мають високу твердість, опір стисненню, але є крихкими, мають менший коефіцієнт лінійного розширення, ніж сам метал. Окисні плівки здатні пасивувати та захищати поверхні елементів трібосистем від корозійного руйнування [164].

При контакті елементів трібосистеми у слабкокислому середовищі при рН5 без абразиву та з абразивом в результаті складного комплексу хімічних та механічних впливів захисна плівка руйнується, що обумовлює процес зношування. Вода, потрапляючи на поверхню трібоелементу, активно адсорбується поверхневими шарами сплаву. У водному розчині містяться іони  $H^+$  та  $OH^-$ , як продукти часткового розпаду води, а також певна кількість кисню.

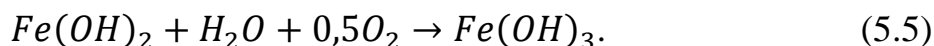
Корозійний процес можливо представити за допомогою анодної та катодної реакцій з водневою та кисневою деполяризацією відповідно:



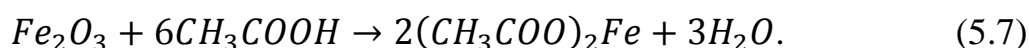
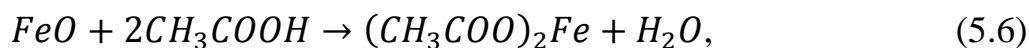
Остаточна реакція має вид:



Гідратований оксид заліза утворює на поверхні трибоелементу дифузійно-бар'єрний підшар, крізь який дифундує кисень. На зовнішній поверхні оксидної плівки, доступної розчинному кисню, гідроксид заліза (II) дифундує в гідроксид заліза (III):



Плівки іржі, які складаються з шарів гідратованих оксидів заліза, легко видаляються під час тертя трибоелементів. Цей процес посилюється корозійною дією оцтової кислоти, яка активно взаємодіє з оксидною плівкою на поверхні трибоелементу, розчиняючи її. Реакція, яка при цьому протікає, оцтової кислоти з вюститом та магнетитом, має наступний вигляд:



Крім того, ці реакції швидше протікають в кислому середовищі, ніж в лужному та нейтральному. Ріст швидкості корозійних процесів металу за мірою зменшення рН обумовлено не тільки збільшенням швидкості виділення водню, але й легким доступом кисню до поверхні трибоелементів внаслідок розчинення поверхневого оксиду та, відповідно, підвищеною кисневою деполяризацією [165].

При контакті елементів трибосистеми у слаболужному середовищі при рН8 без абразиву та з абразивом, відбуваються практично такі самі процеси, як у слабокислому середовищі при рН5, окрім реакції оцтової кислоти з оксидами заліза. Корозійний процес протікає за допомогою анодної та катодної реакцій з водневою та кисневою деполяризацією. На зовнішній поверхні оксидної плівки, доступної розчинному кисню, гідроксид заліза (II) дифундує в гідроксид заліза (III), який захищає поверхню трибоелементу від корозії. Хром та титан не кородують при контакті з не концентрованим розчином гідроксиду натрію, а мідь та нікель утворюють мікроязви корозії [166].



Хімічний мікроаналіз поверхонь тертя сталей та чавунів при рН8 представлено в таблицях 5.8–5.11 і в додатку Б на рис. Б.22–Б.32. Виходячи з таблиці 5.8, на поверхні базової сталі 40Х відбуваються ідентичні процеси, але з меншою інтенсивністю ніж при рН5 та рН11, зменшується атомний вміст хрому – у 1,89 рази, заліза – у 1,36 разів та збільшується кисню – у 2,33 рази, кремнію – у 1,38 рази. На поверхні підібраної сталі 95Х18 відбувається менш інтенсивне зменшення атомного вмісту хрому – у 2,04 рази, заліза – у 1,88 рази та збільшення кисню – на 8,71 %, кремнію – у 9,76 рази відповідно до таблиці 5.9.

Таблиця 5.8 – Хімічний склад поверхні тертя базової сталі 40Х при рН8 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент										
		Вид ан.	О	Al	Si	Cr	Mn	Fe	К	Na	Cl	Ca
Б.22	1	Ваг., %	3,69	-	0,40	0,83	0,52	93,80	-	0,86	-	-
		Атом., %	11,62	-	0,72	0,80	0,48	84,50	-	1,89	-	-
Б.23	2	Ваг., %	12,36	-	0,11	0,54	0,61	86,00	-	0,26	0,12	-
		Атом., %	32,84	-	0,16	0,44	0,47	65,47	-	0,47	0,15	-
Б.24	3	Ваг., %	8,60	0,33	9,92	0,75	0,52	68,87	1,34	7,75	-	0,97
		Атом., %	20,79	0,47	13,66	0,55	0,37	47,70	1,33	13,04	-	0,93

Таблиця 5.9 – Хімічний склад поверхні тертя сталі 95Х18 при рН8 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент										
		Вид ан.	О	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cl	Ca		
Б.25	1	Ваг., %	27,88	-	7,56	7,53	-	44,70	12,08	-	-	
		Атом., %	52,77	-	8,15	4,39	-	24,24	10,32	-	-	
Б.26	2	Ваг., %	26,82	0,30	10,74	9,34	-	42,27	10,53	-	-	
		Атом., %	50,74	0,34	11,58	5,44	-	22,91	8,99	-	-	
Б.27	3	Ваг., %	3,20	-	1,10	15,40	0,39	79,62	-	-	-	
		Атом., %	10,14	-	1,98	15,01	0,36	72,26	-	-	-	

З таблиці 5.10 видно, що на поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 збільшується атомний вміст кисню – у 3,04 рази, кремнію – у 7,75 рази, а зменшується заліза – у 45,25 рази, хрому – у 28,36 рази, тобто повільно відбувається процес абразивно-корозійного зношування.

Такий процес, але з меншою інтенсивністю відбувається і на поверхні чавуну ЧХ32, зменшується атомний вміст хрому – у 1,25 рази, заліза – у 3,09 рази та відбувається збільшення кисню – на 34,29 %, кремнію – у 50,67 разів згідно таблиці 5.11.

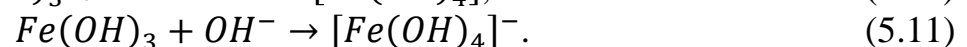
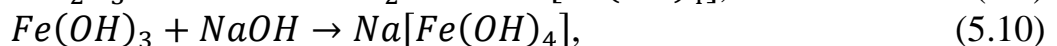
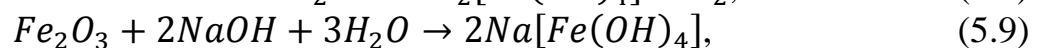
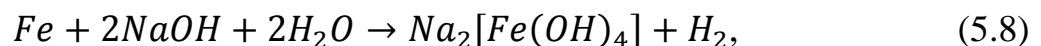
Таблиця 5.10 – Хімічний склад поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН8 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент											
		Вид ан.	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	K	Ni	Cl	Na	Ca
Б.28	2	Ваг., %	17,88	6,51	5,65	10,21	0,87	56,11	0,12	1,51	0,76	6,51	0,10
		Ат., %	38,77	9,82	6,98	6,81	0,55	34,86	0,11	0,89	0,74	9,82	0,08
Б.29	1	Ваг., %	54,34	-	43,83	0,36	-	1,24	-	-	-	0,23	-
		Ат., %	67,98	-	31,24	0,14	-	0,44	-	-	-	0,20	-

Таблиця 5.11 – Хімічний склад поверхні тертя чавуну ЧХ32 при рН8 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент											
		Вид ан.	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	K	Ni	Cl	Na	Ca
Б.30	1	Ваг., %	-	-	0,42	8,05	-	90,81	-	0,72	-	-	-
		Ат., %	-	-	0,82	8,56	-	89,93	-	0,68	-	-	-
Б.31	2	Ваг., %	34,29	0,37	21,28	10,57	0,22	31,04	-	-	-	1,21	0,10
		Ат., %	57,02	0,37	20,16	5,41	0,11	14,79	-	-	-	1,40	0,07
Б.32	3	Ваг., %	25,87	0,78	20,38	10,07	0,29	29,39	0,18	-	0,31	3,08	0,23
		Ат., %	43,25	0,77	19,41	5,18	0,14	14,08	0,12	-	0,24	3,58	0,16

При контакті елементів трібосистеми у сильнолужному середовищі при рН11 без абразиву та з абразивом відбуваються практично такі самі процеси, як у слаболужному середовищі, окрім того, що відбувається розчинення оксидних плівок гідроксиду заліза з утворенням солі тетрагідроксоферрата (III) натрію та тетрагідроксоферрата (II) натрію:



Таблиця 5.12 – Хімічний склад поверхні тертя базової сталі 40Х при рН11 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент										
		Вид ан.	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	K	Na	Cl	Ni
Б.36	1	Ваг., %	-	-	1,29	0,83	0,25	95,27	-	1,04	0,60	0,71
		Атом., %	-	-	2,48	0,87	0,25	92,37	-	2,46	0,92	0,65
Б.37	2	Ваг., %	36,14	0,21	0,50	0,32	0,36	57,90	0,16	3,58	0,76	-
		Атом., %	64,23	0,22	0,51	0,17	0,18	29,52	0,11	4,43	0,61	-
Б.38	3	Ваг., %	33,27	-	0,92	0,52	0,43	61,05	0,20	2,29	1,31	-
		Атом., %	61,80			0,30	0,23	32,48	0,16	2,97	1,10	-

Таблиця 5.13 –Хімічний склад поверхні тертя підібраної сталі 95X18 при рН11 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент											
		Вид ан.	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	K	Na	Cl	Ni	Ca
Б.33	1	Ваг., %	7,23	-	2,01	18,15	0,42	71,12	-	0,62	0,18	-	-
		Атом., %	20,64	-	3,27	15,96	0,35	58,13	-	1,24	0,23	-	-
Б.34	2	Ваг., %	31,88	-	0,12	2,00	-	62,52	-	2,39	0,85	0,24	-
		Атом., %	60,62	-	0,13	1,17	-	34,06	-	3,17	0,73	0,13	-
Б.35	3	Ваг., %	35,57	-	0,12	1,96	-	58,70	-	-	3,65	-	-
		Атом., %	65,03	-	0,12	1,11	-	30,74	-	-	3,01	-	-

З титаном відбуваються аналогічні процеси з утворенням титанатів, солей титанової кислоти, амфотерного гідроксиду титану. Розчин гідроксиду натрію сприяє появі корозійного розтріскування у зв'язку з наявністю внутрішніх напружень [167, 168].

Таблиця 5.14 – Хімічний склад поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН11 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент											
		Вид ан.	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	K	Ni	Cl	Na	Ca
Б.39	1	Ваг., %	5,14	-	0,55	33,95	1,36	57,83	-	1,16	-	-	-
		Ат., %	15,49	-	0,95	31,48	1,19	49,93	-	0,96	-	-	-
Б.40	2	Ваг., %	12,5	0,10	2,98	5,56	0,69	73,98	0,15	0,26	0,96	3,17	-
		Ат., %	30,54	0,15	4,26	4,30	0,51	53,28	0,15	0,18	1,09	5,54	-

Хімічний мікроаналіз поверхонь тертя сталей та чавунів представлено в таблицях 5.12–5.15 і в додатку Б на рис. Б.33–Б.43. Виходячи з таблиці 5.12, на поверхні базової сталі 40Х відбуваються ідентичні процеси, зменшується атомний вміст хрому – у 4,86 рази, заліза – у 3,13 рази та збільшується кисню – у 64,23 рази, кремнію – у 4,86 рази.

На поверхні підібраної сталі 95X18 відбувається менш інтенсивне зменшення атомного вмісту хрому – у 14,38 рази, заліза – у 1,89 рази та збільшення кисню – у 3,15 рази, кремнію – у 27,25 рази відповідно до таблиці 5.13.

З таблиці 5.14 видно, що на поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 збільшується атомний вміст кисню – у 1,97 рази, кремнію – у 4,48 рази, а зменшується заліза – в 1,07 рази, нікелю – у 5,33 рази, хрому – у 7,32 рази, тобто відбувається складний процес абразивно-корозійного зношування.

Такий процес, але з меншою інтенсивністю відбувається і на поверхні чавуну ЧХ32, зменшується атомний вміст заліза – у 8,78 рази, хрому – у 9,28 рази та збільшується кисню – у 3,42 рази, кремнію – у 5,54 рази згідно таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 – Хімічний склад поверхні тертя чавуну ЧХ32 при рН11 та абразивності 10 %

№ рис.	№ сп.	Елемент											
		Вид ан.	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	K	Ni	Cl	Na	Ca
Б.41	1	Ваг., %	7,03	-	2,89	22,45	0,46	66,47	-	0,33	-	0,36	-
		Ат., %	20,04	-	4,69	19,68	0,39	54,25	-	0,25	-	0,70	-
Б.42	2	Ваг., %	49,96	0,42	24,51	5,02	-	15,71	0,23	-	1,20	2,82	0,12
		Ат., %	68,57	0,34	19,16	2,12	-	6,18	0,13	-	0,75	2,69	0,07
Б.43	3	Ваг., %	40,02	0,87	30,95	5,48	-	18,07	0,65	-	0,59	2,93	0,44
		Ат., %	59,05	0,76	26,01	2,49	-	7,54	0,39	-	0,39	3,01	0,26

Використавши спосіб визначення товщини захисних плівок, що формуються при терті, розроблений авторами роботи [169] за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу, було визначено середню товщину захисної плівки, яка формується при терті під впливом середовища, в якому працюють деталі екструдерів для виробництва паливних брикетів. Результати розрахунку товщини захисних плівок залежно від рівня активної кислотності на поверхні трібоелементу представлено на рис. 5.7а.

З результатів розрахунку можливо зробити висновок, що найбільшу товщину захисної плівки має підібрана сталь 95X18 та чавун ЧХ32, яка найбільше формується при рівні активної кислотності рН8 у зв'язку з введенням в середовище, в якому працює трібосистема присадки та містить кисень.

За допомогою способу, який розроблений авторами роботи [170], було визначено середню глибину подряпин, які формуються під час абразивного зношування. Глибину подряпин було розраховано на основі вмісту заліза за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу та долі присадки, яка містить кисень та накопичується у подряпинах. Залежності зміни глибини подряпин від рівня активної кислотності при вмісті абразиву 10 % в масі наведено на рис. 5.7б.

Чим більше глибина подряпин, тим більше присадки вони накопичують в процесі тертя і зношування, а потім вводяться до контактуючих поверхонь. Така присадка містить кисень та підвищує зносостійкість з формуванням захисних, пасивних плівок.

Оптимальну глибину подряпин має підібраний чавун ЧХ32 та сталь 95X18, які найбільше формується при рівні активної кислотності рН8 у зв'язку з введенням у середовище, в якому працює трібосистема присадки та містить кисень.

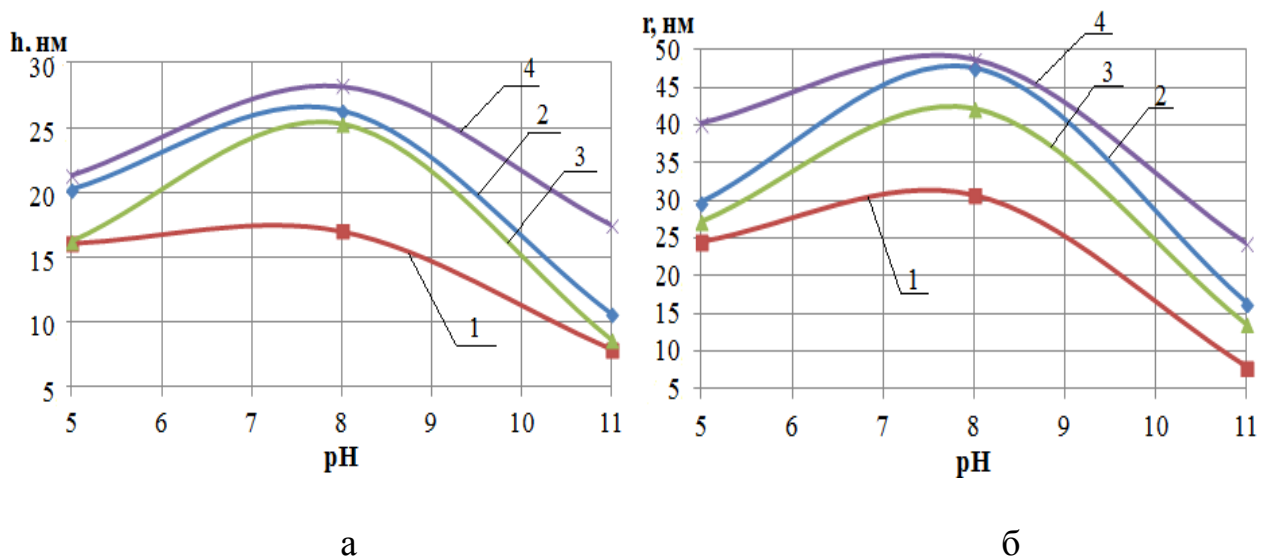


Рис. 5.7 – Залежності товщини захисних плівок  $h$  та глибини подряпин  $r$  поверхень тертя зразків модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M від рівня активної кислотності з вмістом абразиву 10 % в масі: а – від товщини захисних плівок  $h$ ; б – глибини подряпин  $r$ ; 1 – сталь 40 X; 2 – сталь 95X18; 3 – чавун ЧХ22Н2; 4 – чавун ЧХ32

### 5.3 Дослідження шорсткості робочих поверхонь трібосистем

Визначення шорсткості робочих поверхонь проводили за допомогою портативного вимірювача TR 200 (UIT).

Шорсткість робочих поверхонь тертя модельних трібосистем визначалась при використанні слаболужного робочого середовища в порівнянні з слабокислим та сильнолужним, з абразивом та без абразиву.

Під час корозії на робочих поверхнях утворюються рихла структура. Це призводить до зміни шорсткості робочої поверхні. Це пов'язано з тим, що поверхні тертя мають рихлу структуру та твердість вищу, ніж твердість самих металів, а продукти корозії, частинки плівок, які відокремлюються з поверхонь тертя, призводять до абразивного зношування, а за наявності абразивності в сировині, абразивні частинки разом з корозійними частинками ріжуть та дряпають поверхню тертя. Це призводить до збільшення шорсткості робочої поверхні та зменшення фактичної плями контакту.

Отримані залежності шорсткості робочих поверхонь зразків модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M від рівня активної кислотності, які наведені на рис. 5.8, дозволяють зробити висновок, що при використанні слаболужного середовища без абразиву спостерігається суттєве зменшення шорсткості поверхонь порівняно з шорсткістю робочих поверхонь при використанні слабокислого та сильнолужного робочого середовища з абразивом. Шорсткість робочих поверхонь тертя при використанні сировини без абразиву має менше значення, ніж з абразивом 10 % в масі:

- на сталевому зразку 40X – на 13,44–19,76 %;
- на чавунному зразку ЧХ22Н2 – на 4,74–16,49 %;

- на сталевому зразку 95X18 – на 10,27–38,27 %;
- на чавунному зразку ЧХ32 – на 6,96–19,75 %.
- 

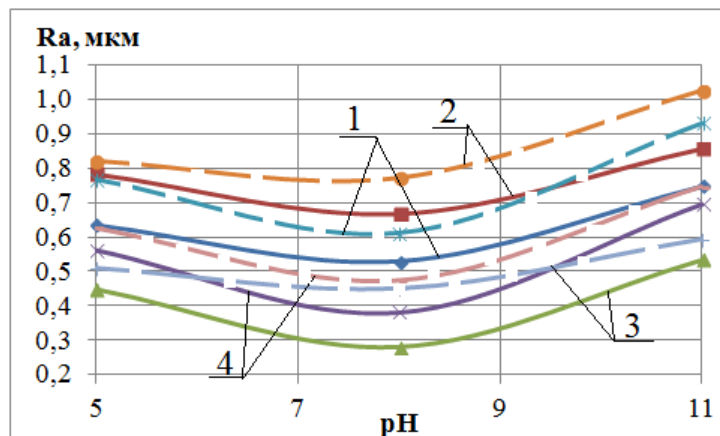


Рис. 5.8 – Залежності шорсткості робочих поверхонь тертя зразків модельних трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M від рівня активної кислотності:

\_\_\_\_\_ без абразиву, - - - - - з абразивом 10 % в масі;

1 – сталь 40 X; 2 – чавун ЧХ22Н2; 3 – сталь 95X18; 4 – чавун ЧХ32

При використанні сировини з слаболужним середовищем pH8, шорсткість робочих поверхонь тертя менше, ніж шорсткість поверхонь – з слабокислим pH5 та сильнолужним середовищем pH11:

- на сталевому зразку 40X – на 16,72–20,47 % та на 29,31–34,48 %;
- на чавунному зразку ЧХ22Н2 – на 5,96–14,68 % та на 21,96–24,58 %;
- на сталевому зразку 95X18 – на 11,54–37,72 % та на 23,90–47,65 %;
- на чавунному зразку ЧХ32 – на 24,08–32,14 % та на 36,28–45,03 % відповідно.

Найменше значення шорсткості робочої поверхні тертя має підібрана сталь 95X18 та чавун ЧХ32, ніж базова сталь 40X та чавун ЧХ22Н2.

#### 5.4 Розрахунок очікуваного економічного ефекту при використанні сировини з слаболужним середовищем, близьким до нейтрального

Під час розрахунку очікуваного економічного ефекту при використанні сировини з слаболужним середовищем, близьким до нейтрального, та підібраних матеріалів сталь 95X18 та чавун ЧХ32, було використано методику, запропоновану автором роботи [171]. Головним фактором, який впливає на економічну складову, є зміна ресурсу деталей (трібосистем екструдера EB-350 та EB-350M).

Основною трібосистемою екструдера EB-350 є «хвостовик – філь’єра № 4» та «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3» і трібосистема екструдера EB-350M «шнек конічний – філь’єра № 1, 2 та 3», вони відносяться до групи деталей, які відновлюють шляхом наплавлення та замінюють новими при капітальному ремонті.

Таблиця 5.17 – Вхідні дані для розрахунку очікуваного економічного ефекту від зміни ресурсу трібосистем екструдера EB-350

Робочі середовища та матеріали	Показники				
	С <sub>д</sub> , грн.	Т <sub>д</sub> , год.	Т <sub>р</sub> , годин	Т, років	Ц <sub>а</sub> , грн.
Солома (базове) та сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	8113	23,84	2000	7	267300
Деревинні залишки (базове) та сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	8113	24,04	2000	7	267300
Лузга (базове) та сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	8113	27,06	2000	7	267300
Солома (підібране) сталь 95X18 та чавун ЧХ32	15513	66,75	2000	7	270700
Деревинні залишки (підібране) сталь 95X18 та чавун ЧХ32	26513	109,58	2000	7	270700
Лузга (підібране) сталь 95X18 та чавун ЧХ32	41513	273,94	2000	7	270700

Таблиця 5.18 – Вхідні дані для розрахунку очікуваного економічного ефекту від зміни ресурсу трібосистем екструдера EB-350М

Робочі середовища та матеріали	Показники				
	С <sub>д</sub> , грн.	Т <sub>д</sub> , год.	Т <sub>р</sub> , годин	Т, років	Ц <sub>а</sub> , грн.
Солома (базове) та сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	5046	53,5	2000	8	298200
Деревинні залишки (базове) та сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	5046	53,96	2000	8	298200
Лузга (базове) та сталь 40X та чавун ЧХ22Н2	5046	30,7	2000	8	298200
Солома (підібране) сталь 95X18 та чавун ЧХ32	7606	147,56	2000	8	300760
Деревинні залишки (підібране) сталь 95X18 та чавун ЧХ32	7606	245,93	2000	8	300760
Лузга (підібране) сталь 95X18 та чавун ЧХ32	12606	614,81	2000	8	300760

В четвертому розділі даної монографії було розраховано ресурс трібосистем екструдера EB-350 та EB-350М при використанні різних робочих середовищ та матеріалів, з яких вони виготовлені (рис. 4.9–4.12).

Очікуваний річний економічний ефект від зміни ресурсу трібосистем екструдера EB-350 та EB-350М визначали за допомогою виразу [171]:

$$E_{p.d.} = \Pi_{p.d.b.} - \Pi_{p.d.n.} \quad (5.12)$$

де  $\Pi_{p.д.б.}$  та  $\Pi_{p.д.н.}$  – середні за строк служби річні приведені витрати по базовій сировині та матеріалах, з яких виготовлені робочі деталі та сировина з додаванням луги, грн.

Середні за строк служби обладнання річні приведені витрати ( $\Pi_{p.д.}$ ) розраховували за формулою:

$$\Pi_{p.д.} = \frac{P_{\partial.}}{T} + C_a \left( E_n + \frac{1}{T} \right), \quad (5.13)$$

де  $P_{\partial.}$  – витрати за строк служби обладнання на усунення відмов, які пов'язані зі зміною деталі та її наплавленням, грн.;

$T$  – строк служби обладнання, років;

$C_a$  – балансова ціна агрегату, грн.;

$E_n$  – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень [171].

Значення витрат за строк служби обладнання на усунення відмов, які пов'язані зі зміною деталі та її наплавленням, розраховували за формулою:

$$P_{\partial.} = C_{\partial.} \left[ \frac{T \cdot T_p - T_{\partial.}}{K_{\partial.} \cdot T_{\partial.}} + (1 + v_{\partial.}^2) \right], \quad (5.14)$$

де  $C_{\partial.}$  – витрати на усунення наслідків відмови, грн.;

$T_p$  – середній річний наробіток, годин;

$T_{\partial.}$  – середній ресурс, годин;

$K_{\partial.}$  – коефіцієнт, який враховує відношення середнього ресурсу запасної частини до середнього ресурсу нової деталі, 0,6 [171];

$v_{\partial.}$  – коефіцієнт варіації ресурсу, 0,4 [171].

Виконавши розрахунки за наведеними формулами (5.12)–(5.14), очікуваний річний економічний ефект при використанні луги, 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 лузги насіння соняшнику – 494252,95 грн./рік на один екструдер ЕВ-350. На один екструдер ЕВ-350М при пресуванні соломи ячменю складе 140369,54 грн./рік, деревинних залишків – 206414,85 грн./рік та лузги насіння соняшнику – 477647,22 грн./рік.

Рекомендації при експлуатації екструдерів з використанням сировини з слаболужним середовищем, близьким до нейтрального, представлені в додатках.



## 5.5 Аналіз факторів небезпек та оцінка ризиків пожежовибухонебезпечного виробництва твердого біопалива з рослинної біомаси

Лінія для виробництва паливних брикетів складається з такого обладнання, як бункер-накопичувач, скребковий і стрічковий транспортер, циклон, сушарка барабанного типу, дробарка, екструдер для виробництва паливних брикетів РіпіКай, охолоджувач брикетів та торцювальний пристрій. У даному обладнанні відбуваються складні технологічні процеси, які мають цілий комплекс шкідливих та небезпечних факторів та ризиків, які негативно впливають на організм людини, навколишнє середовище та можуть призвести до надзвичайних ситуацій. Найбільш значимими ризиками є фізичні та хімічні небезпеки та ризики. Ці небезпеки, які характерні для певного технологічного обладнання, наведено у табл. 5.19.

Таблиця 5.19 – Фізичні та хімічні фактори небезпек та ризиків, які характерні для обладнання лінії для виробництва паливних брикетів з рослинної біомаси

Фактор небезпеки/ назва обладнання	Бункер накопичувач	Транспортер	Циклон	Сушарка	Дробарка	Екструдер	Охолоджувач	Торцювальний пристрій
Гострі кромки обладнання, інструменту					+			+
Підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони	+	+			+	+	+	+
Гарячі або холодні місця повітря робочої зони	+		+	+		+	+	
Підвищена температура поверхні обладнання і матеріалів				+	+	+		+
Підвищений рівень шуму на робочому місці		+	+		+	+		+
Підвищений рівень вібрації на робочому місці		+	+	+	+	+		+
Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини		+	+	+	+	+		+
Підвищений рівень статичної електрики		+	+	+	+	+		+
Підвищений рівень електромагнітних випромінювань				+	+	+		+
Підвищений рівень інфрачервоного випромінювання				+				
Токсичні речовини				+		+	+	
Подразнюючі речовини				+		+	+	

Проаналізувавши табл. 5.19, можливо зробити висновок, що найбільш небезпечним є екструдер для виробництва паливних брикетів, сушарка та торцювальний пристрій. До найбільш значних факторів можливо віднести: підвищену запиленість та загазованість робочої зони, підвищену температуру поверхні обладнання та матеріалів та гострі кромки обладнання і інструменту.

Для дослідження були обрані провідні підприємства України такі, як ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» та ФОП «Махно С.М.» [165].

Стан повітря робочої зони визначався відповідно до вимог ГОСТ 12.1.005, ГОСТ 12.1.014 і за технічною документацією на методи визначення шкідливих речовин в повітрі, затвердженої наказом МОЗ України. Рівень шуму на робочих місцях вимірювали відповідно до вимог ГОСТ 12.1.050, джерел шуму – відповідно до вимог ГОСТ 12.1.028. Оцінку результатів вимірювання шуму проводили відповідно до вимог ГОСТ 12.1.003 і санітарним нормам допустимих рівнів шуму на робочих місцях.

Вимірювання та контроль вібрації проводили відповідно до вимог ГОСТ 12.1.012 та методичних вказівок з проведення вимірів і гігієнічної оцінки виробничих вібрацій, затвердженим Міністерством охорони здоров'я України. Контроль електробезпеки проводили відповідно до вимог ГОСТ 12.1.002. Температуру зовнішньої поверхні обладнання та паливних брикетів вимірювали контактною термопарою з вимірювальним приладом відповідно до вимог ГОСТ 9736.

Випадки механічного травмування у ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» під час роботи з торцювальним пристроєм, дробаркою та ін. обладнанням мають наступний характер (%):

- травмування пальців або кисті рук внаслідок захоплення робочих органів, які обертаються – 45;
- потрапляння до очей літаючого пилю – 40;
- травмування рук або ніг при налагодженні обладнання, установки та демонтажі оброблюваної деталі, кріпленні і зняття деталей – 9;
- травмування тіла частиною брикету, яка вирвалася при різанні – 4;
- травмування пальців рук при збиранні сировини – 2;
- інші випадки травмування – 2.

Одним з суттєвих шкідливих та небезпечних виробничих факторів є органічний пил. Основним джерелом утворення пилю служать екструзійні, торцювальні та подрібнювальні процеси. Під час цих процесів у повітря виділяється високодисперсний пил (0,8–5 мкм) до складу якого, крім органічних, входять і металеві та мінеральні частинки.

Вміст пилю у повітрі може досягати найбільшої величини при подрібненні та розпилюванні без використання вентиляційної системи (32–163 мг/м<sup>3</sup>).

При переробці органічних матеріалів відбуваються механічні та фізико-хімічні зміни їх структури, в повітря робочої зони надходить складна суміш парів, газів і аерозолів. Летючі продукти, що утворюються при тепловому розкладанні (термодеструкції) ряду органічних речовин, є пожежовибухонебез-

печними, токсичними та можуть викликати зміни центральної нервової і судинної систем, кровотворних і внутрішніх органів, а також шкірно-трофічні порушення. Тривале вдихання пилу у виробничих умовах може призвести до розвитку пилових захворювань бронхо-легеневого апарату – пневмоконіозів-та, хронічного пилового бронхіту. Надзвичайно небезпечне вдихання пилу, газів, що призводить до захворювання бериліозом.

Дані за вмістом пилу в повітрі робочої зони при механічній обробці залежно від типу сировини наведено у табл. 5.20.

Таблиця 5.20 – Вміст пилу в повітрі робочої зони при механічній обробці залежно від типу сировини

Перероблювальна сировина	Вміст пилу, мг/м <sup>3</sup>
Лушпиння соняшнику	800–1000
Тирса	500–554
Солома ячменю	126–238

Спектри шуму більшості обладнання лінії для виробництва паливних брикетів з рослинної біомаси мають середній та високочастотний характер. Загальні рівні звукового тиску знаходяться в межах від 85 до 100 дБА, що наведено у табл. 5.21.

Таблиця 5.21 – Рівні звукової потужності обладнання

Тип обладнання	Середньо-геометрична частота, Гц								Рівень звуку, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Дробарка	84±4	85±4	87±5	94±1	97±0	94±1	88±4	86±4	102
Екструдер	87±3	90±3	93±3	89±5	90±3	90±3	87±3	80±3	95
Різак	78±4	90±5	84±4	85±5	85±6	94±5	80±5	80±5	90
Допустиме	95	87	82	78	75	73	71	95	80

Найбільш високі рівні були зареєстровані в робочій зоні біля дробарки, екструдеру та торцювального пристрою (різаку).

Рівень звукової потужності на робочому місці оператора не повинен перевищувати гранично-допустимий рівень 70 дБА, тобто необхідно виконувати заходи безпеки для зменшення дії цього фактору.

На робочих місцях під час роботи з транспортером, сушаркою, дробаркою, екструдером, циклоном та торцювальним пристроєм утворюється вібрація, рівень якої та вплив її на організм людини наведено у табл. 5.22.

Таблиця 5.22 – Рівень вібрації та її вплив на організм людини

Тип обладнання	Амплітуда коливань вібрації, мм	Частота вібрації, Гц	Результат впливу
Транспортер	0,016	30	Нервово збудження з депресією
Циклон	0,040	45	
Сушарка	0,045	50	
Торцювальний пристрій	0,047	50	
Дробарка	0,095	60	Зміни у центральній нервовій системі, серці та органах слуху
Екструдер	0,065	55	

Під час виробництва паливних брикетів з рослинної біомаси трапляються опіки рук та можуть трапитися надзвичайні ситуації, причиною яких є гаряча поверхня сушарки, дробарки, екструдера та торцювального пристрою. Особливо небезпечними є поверхня головки екструдера та паливні брикети після екструзії, які можуть тліти і є пожежовибухонебезпечними. Температуру робочих органів екструдера та брикетів після екструзії залежно від виду сировини наведено у табл. 5.23.

Таблиця 5.23 – Температура робочих органів екструдера та брикетів після екструзії залежно від типу сировини

Тип сировини	Температура обробки, °С
Деревинні залишки	320–350
Лушпиння соняшнику	250–290

Також трапляються опіки, якщо вологість сировини перевищує 8 %, це пов'язано з тим, що під час екструзії утворюються парові пробки, сировина вилітає з головки екструдера та травмує робітників. Технічне обслуговування екструдера та пакування брикетів заборонено, якщо їх температура перевищує 40 °С. Під час екструзії під великим тиском та високою температурою відбувається термічна деструкція, піроліз поверхні паливних брикетів.

Хімічний склад повітря та вміст димових газів, які утворюються при піролізі біомаси майже не залежить від типу сировини. Під час піролізу 1 м<sup>3</sup> сировини утворюється 85–95 м<sup>3</sup> газів, з яких метан та кисень утворює вибухонебезпечну суміш. Повітря в робочій зоні має такий склад (%) та підвищену температуру (°С) – оксид сірки 10–16; кисень 8–15; оксид азоту

9–16; метан 0–0,01; діоксид вуглецю 5–9 та температура димових газів 170–255.

Під час виробництва паливних брикетів, у зоні екструзії утворюється дим [3, 21], склад якого наведений у табл. 5.24.

Таблиця 5.24 – Склад диму при виробництві паливних брикетів в зоні екструзії

Назва речовини, яка визначається	Швидкість аспірації, л/хв.	Час відбору проб, хв.	Фактична концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Гранично допустима концентрація, мг/м <sup>3</sup>	Методика дослідження
Акролеїн	0,5	20	0,5	0,2	МУ 2719-83
Діоксид азоту	0,2	5	3,5	2	МУ 1638-77
Діоксид вуглецю	0,2	5	19,0	20	ГОІЕ АПИ 2.840.087
Пил рослин. походження	20,0	30	10,0	6	МУ 4436-87
Діоксид кремнію	20,0	30	2,0	–	МУ 2391-81

З табл. 5.24 видно, що під час виробництва паливних брикетів в зоні екструзії утворюються сполуки, рівень яких перевищує гранично-допустиму концентрацію та які негативно впливають як на організм людини, так і на навколишнє середовище.

Рівні небезпечних і шкідливих факторів у виробничих приміщеннях і на робочих місцях не повинні перевищувати гранично-допустимих значень, затверджених Міністерством охорони здоров'я України.

Розрахунок надлишкового тиску вибуху для горючого пилу проводився згідно вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 за формулою:

$$\Delta P = \frac{m \cdot H_T \cdot P_0 \cdot z}{V_{\text{вільн}} \cdot \rho_E \cdot c_p \cdot T_0} \cdot \frac{1}{k_H}, \quad (5.15)$$

де  $m$  – маса горючого пилу, кг;

$H_T$  – теплота згорання, Дж · кг<sup>-1</sup>;

$P_0$  – атмосферний тиск, кПа (допускається приймати таким, що дорівнює 101,3 кПа);

$z$  – розуміється частка участі завислого горючого пилу у вибуху за відсутності експериментальних даних про величину  $z$ , допускається приймати  $z = 0,5$ ;

$V_{\text{вільн}}$  – вільний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$\rho_E$  – густина повітря до вибуху за початкової температури  $T_0$ , кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – теплоємність повітря, Дж · кг<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup> (дозволено приймати такою, що дорівнює  $1,01 \cdot 10^3$  Дж · кг<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>);  
 $T_0$  – початкова температура повітря, К.

Використання способу [172] отримання твердого палива з рослинної сировини та присадки дозволив перевести небезпеку виробництва з категорії Б (пожежовибухонебезпечне) в категорію В (пожежонебезпечне), знизивши надлишковий тиск горючого пилу з 6 кПа до 0,25 кПа, який був розрахований за формулою (1).

Режими технологічних процесів виробництва твердого біопалива, згідно вимог ГОСТ 12.4.026 повинні забезпечувати:

- узгодженість роботи обладнання, що виключає виникнення небезпечних і шкідливих факторів;
- завантаження устаткування в межах його пропускної здатності, що забезпечує ритмічну роботу персоналу, зайнятого в технологічному процесі;
- пожежовибухобезпеку виробництва;
- можливість, за необхідності, застосування засобів захисту працюючих;
- охорону навколишнього середовища.

Процеси брикетування повинні бути організовані відповідно до нормативно-технічної документації, передбаченою ГОСТ 3.1120. Небезпечні зони цехів і ділянок, де здійснюється технологічний процес, повинні позначатися знаками безпеки відповідно до вимог ГОСТ 12.4.026. Технологічний процес повинен бути організований так, щоб виключалася необхідність дотику працюючих з сировиною та півфабрикатами, які перебувають в русі зі швидкістю більше 0,3 м/с.

У поточних чи автоматичних лініях при зупинці будь-якої одиниці обладнання слід зупиняти все попереднє обладнання, якщо лінії не оснащені накопичувачами або відсутні спеціальні буферні майданчики. Над гарячим пресом та в місцях охолодження гарячих брикетів необхідна установка укриття з місцевими відсмоктувачами.

Розміщення виробничого обладнання при організації технологічних процесів виробництва паливних брикетів повинно забезпечувати безпеку та зручність його обслуговування і можливість евакуації працюючих. Проїзди і проходи в приміщеннях, де встановлено обладнання, повинні бути позначені лініями білого кольору та знаками відповідно до вимог ГОСТ 12.4.026. Устаткування, що створює підвищений рівень шуму, слід розташовувати в окремих приміщеннях або укладати в звукоізолюючі кожухи.

Робочі місця операторів в шумних приміщеннях повинні бути в звукоізолюючих кабінах. Для обслуговування та ремонту устаткування, розташованого вище 1,3 м від рівня підлоги, до яких можливо віднести теплогенератор барабанної сушарки, транспортер та циклон повинні передбачатися огорожі відповідно до вимог ГОСТ 12.4.059.

Гарячий прес та інше обладнання, що виділяє тепло, повинно бути обладнане екранами, щоб інтенсивність теплового заручення на робочих місцях не перевищувало  $100 \text{ Вт/м}^2$  відповідно до вимог ГОСТ 12.3.042-88.

Показники мікроклімату на робочих місцях повинні відповідати санітарним нормам мікроклімату виробничих приміщень, затверджених Міністерством охорони здоров'я України. Циклони та бункери систем збору органічного пилю повинні розташовуватися поза будівлями. Канали для конвеєрів та комунікацій повинні бути розташовані нижче рівня підлоги, закриті щитами на шарнірах на рівні з підлогою. Прямки в зоні роботи підймальних столів, етажерок, пресу повинні бути огорожені поручнями висотою не менше 1,0 м та бортами висотою 0,1 м.

Сировина, яка має металеві та мінеральні включення, повинна пройти очищення у сепараторах. Температура сировини, півфабрикатів та брикетів, з якими стикаються працюючі, не повинна перевищувати  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тирсу та інші сипучі матеріали, що зберігаються на складах навалом, слід укласти в штабелі з крутизною природного укосу складованих матеріалів. Зберігання сировини на відкритих майданчиках повинно відповідати вимогам протипожежних норм проектування складів.

Пропонується замінити звичайні циклони на циклони з додатково створеним тиском, який виникає за рахунок модернізації існуючих циклонів, в конструкцію яких додаються електродвигун, вал та лопаті. Він повинен мати продуктивність не менше  $1500 \text{ м}^3/\text{хв}$ . Циклон з додатково створеним тиском зображений на рис. 5.9. Відмінність цього циклону від сучасних циклонів та пиловловлювачів полягає в наявності в циклоні ротаційного ротора.

Робочі органи ротора забезпечують підвищену ефективність відділення пилю від повітря за рахунок додаткового використання сил інерції.

Ротор, що обертається, крім функції надання додаткових сил інерції з надтонкими частинками пилю виконує другу функцію – відцентрового насоса з відбору чистого повітря з корпусу циклону. Привід ротора у вигляді електричного двигуна потужністю  $3 \text{ кВт}$  розміщений у верхній частині циклону та є єдиною цілою конструкцією.

Не всі підприємства з виготовлення паливних брикетів мають охолоджувач. Для експрес-аналізу паливних брикетів необхідно отримати зразок. Для цього пропонується використовувати жароміцні кліщі, які мають форму,



Рис. 5.9 – Верхній вид циклону з додатково створеним тиском

як профіль брикету, шестикутника або чотирикутника, а також ручку з жароміцного матеріалу. В зоні екструзії та охолодження пропонується встановити витяжку для того, щоб виводити з робочої зони повітря, яке містить дим та пил, воно повинно пройти очищення крізь встановлені тканинні фільтри, скрубери або електрофільтри.

Для попередження виникнення опіків під час технічного обслуговування екструдера, сушарки та торцювального пристрою пропонується встановлювати термодатчики, які автоматично контролювали б зміну температуру на робочих органах та в місцях обслуговування.

Спеціальний одяг, рукавиці та окуляри робітників повинні бути зробленими з термостійких матеріалів, які б захищали їх від потрапляння іскор та пилу.

## **5.6 Висновки за п'ятим розділом**

1. Проведеними дослідженнями встановлено, що при сировині з слаболужним середовищем, близьким 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 рН5 та сильнолужному середовищі рН11 на поверхнях сталей та чавунів спостерігається утворення корозійних плівок та язв.

2. Мікроаналізом поверхонь тертя різних трібосистем та розрахунками встановлено, що на поверхні тертя досліджених матеріалів формується плівка розміром 16–21 нм при рН5, 17–28 нм при рН8 і 8–17 нм при рН11 та подряпини розміром 24–40 нм при рН5 42–49 нм при рН8 і 8–25 нм при рН11.

3. Виявлено, що шорсткість робочих поверхонь тертя при використанні сировини без абразиву має менше значення ніж з абразивом 10 % в масі: на сталевому зразку 40X – на 13,44–19,76 %, на чавунному зразку ЧХ22Н2 – на 4,74–16,49 %, на сталевому зразку 95Х18 – на 10,27–38,27 % та на чавунному зразку ЧХ32 – на 6,96–19,75 %.

4. Розраховано очікуваний річний економічний ефект при використанні луги – гідроксиду натрію та трібосистеми сталі 95Х18 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 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 лузги насіння соняшнику – 477647,22 грн./рік при переробці до 1330 тонн сировини на рік.

5. Аналіз факторів небезпек та оцінка ризиків вибухонебезпечного виробництва твердого біопалива з рослинної біомаси необхідні для модернізації заходів зі зменшення дії небезпечних факторів на організм людини та навколишнє середовище, які можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

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

1. 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 визначення активної та загальної кислотності сировини та паливних брикетів, а також методика визначення 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 лузга 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 швидкість 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 – рН7,4.

4. Виконано експериментальну оцінку адекватності розроблених математичних моделей за результатами експерименту, а також ступінь впливу вхідних в математичні моделі факторів на результати моделювання. За допомогою критерія Фішера встановлено, що результати моделювання швидкості зношування адекватні результатам експерименту з ймовірністю 0,9. Розрахована похибка моделювання показала, що при моделюванні швидкості зношування похибка не перевищує 15,98 %, є задовільним показником.

5. Встановлено, що рослинна сировина для виробництва твердого палива має слабокисле середовище та активну кислотність рН5. Встановлено, що при додаванні до сировини луги – гідроксиду натрію, відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування. При додаванні до сировини луги – гід-

роксида натрію до рН7,4 відбувається зменшення сили тертя та швидкості зношування. Рейтинг трібосистем по втратам на тертя має вид: трібосистема сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10С2М та чавун ЧХ32; сталь 40X та чавун ЧХ32 і сталь 40X та чавун ЧХ28. По швидкості зношування: сталь 95X18 та чавун ЧХ32; сталь 40X10С2М 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. Отримано 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 ЕВ-350 та ЕВ-350М для виробництва паливних брикетів при використанні різних типів робочого середовища та матеріалів, з яких вони виготовлені. Фізичним моделюванням визначено, що використання слаболужного робочого середовища рН7,4 призводить до збільшення ресурсу екструдера ЕВ-350 при пресуванні соломи ячменю – в 1,41 рази, деревинних залишків – у 2,33 рази, лузги насіння соняшнику – у 13,16 рази, прілої лузги – у 10,23 рази. При зміні матеріалів на сталь 95X18 та чавун ЧХ32 відбувається збільшення ресурсу екструдера ЕВ-350 при пресуванні соломи ячменю – у 2,76 разів, деревинних залишків – у 4,56 рази, лузги насіння соняшнику – у 25,76 рази, прілої лузги – у 20,02 рази.

7. Встановлено, що при використанні сировини з слаболужним середовищем, близьким до нейтрального, на робочих поверхнях спостерігаються незначні сліди корозії. При слабокислому 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 рН5, 17–28 нм при рН8 і 8–17 нм при рН11 та подряпини розміром 24–40 нм при рН5, 42–49 нм при рН8 і 8–25 нм при рН11.

8. Розраховано очікуваний річний економічний ефект при використанні луги – 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 лузги 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 лузги насіння соняшнику – 477647,22 грн./рік, при переробці до 1330 тонн сировини на рік.

9. Аналіз факторів небезпек та оцінка ризиків вибухонебезпечного виробництва твердого біопалива з рослинної біомаси необхідні для модернізації заходів зі зменшення дії небезпечних факторів на організм людини та навколишнє середовище, які можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Износ оборудования при переработке пластмасс / [Стамбурский Е.А. Бейль А.И., Карливан В.П., Беспалов Ю.А.]. – М.: Химия, 1985. – 208 с.
2. Дворук В.І. Підвищення зносостійкості конструкційної сталі при терті ковзання в масі незакріпленого абразиву методом електроерозійної обробки / В.І. Дворук, К.В. Борак, С.С. Добранський // Проблеми трибології. – 2014. – № 4. – С. 90-95.
3. Ястреба С.П. Підвищення ефективності роботи і довговічності олійних пресів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / С.П. Ястреба. – Київ, 2012. – 19 с.
4. Гончар В.А. Підвищення зносостійкості і довговічності екструдерів для переробки фуражного зерна з домішками мінералів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : спец. 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах» / В.А. Гончар. – Хмельницький, 2014. – 20 с.
5. Деркач В.В. Підвищення зносостійкості циліндра екструдера методом термодифузійної біметалізації : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : спец. 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах» / В.В. Деркач. – Київ. – 2000. – 20 с.
6. Матвійшин П.В. Підвищення зносостійкості вузла пластикації термотермопластавтоматів при переробці наповнених полімерів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : спец. 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах» / Хмельницький. – 2012. – 21 с.
7. Васильків В.В. Види зношення спіралей гвинтових робочих органів / В.В. Васильків, Д.Л. Радик // Вісник ХНТУСГ. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 100. – С. 197 – 202.
8. Луцак Д.Л. Підвищення зносостійкості шнеків обладнання для виробництва цегли / Д.Л. Луцак Я.А., Криль, П.М. Присяжнюк // Підвищення надійності машин і обладнання: III Всеукраїнська наук.-практ. конф., 15 квітня 2009 р.: тези доповідей студентів, магістрантів та аспірантів. – Кіровоград: КНТУ, 2009. – С. 16 – 20.
9. Беркович И.И. Исследование внешнего трения торфа и фактической площади контакта применительно к процессам прессования : автореф. дис. на соискание наук. степени канд. техн. наук / И.И. Беркович. – Калинин, 1966. – 18 с.
10. Roggenbach H. Revista Plastverarbeiter / H. Roggenbach, H. Vogel // Plastverarbeiter. – Heidelberg, 1972. – Bd. 23, N 9. – S. 599-606.
11. Grigoroudis K.A. study of the wear process related to twin-screw extruders: dis. ... PhD / K. Grigoroudis. – Cranfield, 1996. – 196 p.
12. Швец А.В. Брикетирование отходов биомассы / А.В. Швец // "Сотрудничество для решения проблемы отходов": II Международная конферен-

ция, 9-10 февраля 2005 г.: тезисы докладов. – Харьков: ИНЖЭК, 2005. – С. 336-340.

13. Результаты государственной санитарно-эпидемиологической экспертизы исследований состава дыма при изготовлении брикетов [Электронный ресурс]: (Сайт) / ООО «ЧеркасыЭлеваторМаш». – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: [bricet.com.ua](http://bricet.com.ua). – Название с экрана.

14. Основи трибології: Підручник / [Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А. та ін.] / За ред. Войтов В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342 с.

15. Сырье для брикетирования топливных брикетов [Электронный ресурс]: (Сайт) / Топливные брикеты. Оборудование для производства топливных брикетов. – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://briquet.zp.ua/sirie/>. – Название с экрана.

16. Björk T. Wear of surface treated dies for aluminium extrusion — a case / T. Björk, R. Westergård, S. Hogmark // *Wear*. – Amsterdam, 2001. – V. 249, Is. 3–4. – P. 316–323.

17. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем : автореф. дис... д-ра техн. наук : спец. 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах» / В.І. Дворук. – К. : 2007. – 40 с.

18. Дворук В.І. Абразивна зносостійкість гарячедеформованих легированих сталей / В.І. Дворук, С.С. Белих // *Пробл. тертя та зношування*. – 2012. – Вип. 57. – С. 108-116.

19. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / [Алисин В.В., Алябьев А.Я., Архаров А.М. и др.] / Под ред. Крагельского И.В., Алисина В.В. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 400 с.

20. Гончар В.А. Дослідження зносостійкості азотованої сталі Х12 в корозійно-абразивному середовищі / В.А. Гончар // *Інформатика та механіка : тези доповідей VIII українсько-польської конференції молодих науковців*. – Хмельницький, 2011. – С. 45-46.

21. Прейс Г.А. Об износе деталей шнекомпрессов / Г.А. Прейс // *Пищевая технология*, 1961. – № 5. – С. 117-119.

22. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел / В.В. Белобородов. – М. : Пищевая пром-сть, – 1966. – 478 с.

23. Brevet 2586254 Republique Française, CPC C 10 L 5/44. Procédé de fabrication de briquettes de chauffage / Sylvest H. E.; demandeur et titulaire H. E. Sylvest. – № 8611802; déc. 18.08.86, pub. 20.02.87, Bul. n°8.

24. Briquettes de biomasse de presse [Ressource électronique]: (Site Web) // Anyang Gemco Energy Machinery Co., Ltd. – Mode d'accès: WWW.URL: [www.biodiesel-machine.com/fr/biomass-briquette-press.html](http://www.biodiesel-machine.com/fr/biomass-briquette-press.html). – Dernière visite: 2014. – Titre de l'écran.

25. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. — К.: Техніка, 1970.— 120 с.

26. Моисеев А.В. Износостойкость дереворежущего инструмента / А.В. Моисеев. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 112 с.

27. Камель Г.И. Анализ функций, выполняемых роторными питателями для загрузки измельченной древесины / Г.И. Камель, А.В. Ершов, А.Г. Яковлева // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 120/2011. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2011. – С. 234-238.
28. Worth R.A. Factors affecting the wear of extruder screws / R.A. Worth, R.A. Lai-Fook // *Plastics & Rubber: Processing*. – 1978. – №6. – P.68-72.
29. Силин А.В. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных экструдерах / А.В. Силин. – М., Машиностроение, 1972. – 152 с.
30. Jinadasa K. The effect of extruder screw and barrel wear on output in uPVC Manufacture dis. ... masters / K. Jinadas. – Moratuwa, 1990. – 75 p.
31. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров / Д.М. Мак-Келви ; [пер. с англ. Ю.В. Зеленева, Б. П. Пашина, Э.И. Родина]. – М. : Химия, 1965. – 444 с.
32. Screw and barrel wear costs compounders both pellet quality and output [Electronic resource]: (Website) / *Plastics Technology*. – Electron given. – 2014. – Access: <http://www.ptonline.com/products/compounder-tests-extruder-barrel-wear-over-8-years>. – To name screen.
33. Singh R. M. Study on Wearing of Screw of Biomass Briquetting Extruder / R. M. Singh // *Journal of Science and Technology*. – Nepal, 2000. – № 2. – P. 83 – 85.
34. Прочность. Устойчивость. Колебания : [справочник / под ред. Биргера И.А., Пановко. Т. 3.]. – М. : Машиностроение, 1968. – 568 с.
35. Зверлин В.Г. Исследование предельного допустимого износа рабочих органов червячных прессов / Зверлин В.Г. // *Химическое и нефтяное машиностроение*. – 1982. – № 9. – С. 20-22.
36. Кузьменко А.Г. Прикладная теория методов испытаний на износ / Теоретическая и экспериментальная трибология. Т. VI: Монография / А.Г. Кузьменко. – Хмельницкий: ХНУ, 2007. – 579 с.
37. Стамбурский Е.А. Исследование влияния состава композиционных полимерных материалов на износ рабочих органов экструзионного оборудования: дис. ... кандидата техн. наук: 05.17.06 / Е.А. Стамбурский. – Рига, 1979. – 160 с.
38. Rasche K. Werkzeugstaehle fuer die Kunststoffverarbeitung. Qualitaetsauswahl, Oberflaechenpolierbarkeit, Lieferform, Waermebehandlung, Fehlerbeispiele / K. Rasche, R. Biermann // *Plastverarbeiter*. – 1976. – Bd. 27. – № 11. – S. 595-604.
39. Edenhofer B. Ionitrieren von Staehlen und aehnlichen Werkstoffen zur Steigerung der Verschleißfestigkeit bei der Kunststoffverarbeitung / B. Edenhofer // *Industrie-Anzeiger*. – 1973. – Bd. 95. – № 79. – S. 1815-1817.
40. Keller K. Ionitrieren steggepanzelter Schnecken Tür Spritzgießmaschinen / K. Keller // *Plastverarbeiter*. – 1972. – Bd. 23. – S. 1-6.
41. Lülldorf P. Verstärkte Kunststoffe im Maschinen – und Fahrzeugbau 75 / P. Lülldorf. – Budapest: Vort. Budapest, 1975. – S. 119-131.

42. McCandless W. Verschleißfeste und korrosionsbeständige Zylinder und Schnecken für Kunststoffmaschinen. *Industrieanzeiger* / W. McCandless G. Wahrburg. -1969. – Bd. – 91. – № 25. – S. 25-29.
43. Sidan H. Nitriding Rust-Proof and Acid-Proof Steels / H. Sidan // *Techn. Rundschau*. – Bd. – 1958. – № 242. – S. 842.
44. Гильзы загрузочных воронок экструдеров [Электронный ресурс]: (Сайт) / ЗАО "Завод "Джи Ти Сэвэн" / – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://gt7.ru/catalog-polimer/67/101/>. – Название с экрана.
45. А. с. 1699771 СССР, МКИ В 28 В 3/28 В 3/22. Шнек ленточного пресса / М.Б. Лебедев, Б.И. Невольниченко, А.Я. Мищенко, В.Л. Аленко, К.Н. Логвинов (СССР). – № 4656550/33; заявл. 01.03.89; опубл. 23.12.91. Бюл. №47.
46. Материалы исполнения. Защита от износа и коррозии [Электронный ресурс]: (Сайт) / KraussMaffei Berstorff / – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://www.kraussmaffeiberstorff.com/ru/materials.html>. – Название с экрана.
47. Карманов В.В. Повышение износостойкости нагнетающего винта пресс-формирователя для переработки биологических отходов в топливные брикеты, пилеты, гранулы. [Электронный ресурс] / В.В. Карманов, В.Д. Балахонов, А.Э. Борзаков. – Режим доступа: [http://www.rusnauka.com/14\\_ENXXI\\_2013/Tecnic/3\\_136481.doc.htm](http://www.rusnauka.com/14_ENXXI_2013/Tecnic/3_136481.doc.htm).
48. Seiwert H. Werkstoffe für Extruder und Extrusions-Werkzeuge / H. Seizert // *Kunststoffe* 52. – 1962. – №9. – P. 552-553.
49. Menges. G. How to make injection molds / G. Menges, P. Mohren. – München: Häuser, 3<sup>rd</sup> Ed., 1991. – 612 с.
50. Höller R. Vergüten von Stahlwerkstoffen. In: *Kunststoff-Formenbau, Werkstoffe und Verarbeitungsverfahren* / R. Höller // VDI-Verl. – 1976. – P. 289-303.
51. Макаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчёты / В. Макаэли; пер. с англ. В.П. Володина. – СПб.: Профессия, 2007. – 472 с.
52. Dember. G. Stähle zum Herstellen von Werkzeugen für die Kunststoffverarbeitung. In: *Kunststoff-Formenbau, Werkstoffe und Verarbeitungsverfahren* / G. Dember // VDI-Verl. – 1976. – P. 215-218.
53. Barney J. Design requirements tor PVC film and sheet dies / J. Barney // *Mod. Plast.* 46. – 1969. – №12. – P. 116-122.
54. Avery D.H. Wear in plastic extrusion machinery / D.H. Avery, Csongor D. // *SPE Techn. Pap.* – 1978. – P. 446-449.
55. Malmberg W. Glühen, Härten und Vergüten des Stahls / W. Malmberg. – Berlin: Springer, 1961. – 72 p.
56. Illgner K.H. Gesichtspunkte zur Auswahl von Vergütungs – und Einsatzstählen / K. H. Illgner // *Metalloberfläche* 22. – 1968. – №11. – P. 321-330.
57. Einsatzstähle : DIN 17210. – [Gültig ab 1986-09]. – Berlin: Deutsche Institut für Normung e. V., 1986.

58. Zerkowski G. Werkzeugwerkstoff Aluminium. In: Kunststoff-Formenbau. Werkstoffe und Verarbeitungsverfahren / G. Zerkovski // VDI-Verl. – 1976. – P. 14-20.

59. Beck G. Kupfer-Beryllium. In: Kunst Stoff-Formen Bau, Werkstoffe und Verarbeitungsverfahren / G. Beck // VDI-Verl. – 1976. – P. – 25-29.

60. Чернета О.Г. Исследование структуры клапанов двигателей внутреннего сгорания подвергнутых закалке токами высокой частоты / О.Г. Чернета, А.М. Нестеренко, И.Н. Поддубный, А.Н. Коробочка, Л.Й. Ищенко // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ «ДонНТУ». – Горлівка, 2009. – № 1.(8) – С. 87-89.

61. Григорьянц А. Г. Исследования микроструктуры и механических характеристик стали 40X10C2M после лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, С. И. Алексеенко, А.Н. Сафонов // ФХОМ. – 1991. – № 3. – С. 102–107.

62. Григорьянц А.Г. Микроструктура и износостойкость стали 40X10C2M после обработки CO<sub>2</sub>-лазером / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов, С.И. Алексеенко // МиТОМ. – 1989. – № 11. – С. 2–6.

63. Ханов А.М. Исследование процесса хонингования деталей топливной аппаратуры / А.М. Ханов, К.Р. Муратов, Е.А. Гашев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – №4-2. – С.423-426.

64. Чехлях А.П. Разработка и исследование нового экономнолегированного жаростойкого сплава для колосников агломерационных машин / А.П. Чехлях, С.В. Прекрасный, В.В. Климанчук, П.Н. Кирильченко // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2008. – №18. – С.80-84.

65. Чехлях А.П. Фазово-структурная эволюция и свойства метастабильных и стабильных высокохромистых сплавов при термо- циклической обработке / А.П. Чехлях, Д.В. Клок // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2005. – №15. – С.61-67.

66. Трухин В.В. Исследование особенностей износа резцов при точении износостойких чугунов типа ЧХ20Р / В.В. Трухин, С.В. Лищинина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – №1. – С. 50-52.

67. Ткачев В.М. Материаловедение / В.М. Ткачев – К.: Вища школа, 1977. – 446 с.

68. Шнек и цилиндр экструдера [Электронный ресурс]: (Сайт) / Шанхайская компания ООО «Синьсин». – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://www.xxscREW.ru/products/94.html>. – Название с экрана.

69. Ласкутов В.Ф. Защитные покрытия на металлах / В.Ф. Ласкутов. – К.: Наукова думка, 1973. – С. 17 – 19.

70. Volz P. Verschleiss in der Kunststofftechnologie / P. Volz // Kunststoffe. – 1979. – vol. – 69. – № 11. – P. 758-771.

71. Knappe W. Wear modeling in plastics processing machines / W. Knappe, W. Mahler // Kunststoff Rundschau. – 1972. –Bd. 19. – № 2/3. – S. 45-51.

72. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / [ под. ред. А. С. Ляховича ]. – М. : Metallurgiya, 1981. – 424 с.

73. Переработка наполненных композиционных материалов / [Лурьев Е.В., Боровикова С.М., Скачков В.В., Макаров В.Л.]. – М.: НПО «Пластик», 1982. – С. 46-50.

74. Гончар В.А. Зносостійкість сталі Х12 в водному розчині муки з добавками мінералу сапоніту / В.А. Гончар // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету, 2013. – Вип. 12 (75). – С. 6-14.

75. Экструдер для производства полиэтиленовой плёнки [Электронный ресурс]: (Сайт) / Ruian MINGDE Machinery Co., Ltd – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://rabota888.ru/oborudovanie-dlya-pr-materialov-i-izd/oborudovanie-dlja-obrabotki-plastika-i-reziny/jekstrudery-pressy/jekstruder-dlja-proizvodstva-termousadochnoj-3.html>. – Название с экрана.

76. Фишер Э. Экструзия пластических масс / Э. Фишер; [пер. с англ. Г.С. Вайнштейна, В.Н. Константинова]. – М. : Химия, 1970. – 285 с.

77. Bovensmann W. Plastifizieren und Homogenisieren von Duromeren mit Schnecken-Plasti / W. Bovensmann // Kunststoffe. – 1971. – Bd. 61. – № 9. – С. 3-17.

78. Kieffer R. Wear resistant solution for plastic processing equipment / R. Kieffer // «Plast. Proc. Trends 80s – Profits Technol. Nat. Techn. Conf., Cleveland, Ohio, 1980». – Brookfield, 1980. – P. 41-44.

79. Ремонт шнеков для брикетирования отходов [Электронный ресурс]: (Сайт) / Технологии наплавки. Производство, ремонт, восстановление деталей. – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://naplavka.info/uslugi/remont-shnekov-dlya-briketirovaniya-othodov>. – Название с экрана.

80. Шнек экструдера линии "Саяг" (производство уплотнений для дверей и багажников легковых автомобилей) [Электронный ресурс]: (Сайт) / ООО НПП ТСП. – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: [npptsp.ru/article6\\_11.htm](http://npptsp.ru/article6_11.htm). – Название с экрана.

81. Шнеки, снабжённые защитой от износа [Электронный ресурс]: (Сайт) / WEBER / – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://www.extrudertechnologie.de/ru/teknologija-ehkstruzii/zashchita-ot-iznosa/>. – Название с экрана.

82. Восстановление, ремонт, изготовление шнеков и корпусов экструдеров [Электронный ресурс]: (Сайт) / ООО «Научно-техническая фирма НТВ» / – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://www.ntf-ntv.ru/extruders.php>. – Название с экрана.

83. Сом А.И. Сплав на Fe-основе для плазменно-порошковой наплавки шнеков экструдеров и термопластавтоматов [Электронный ресурс] А.И. Сом // Плазма-Мастер Лтд. – Наука / – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: [http://www.plasma-master.com.ua/rus/science/science\\_Fe-alloy .htm](http://www.plasma-master.com.ua/rus/science/science_Fe-alloy .htm).

84. Наплавка шнеков. Ремонт, изготовление шнеков. [Электронный ресурс]: (Сайт) / ЗАО «Плакарт» / – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа:



<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:uoadТН94b2wJ:solutions.plackart.com/details/43/+&cd=11&hl=ru&ct=clnk&gl=ua>. – Название с экрана.

85. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы: ГОСТ 10051-75. – [Действительный от 2003-11-01]. – М.: Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. – 8 с. – (Межгосударственный стандарт).

86. Электроды "УТР" для наплавки твердым сплавом. [Электронный ресурс]: (Сайт) / Торгово-промышленная компания "Русвит-Буд" / – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: [http://rusvit-bud.at.ua/index/utp\\_ledurit\\_65/0-203](http://rusvit-bud.at.ua/index/utp_ledurit_65/0-203). – Название с экрана.

87. Восстановление шнеков экструдеров плазменной наплавкой разнополярно-импульсным током / А.В. Грановский, В.В. Чигарев, Н.А. Макаренко, К.А. Кондрашов, А.М. Куций // Захист металургійних машин від поломок: зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2011. – Вип. 13. – С. 235-238.

88. Гладченко А.Н. Центробежная биметаллизация цилиндров двухчервячных конических экструдеров / А.Н. Гладченко, В.В. Шевеля, В.Г. Зверлін // Проблеми трибології. – 2012. – №1. – С. 6-8.

89. Биметаллические цилиндры [Электронный ресурс]: (Сайт) / WAFO Schnecken und Zylinder GmbH – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://http://ru.wafo.de/>. – Название с экрана.

90. Защита шнеков от абразивного износа и эрозии [Электронный ресурс]: (Сайт) / ИРУП "Технопарк БНТУ "Политехник" / – Электрон. дан. – 2014. – Режим доступа: <http://www.otnp.metolit.by/ru/dir/index.php/503>. – Название с экрана.

91. Каплун В. Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструментов ионным азотированием в безводородных средах : автореф. дис... д-ра техн. наук / В.Г. Каплун. – К., 1991. – 40 с.

92. Лахтин Ю.М. Азотирование сталей / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 175 с.

93. Лахтин Ю.М. Структура и прочность азотированных слоев / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М. : Металлургия, 1982. – 176 с.

94. Каплун В.Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструментов ионным азотированием в безводородных средах : автореф. дис... д-ра техн. наук / В. Г. Каплун. – К., 1991. – 40 с.

95. Рудык А.Е. Повышение долговечности деталей узлов трения технологического оборудования сахарных заводов : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.02.14 / А.Е. Рудык ; КТИПП. – К., 1986. – 17с.

96. Герасимов С.А. Исследование износостойкости азотируемых сталей / С.А. Герасимов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов // Известия ВУЗов. «Черная металлургия». – 1973. – № 1. – С. 127-129.

97. Ястреба С.П. Підвищення ефективності роботи і довговічності олійних пресів: дис. ... кандидата техн. наук : 05.18.12 / Ястреба Сергій Петрович. – К., 2012. – 128 с.

98. Корчиков Е.С. Флористическое разнообразие Красносамарского лесного массива / Е.С. Корчиков, Н.В. Прохорова, Н.М. Матвеев, Т.И. Плаксына, Ю.В. Макарова, А.Н. Козлов // Самарская лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2009. – Т. 18. – №3. – С. 187-191,.

99. Уровень кислотности [Электронный ресурс]: (Сайт) / Журнал «GE-news» – Электрон. дан. – 2016. – Режим доступа: [http://www.globaledge.ru/ru/zhurna\\_po\\_derevoobrabotke\\_ge\\_news/m554.html](http://www.globaledge.ru/ru/zhurna_po_derevoobrabotke_ge_news/m554.html). – Название с экрана.

100. Субстрат для выращивания грибов рН среды, принципы составления [Электронный ресурс]: (Сайт) / Технологии грибоводства / – Электрон. дан. – 2016. – Режим доступа: <http://wer23sd.narod.ru/substrat.htm>. – Название с экрана.

101. Фенгел Д. Древесина (химия, ультраструктура, реакции): Пер. с англ. / Д. Фенгель, Г. Вегенер, А.А. Леонович // Под ред. д.-ра техн. наук, проф. А.А. Леоновича – М. : Лесная пром.-сть, 1988. – 512 с.

102. Дейнеко И.П. Исследование химического состава 160 коры сосны / И.П. Дейнеко, И.В. Дейнеко, Л.П. Белов // Химия растительного сырья, 2007. – № 1. – С. 19-24

103. Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы / Н.И. Никитин // М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 711 с.

104. Орлов В.В. Повышение эксплуатационных свойств топливной щепы из лесосесечных отходов путем её обезвоживания: дис. ... кандидата техн. наук : 05.21.01 / Орлов Виталий Владимирович. – С.-П., 2016. – 160 с.

105. Алтынова А.Е. Исследование количественных показателей выделения лигнина в процессе получения твердого топлива (пеллет) / А.Е. Алтынова, Б.Б. Саркенов // Современные научные исследования и инновации, 2015. – № 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/47406>. – Название с экрана.

106. Хлуденев А. Г. Моделирование кинетики износа технологического оборудования нефтехимических производств / А.Г. Хлуденев, Н.М. Рябчиков // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – N 9. – С. 50-54.

107. Стечишин М.С. Методи оцінки і підвищення довговічності деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. тех. наук : спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» / М.С. Стечишин. – Хмельницький, 1998. – 30 с.

108. Раткин В.В., Кокодеев А.В. Построение модели деформирования сжимаемых железобетонных конструктивных элементов транспортных сооружений, эксплуатируемых в агрессивных средах / В.В. Раткин, А.В. Кокодеев // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2015. – № 1 (9) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://trts.esrae.ru/15-64>. – Название с экрана.

109. Овчинников И.И. Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред / И.И. Овчинников И.И. // Интернет-журнал "Строительство уникальных зданий

и сооружений". – 2012. – №2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://unistroy.spbstu.ru/index\\_2012\\_03/3\\_ovchinnikov\\_3.pdf](http://unistroy.spbstu.ru/index_2012_03/3_ovchinnikov_3.pdf). – Название с экрана.

110. Овчинникова А.И. Механика поврежденных армированных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. тех. наук : спец. 05.23.17 – «Строительная механика» / Волгоград. – 2004. – 20 с.

111. Овчинников И.И. Моделирование поведения мостовых металлоконструкций, подвергающихся коррозионному износу / И.И. Овчинников, Е. Фпузи, М.Ю. Шпранкель // Дороги и мосты. – 2010. – №24. – С. 150 – 168 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rosdornii.ru/UserFiles/File/dim/24-2/09.pdf>. – Название с экрана.

112. Зеленцов Д.Г. Адаптация метода скользящего допуска к задачам оптимизации корродирующих конструкций / Д.Г. Зеленцов, Н.Ю. Науменко // Систем. технології. – 2005. – № 2. – С. 48-56.

113. Сухенко В.Ю. Корозійно-механічне спрацювання технологічного обладнання харчової промисловості / В.Ю. Сухенко, В.В. Мануїлов, Ю.Г. Сухенко // SWorldJournal. – 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-113/machines-and-mechanical-engineering-113/17109-113-0624>. – Название с экрана.

114. Кузьменко А.Г. Моделирование и прогнозирование изнашивания материалов незакрепленным абразивом / А.Г. Кузьменко, И.П. Билокур, О.А. Вишневикий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №6/7 (66). – С. 20-25.

115. Полярус О.В. Математична модель абразивного зносу риштака скребкового конвеєра / О.В. Полярус, О.В. Сімкович // Автомобильний транспорт. – 2010. – №27. – С. 110-112.

116. Крицкий В.Г. Моделирование миграции продуктов коррозии во 2-м контуре АЭС с реактором ВВЭР-1200 / В.Г. Крицкий, И.Г. Березина, А.В. Гаврилов, Е.А. Моткова, Е.В. Зеленина, Н.А. Прохоров // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: 9-ая международная научно-техническая конференция, 19-22 мая 2015 г.: сборник трудов. – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/article70-ru.htm>. – Название с экрана.

117. Lee G.Y. A physically-based abrasive wear model for composite materials / G.Y. Lee, C.K.H. Dharan, R.O. Ritchie // Wear. – 2002. – №252. – Pp. 322-331.

118. Ponthiaux P. Corrosion Resistance / P. Ponthiaux, F. Wenger, J.-P. Celis. – Rijeka: InTech, 2012. – 472 p.

119. Geringer J. Modeling fretting-corrosion wear of 316L SS against poly (methyl methacrylate) with the point defect model: fundamental theory, assessment, and outlook / J. Geringer, D.D. Macdonald // Electrochimica Acta, Elsevier. – 2012. -№ 79. – Pp.17-30.

120. Чихос Х. Системный анализ в трибонике / Х. Чихос; [пер. с англ. С. А. Харламова]. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
121. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ [учебное пособие для вузов] / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М.: Высш. Шк., 1989. – 367.
122. Salomon G. Application of System Thinking to Tribology / G. Salomon // ASLE Trans. – 1974/ – Vol. 17, № 4. – P. 295 – 299.
123. Громавский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания / Д.Г. Громаковский // Д.Г. Громаковский // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 1. – С. 72-79.
124. Евстигнеев Э.И. Химия древесины: Учеб. пособие / Э.И. Евстигнеев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 140 с.
125. Диаграмма Исикавы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL://www.kpms.ru/Implement/Qms\_Ishikawa\_Chart.htm. – Название с экрана.
126. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования: ГОСТ 30480-97. – [Действительный от 1998-07-01]. – Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 11 с. – (Межгосударственные стандарты).
127. Войтов В.А. Конструктивна зносостійкість вузлів тертя гідромашин. Частина 2. Методологія моделювання граничного змащування в гідромашинах / В.А. Войтов. – Х. : Центр Леся Курбаса. – 1997. – 154 с.
128. Руководство по эксплуатации ЕВ-350РЭ. Экструдер для брикетирования отходов ЕВ-350. – Черкассы: ООО ЧеркассыЭлеваторМаш», 2009. – 27 с.
129. Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки : ГОСТ 7769-82. – [Действительный от 1983-01-01]. – М : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1983. – 11 с. – (Межгосударственные стандарты).
130. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки : ГОСТ 5632-72. – [Действительный от 1975-01-01]. – М : Государственный комитет стандартов советов Министров СССР, 1972. – 39 с. – (Межгосударственные стандарты).
131. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия ГОСТ 4543-71. – [Действительный от 1973-01-01]. – М : Государственный комитет стандартов советов Министров СССР, 1971. – 39 с. – (Межгосударственные стандарты).
132. Сталь сортовая и калиброванная коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия : ГОСТ 5949-75. – [Действительный от 01-01-1977]. – М : Государственный комитет стандартов советов Министров СССР, 1975. – 33 с. – (Межгосударственные стандарты).
133. Прокат из качественной конструкционной углеродистой и легированной стали для холодного выдавливания и высадки. Технические условия : ГОСТ 10702-78. – [Действительный от 01-01-1980]. – М : Государственный комитет стандартов советов Министров СССР, 1978. – 14 с. – (Межгосударственные стандарты).

134. Канюка В.И. Справочник по инструментальным сталям / В.И. Канюка, А.Н. Терехов, А.Н. Мороз. – Х.: «Металлика», 2008. – 224 с.
135. Прутки и полосы из инструментальной легированной стали. Технические условия : ГОСТ 5950-73. – [Действительный от 01-01-1973]. – М : Государственный комитет стандартов советов Министров СССР, 1973. – 66 с. – (Межгосударственные стандарты).
136. Моисеев А.В. Износостойкость дереворежущего инструмента / А.В. Моисеев. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 112с.
137. Корма. Методы определения аммиачного азота и активной кислотности (рН) : ГОСТ 26180-84. – [Действительный от 1985-07-01]. – Государственный комитет стандартов советов Министров СССР, 1984. – 9 с. – (Межгосударственные стандарты).
138. Продукты химические органические. Методы определения кислотности и щелочности : ГОСТ 28351-89. – [Действительный от 1991-01-01]. – Государственный комитет стандартов советов Министров СССР, 1990. – 5 с. – (Межгосударственные стандарты).
139. Мука древесная. Методы испытаний : ГОСТ 16362-86. – [Действительный от 1988-01-01]. – Государственный комитет стандартов советов Министров СССР, 1990. – 9 с. – (Межгосударственные стандарты).
140. Комбикорма, комбикормовое сырье. Метод определения общей кислотности : ГОСТ 13496.12-98. – [Действительный от 2000-07-01]. – Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2011. – 7 с. – (Межгосударственные стандарты).
141. Реактивы. Методы приготовления вспомогательных реактивов и растворов, применяемых при анализе : ГОСТ 4517. – [Действительный от 1988-07-01]. – М. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1988. – 36 с. – (Межгосударственные стандарты).
142. 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.
143. Войтов В.А. Универсальная машина трения / В.А. Войтов, В.А. Баздеркин // Трение и износ. – 1992. – Т. 13. – С. 501 – 506.
144. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Мир, 1981. – 448 с.
145. Веников В.А., Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М.: Высш. Школа, 1991. – 419 с.
146. Гухман А.А. Введение в теорию подобия / А.А. Гурман. – М.: Высш. Школа, 1973. – 295 с.

147. Браун Э.Д. Моделирование трение и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
148. Евдокимов Ю.А. Метод ускоренных испытаний материалов, деталей и узлов машин на износостойкость / Ю.А. Евдокимов // Трение и износ. – 1984. – Т.5, № 1. – С. 54 – 58.
149. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки фрикционной теплостойкости материалов. ГОСТ 23.210-80. – [Введ. 1981-07-01]. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 10 с. – (Межгосударственный стандарт).
150. Борисов М.В. Ускоренные испытания машин на износостойкость как основа повышения их качества // М.В. Борисов, И.А. Павлов, В.И. Постников. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 352 с.
151. Словарь-справочник по трению, износа и смазке деталей машин / [В.Д. Зозуля и др.]. – К.: Наук. думка, 1990. – 259 с.
152. Разработка методики и исследование проявления эффекта Ребиндера при различных смазочных средах / С.В. Венцель, Н.Н. Курманова, В.А. Баздеркин [и др.] // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, № 4. – С. 661 – 665.
153. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: ГОСТ 2789-73. – [Введ. 1975-01-01]. – М.: Стандартиформ, 2006. – 7. с. – (Межгосударственный стандарт).
154. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: [учеб. пособие для вузов] / Е.Н. Львовский. – Высш. Школа, 1988. – 239 с.
155. Зажигаев Л.С. Методы планирования и обработки физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
156. Бейтс Р. Определение рН. Теория и практика / Р. Бейтс; Ред. пер. с англ.: Б.П.Никольский, М.М.Шульц. – 2-е изд., испр. – Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1972. – 398 с.
157. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М.: «Машиностроение», 1976, 271 с.
158. Рачев, Х. Справочник по коррозии / Х. Рачев, С. Стефанова. – М.: Мир, 1982. – 519 с.
159. Справочник по электрохимии / под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1981. – 125 с.
160. Виноградов С.Н. Коррозия технологического оборудования в дегазирующих растворах отравляющих веществ / С.Н. Виноградов, К.Н. Лысенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 171–181.
161. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
162. Трение, изнашивания смазка: справочник в 2 кн. / [под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина]. – М.: Машиностроение, 1978 – . – Кн. 1. – 1978. – 400 с.

163. Браун Э.Д. Моделирование износа ходовых мостовых кранов / Э.Д. Браун, Ф.Л. Аникеев // В кн.: Расчёт и моделирование режима работы тормозных и фрикционных устройств. – М.: Наука, 1974. – С. 60 – 73.

164. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования: ГОСТ 30480-97. – [Введ. 1998-07-01] – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 11 с. – (Межгосударственный стандарт).

165. Руководство по эксплуатации ЕВ-350РЭ. Экструдер для брикетирования отходов ЕВ-350М. – Черкассы: ООО ЧеркассыЭлеваторМаш», 2013. – 33 с.

166. Машков Ю.К. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю.К. Машков, К.Н. Полещенко, С.Н. Поворознюк, П.В. Орлов. – М.: Наука, 2000. – 280 с.

167. Сорокин Г.М. Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов / Г.М. Сорокин, А.П. Ефремов, Л.С. Саакян. – М.: Нефть и газ, 2002 – 424 с.

168. Семёнова И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семёнова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.

169. Пат. 107500 Україна, МПК G01B 21/08. Спосіб визначення товщини захисних оксидних плівок, що формуються при терті / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, Є.А. Сатановський, О.К. Олейник, О.В. Марков; заявник та патентовласник Т.С. Скобло. – и 2015 12140; заяв. 07.12.2015, опубл. 10.06.2016, Бюл. № 11, 2016 р. – 3 с.

170. Пат. 108224 Україна, МПК C10M 101/00. Спосіб визначення товщини захисних оксидних плівок, що формуються при терті / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.О. Гончаренко, Є.А. Сатановський, О.К. Олейник, О.В. Марков; заявник та патентовласник Т.С. Скобло. – и 2015 12910; заяв. 28.12.2015, опубл. 11.07.2016, Бюл. № 13, 2016 р. – 4 с.

171. Кухтов В.Г. Долговечность деталей шасси колёсных тракторов / В.Г. Кухтов. – Харьков: ХНАДУ, 2004. – 292 с.

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### Перелік та креслення швидкозношуваних частин екструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М

##### Перелік швидкозношуваних частин екструдера ЕВ-350

1.	Хвостовик	ЕВ-350.02.03.006-40-01
2.	Наконечник	ЕВ-350.02.00.009-40
3.	Філь'єра	ЕВ-350.02.03.002-50/40МЛ
4.	Філь'єра	ЕВ-350.02.03.003-50/40МЛ
5.	Філь'єра	ЕВ-350.02.03.004-50/40МЛ
6.	Філь'єра	ЕВ-350.02.03.005-50/40МЛ
7.	Філь'єра	ЕВ-350.02.03.006-50/40МЛ
8.	Шнек малий	ЕВ-350.02.00.005-40-06
9.	Шнек конічний	ЕВ-350.02.00.040-40-06



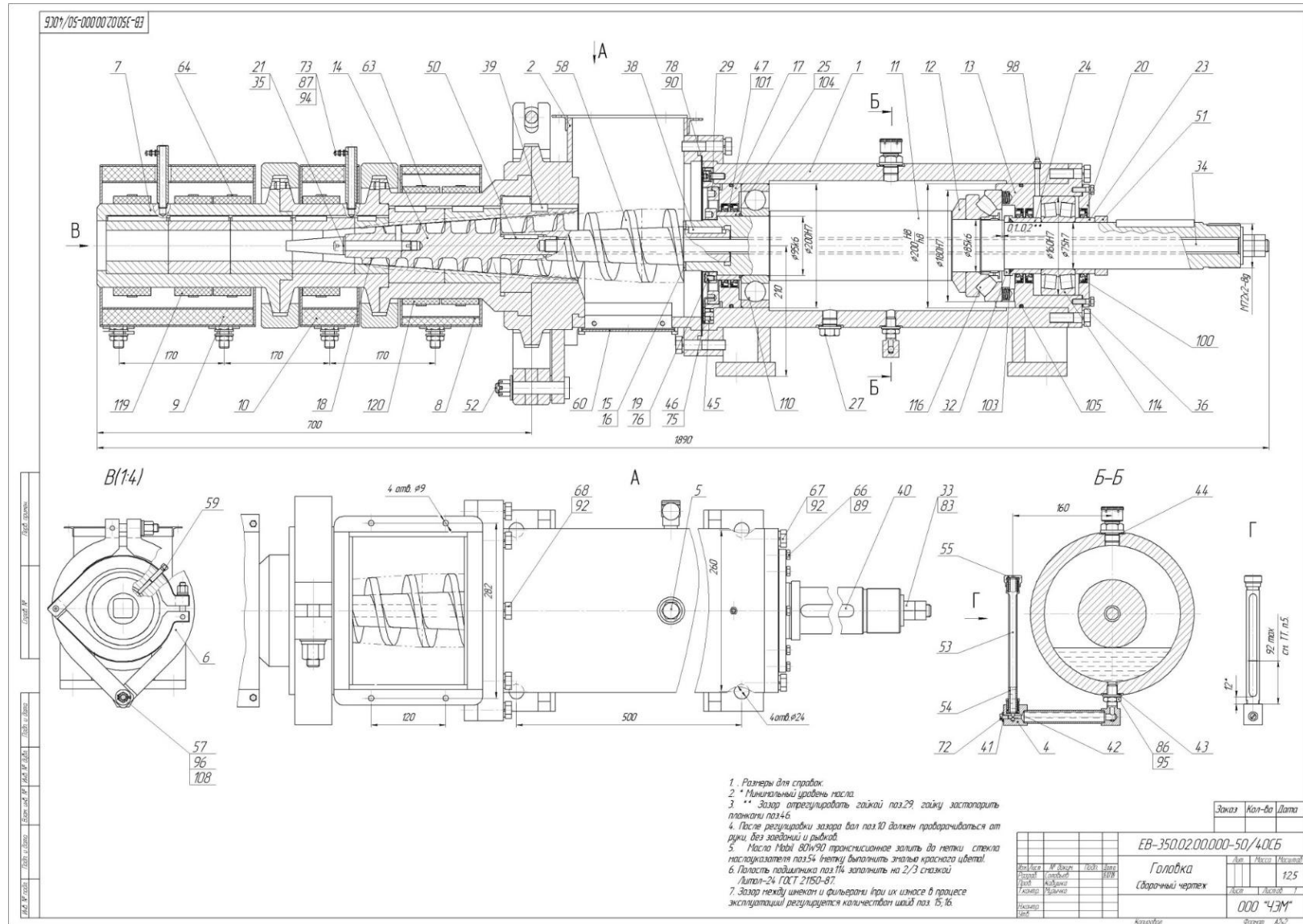
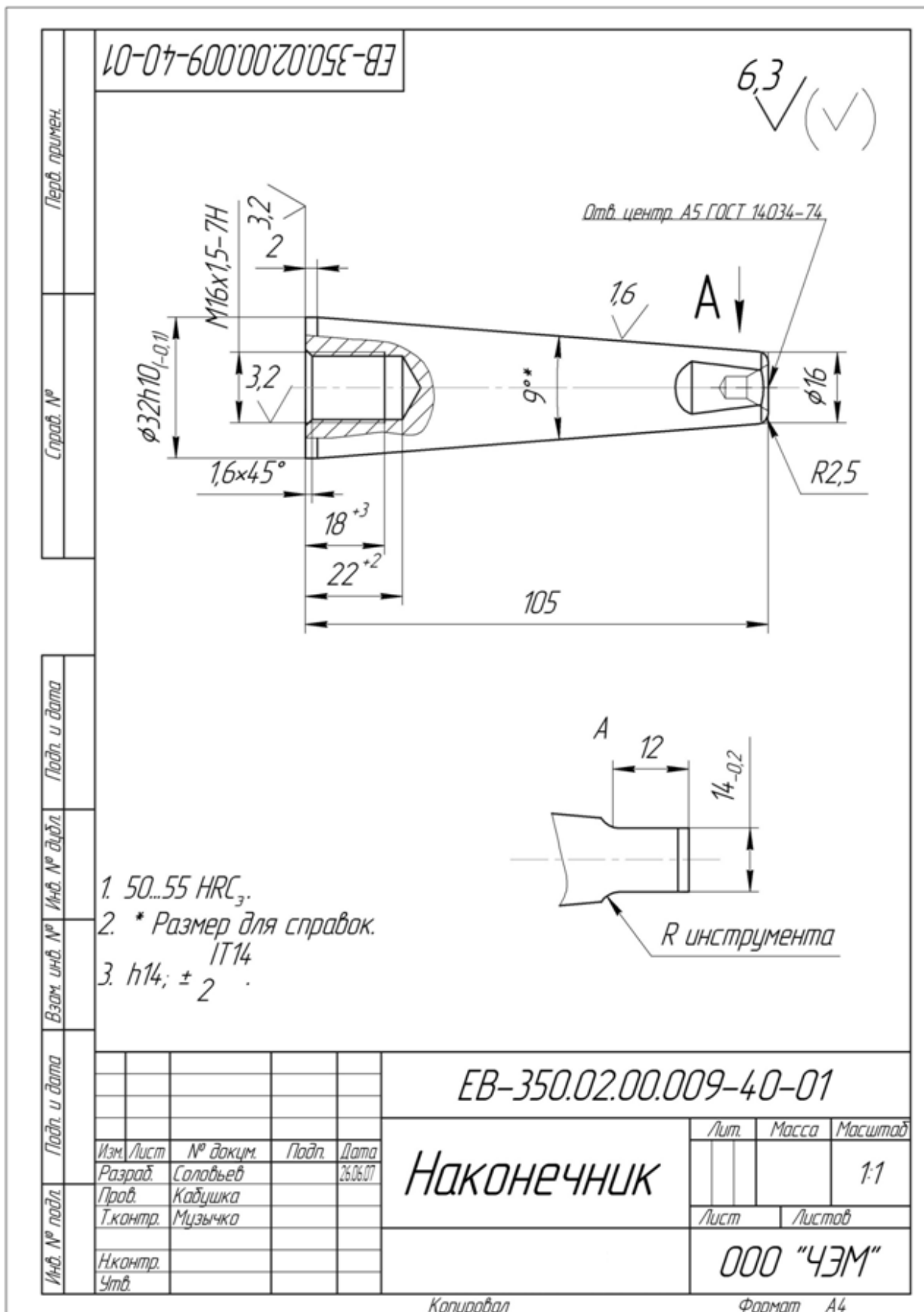


Рис. А1 – Головка. Складальне креслення екструдера EB-350





Копировал

Формат А4

Рис. А3 – Наконечник EB-350.02.00.009-40









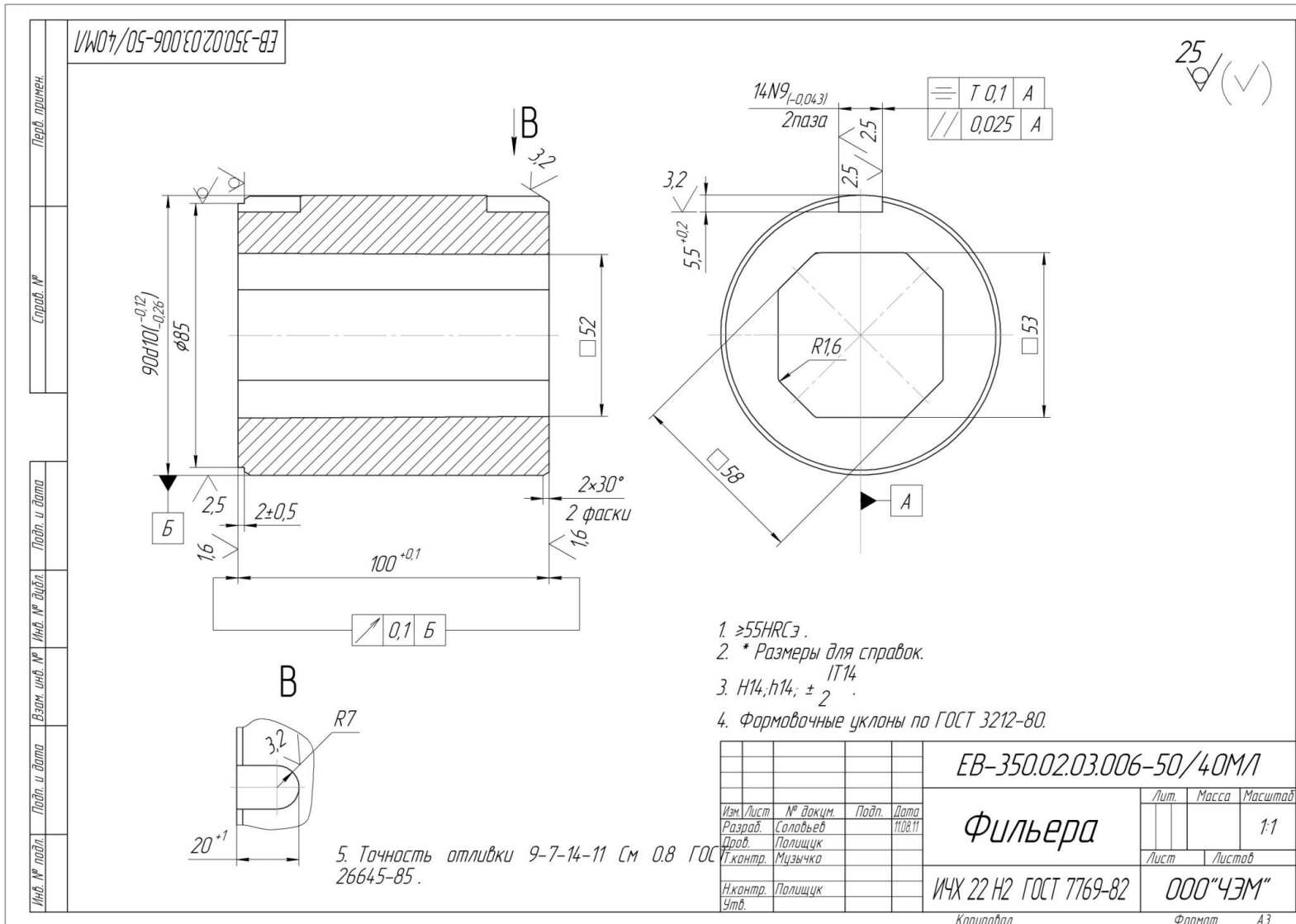


Рис. А8 – Филь'ера EB-350.02.03.006-50/40МЛ





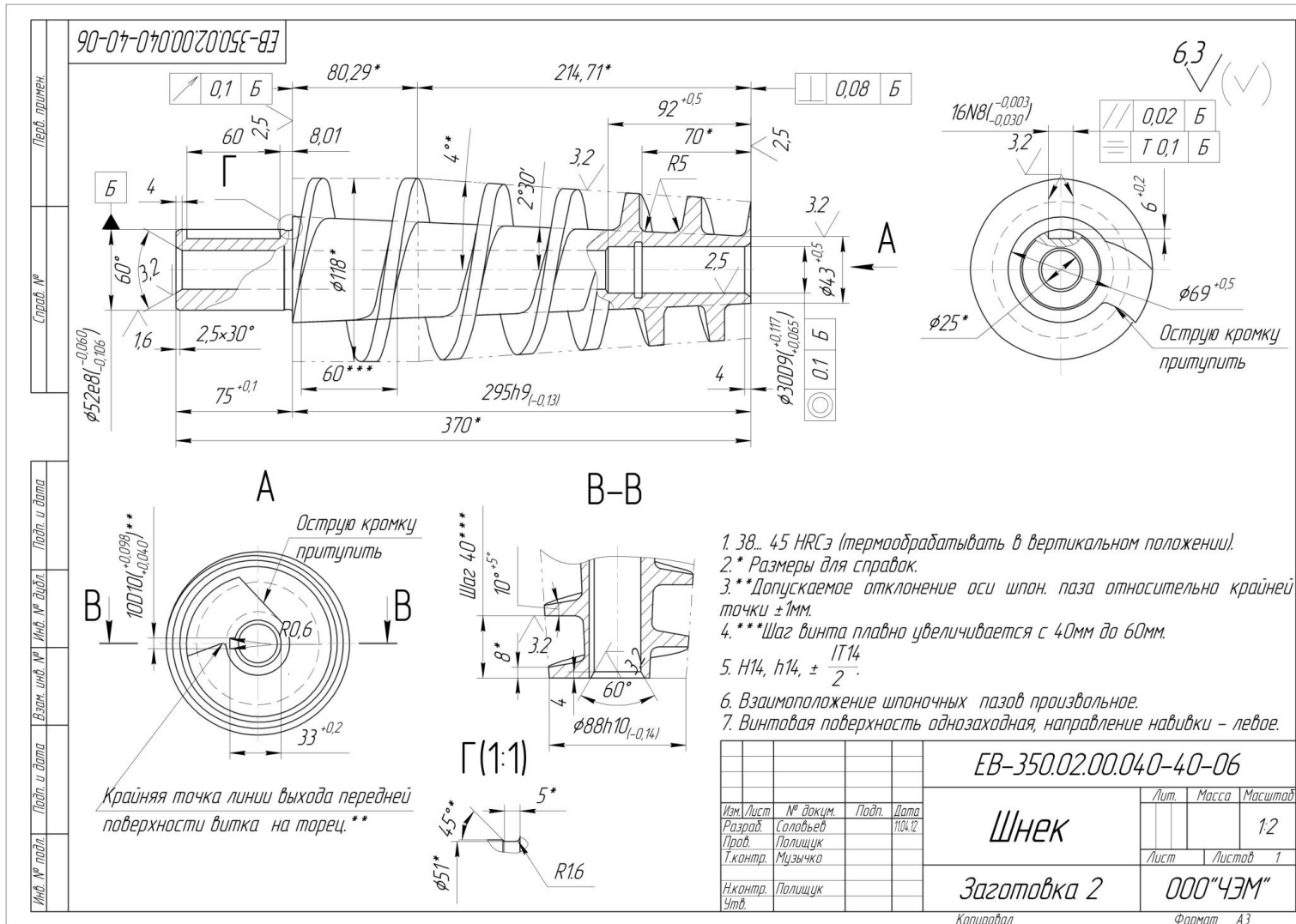


Рис. А10 – Шнек коничный EB-350.02.00.040-40-06

## Перелік швидкозношуваних частин екструдера EB-350M

- |             |                        |
|-------------|------------------------|
| 1. Філь'єра | EB-350.02.03.001-50M Л |
| 2. Філь'єра | EB-350.02.03.002-50M Л |
| 3. Філь'єра | EB-350.02.03.003-50M Л |
| 4. Шнек     | EB-350.02.00.005-50M   |

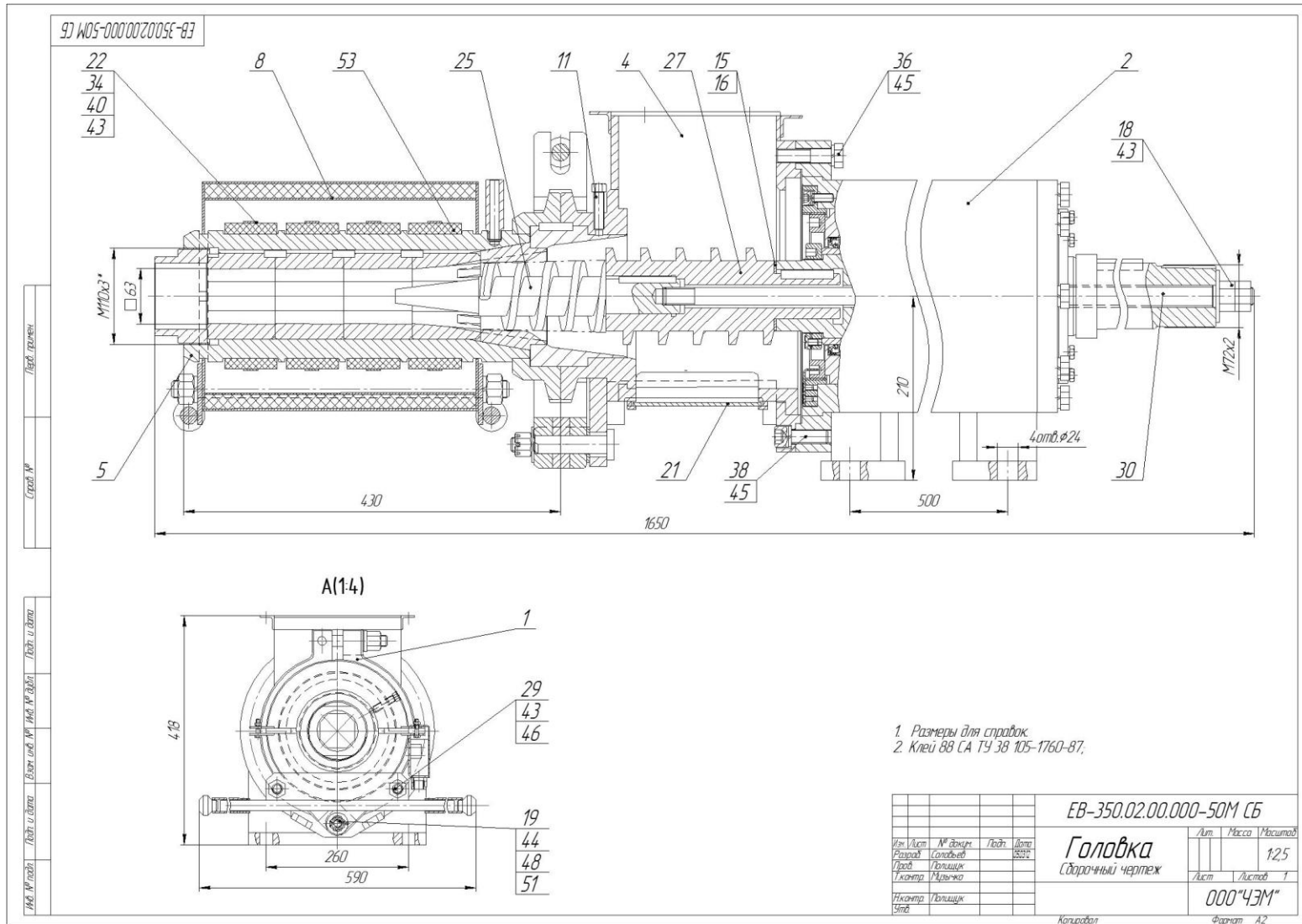


Рис. А12 – Головка. Складальне креслення екструдера EB-350М

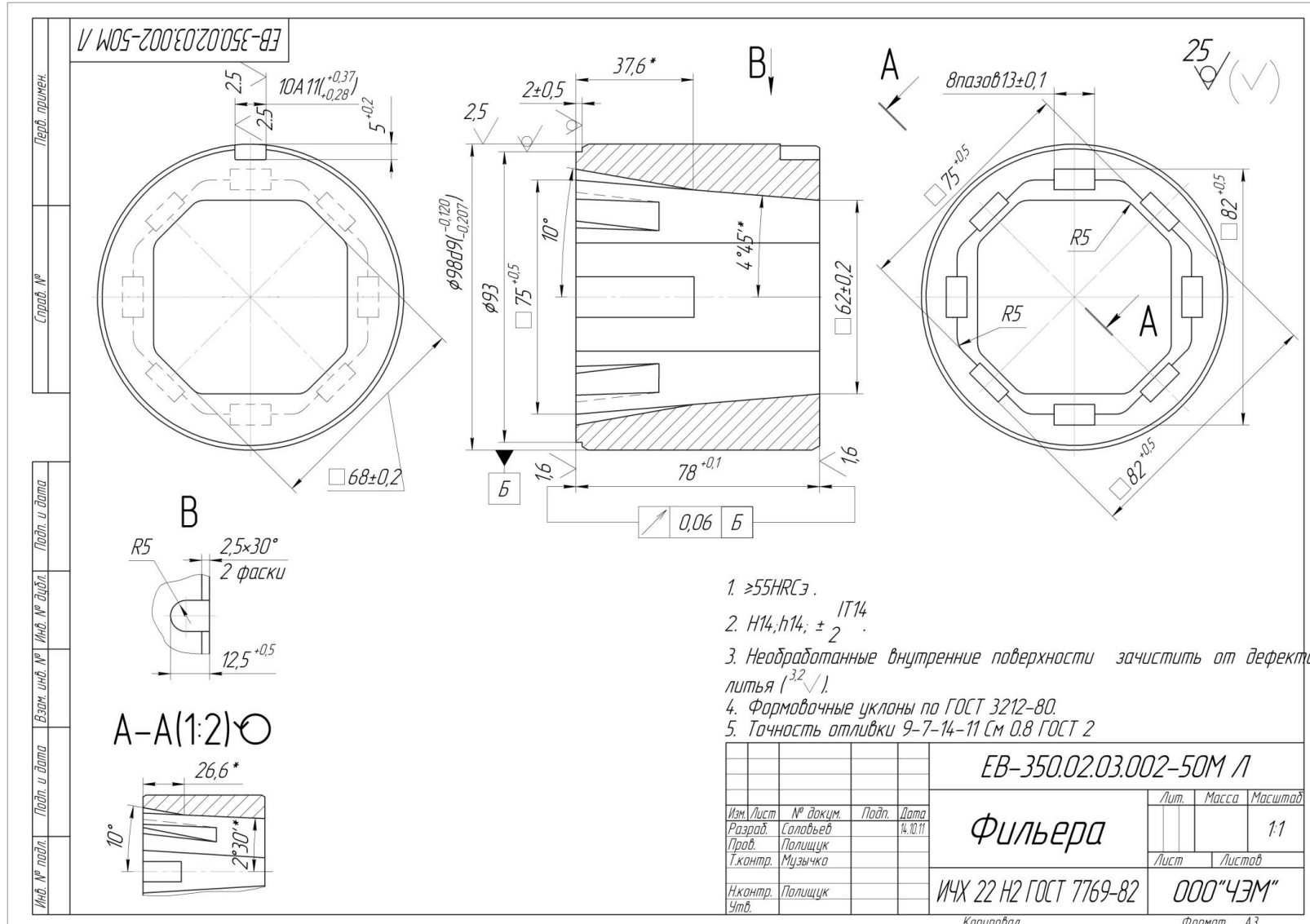


Рис. А13 – Філь'ера EB-350.02.03.001-50M Л

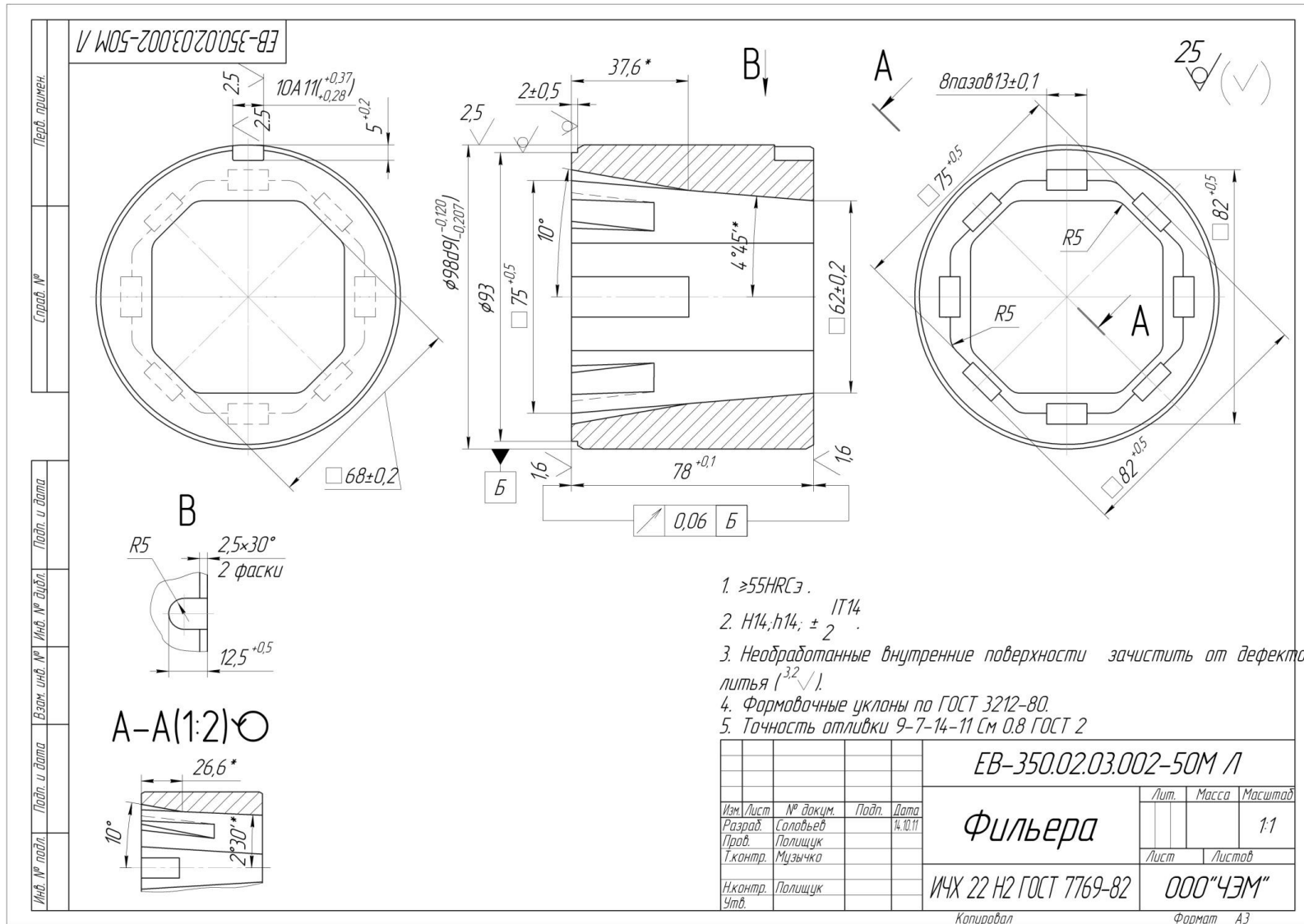


Рис. А14 – Філь'єра ЕВ-350.02.03.002-50М Л







### Хімічний склад поверхонь тертя чавунів ЧХ22Н2, ЧХ32 та сталі 40Х та 95Х18 при рН5, рН8 та рН 11

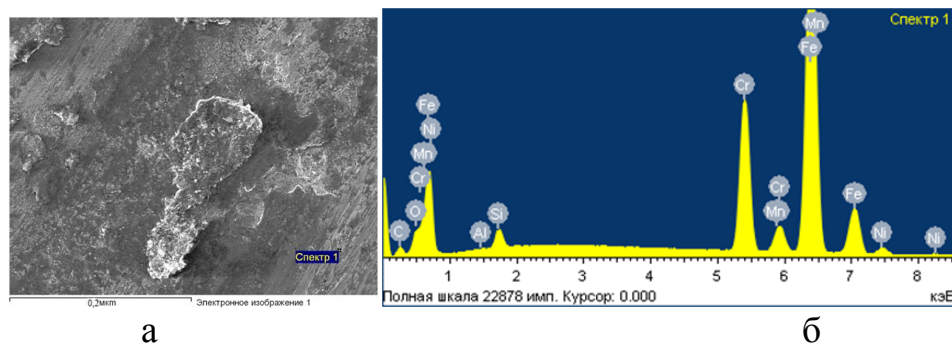


Рис. Б.1 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

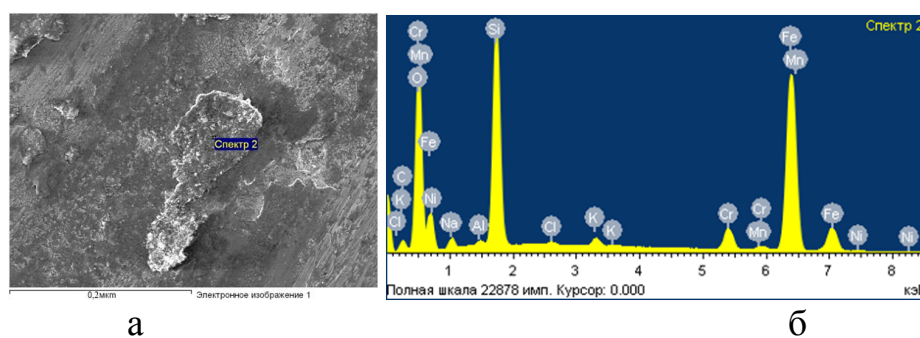


Рис. Б.2 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

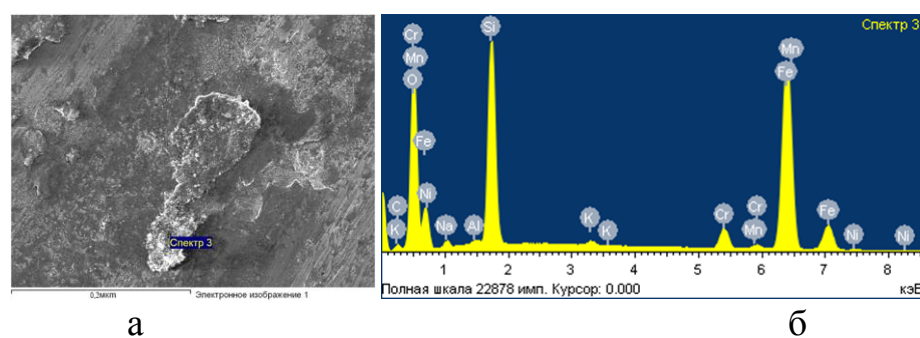


Рис. Б.3 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

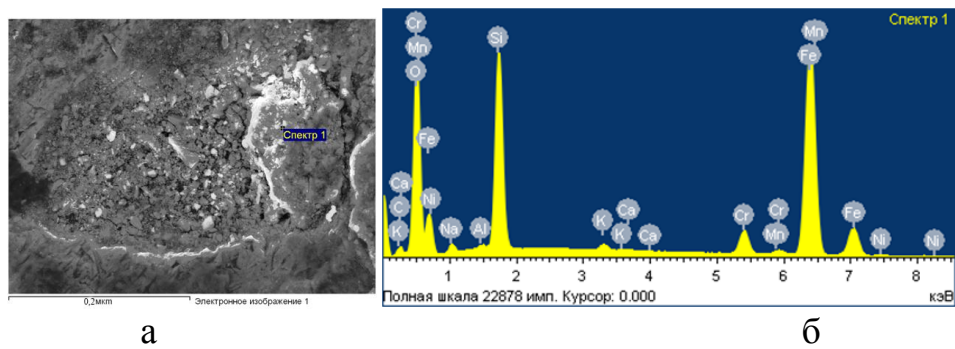


Рис. Б.4 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

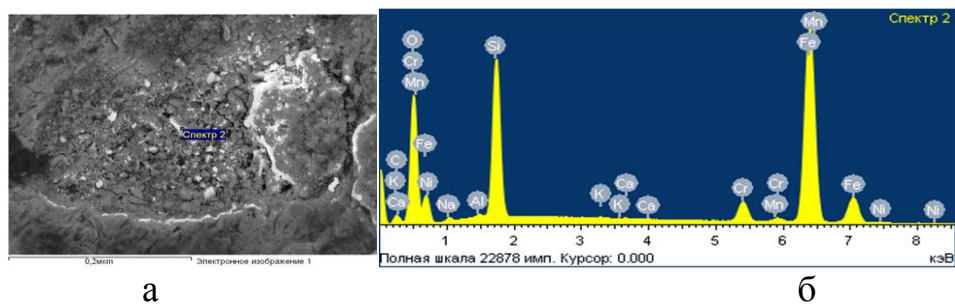


Рис. Б.5 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

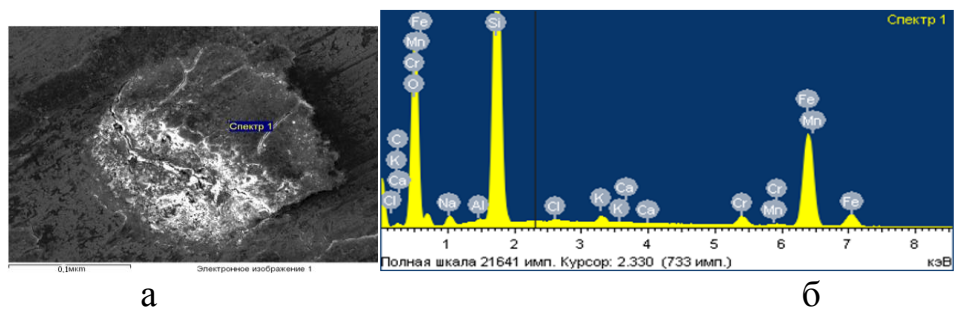


Рис. Б.6 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,1 мкм; б – металографічна діаграма

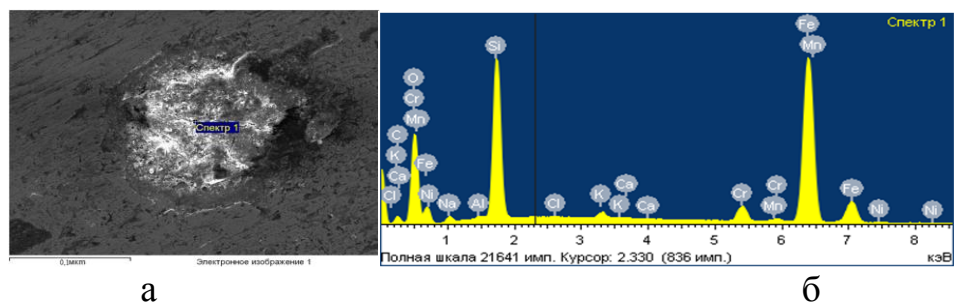


Рис. Б.7 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,1 мкм; б – металографічна діаграма

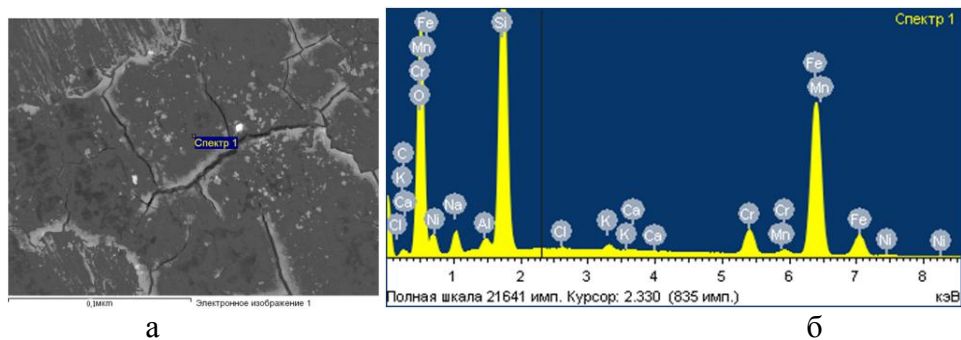


Рис. Б.8 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,1 мкм; б – металографічна діаграма

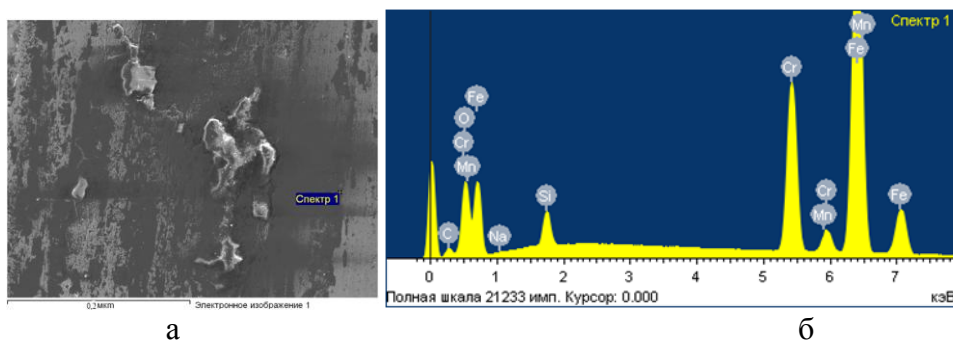


Рис. Б.9 – Хімічний аналіз поверхні тертя підбраного чавуну ЧХ32 при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

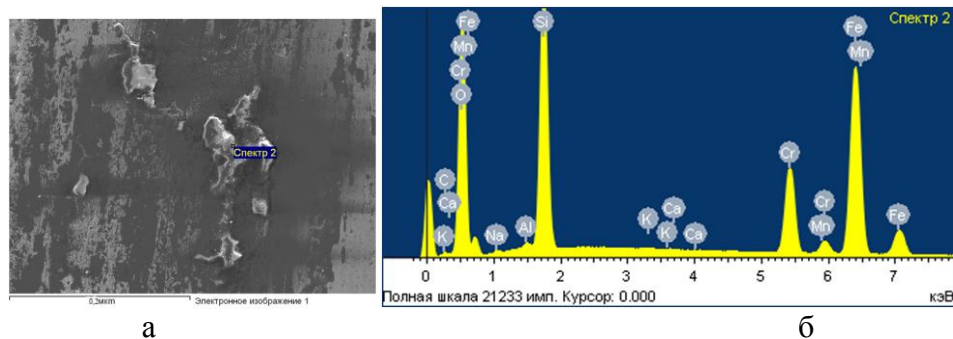


Рис. Б.10 – Хімічний аналіз поверхні тертя підбраного чавуну ЧХ32 при рН5 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

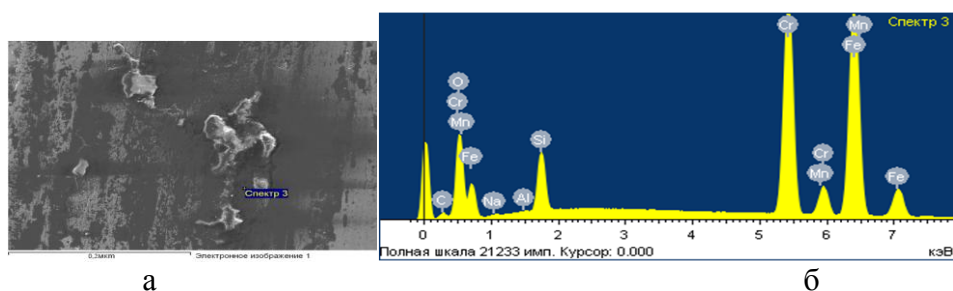
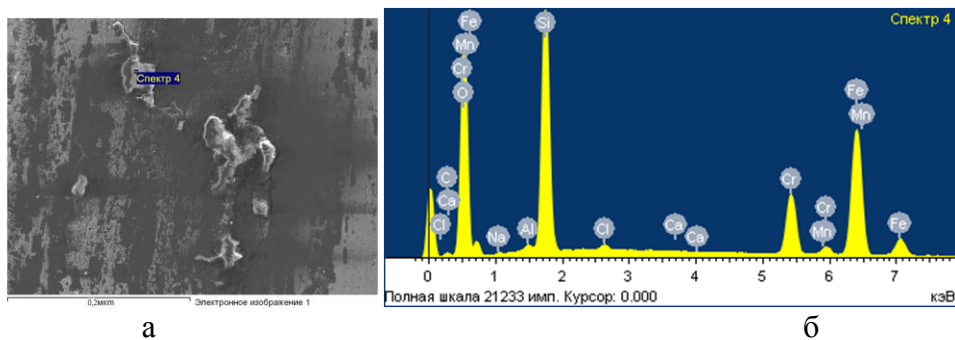


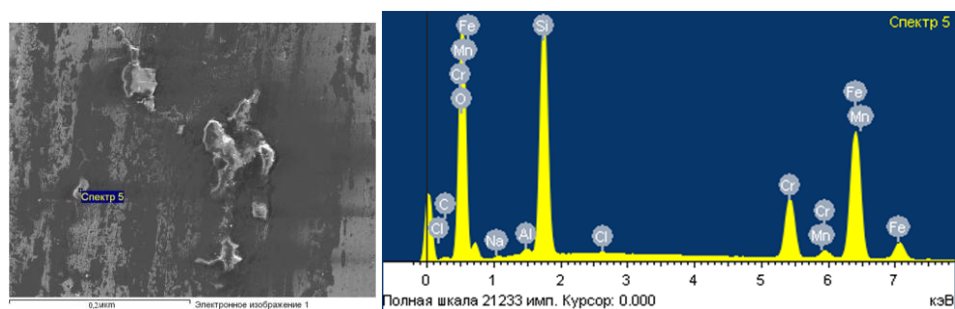
Рис. Б.11 – Хімічний аналіз поверхні тертя підбраного чавуну ЧХ32 при рН5 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



а

б

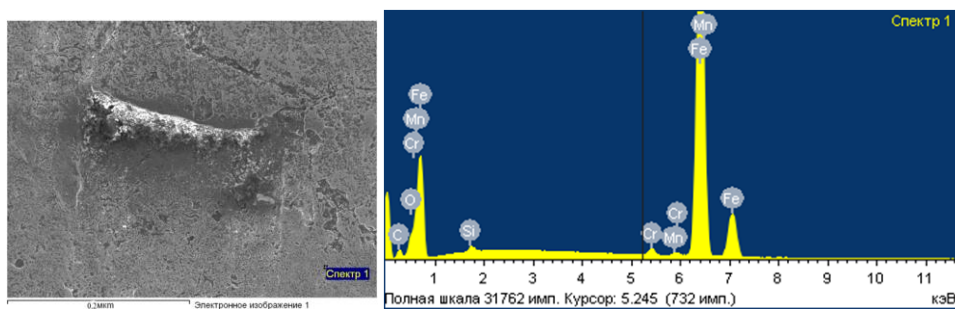
Рис. Б.12 – Хімічний аналіз поверхні тертя підбраного чавуну ЧХ32 при рН5 та абразивності 10 % спектр 4: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



а

б

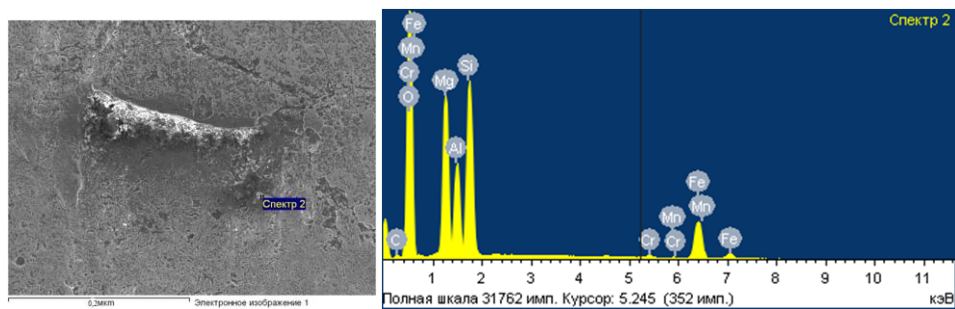
Рис. Б.13 – Хімічний аналіз поверхні тертя підбраного чавуну ЧХ32 при рН5 та абразивності 10 % спектр 5: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



а

б

Рис. Б.14 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40Х при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



а

б

Рис. Б.15 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40Х при рН5 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

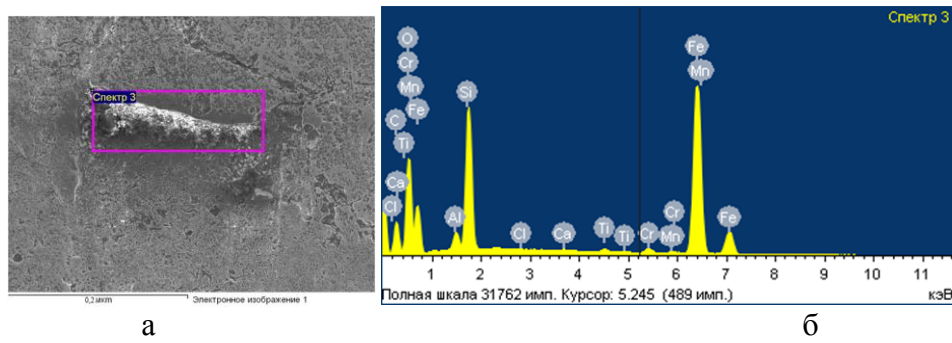


Рис. Б.16 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН5 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

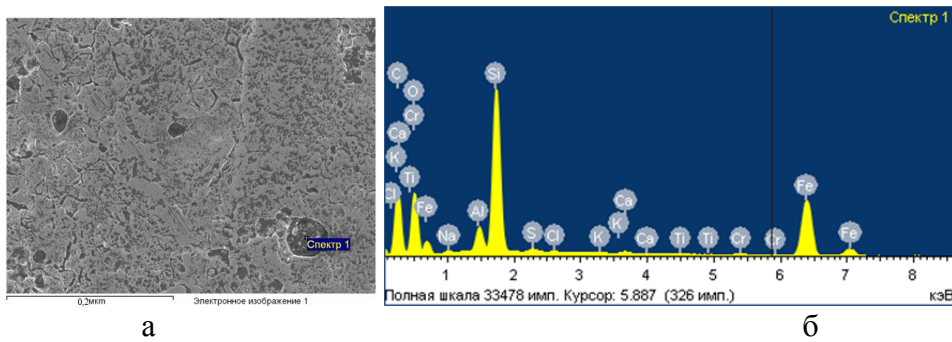


Рис. Б.17 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

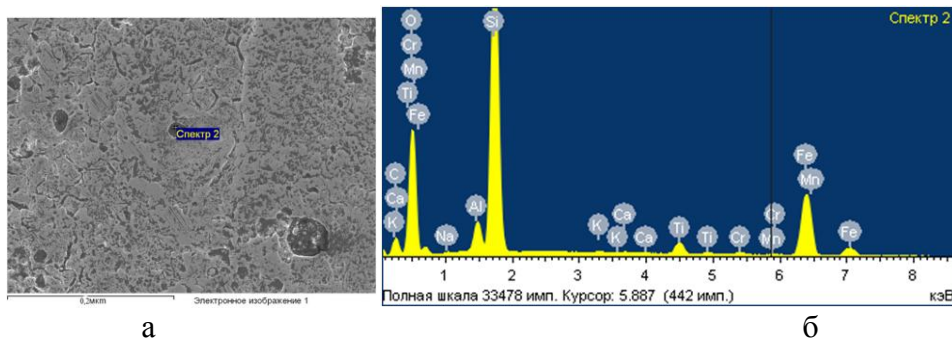


Рис. Б.18 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН5 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

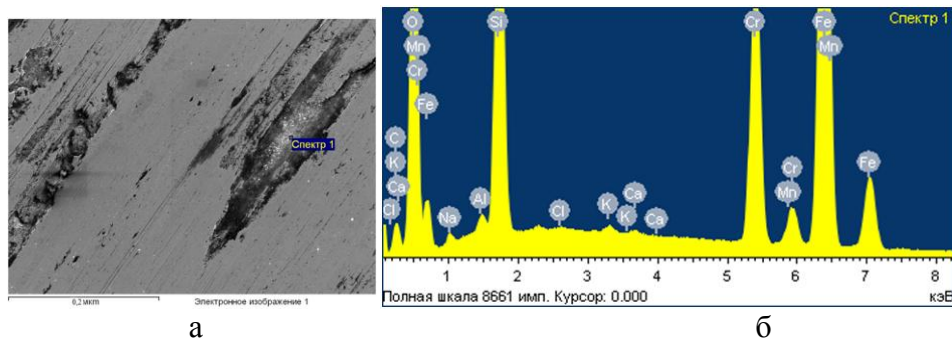


Рис. Б.19 – Хімічний аналіз поверхні тертя підбраної сталі 95X18 при рН5 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

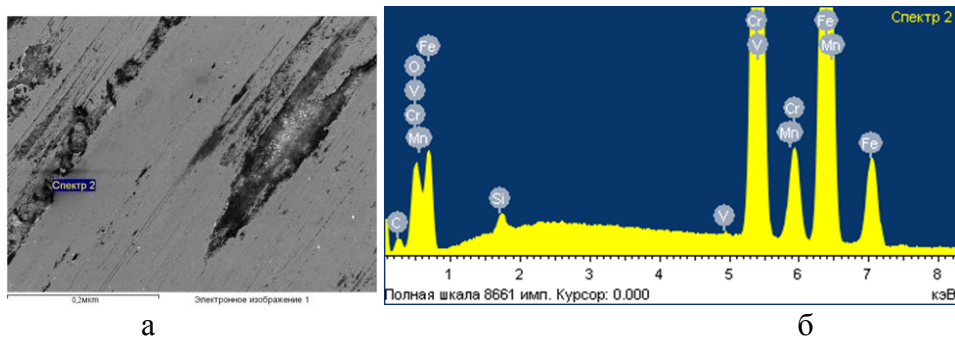


Рис. Б.20 – Хімічний аналіз поверхні тертя підбраної сталі 95X18 при рН5 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

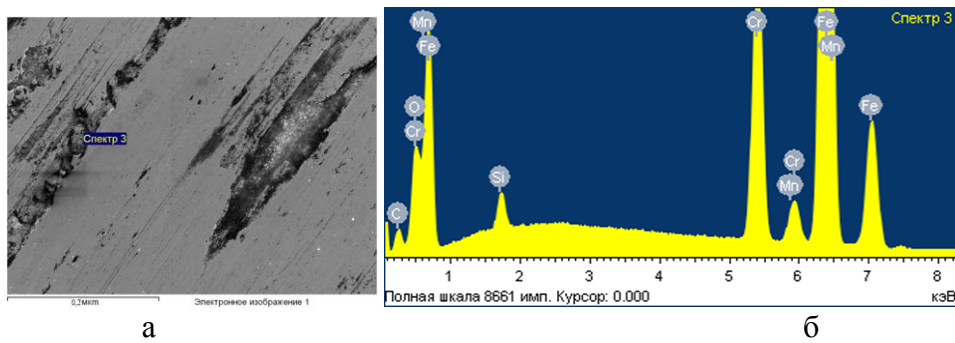


Рис. Б.21 – Хімічний аналіз поверхні тертя підбраної сталі 95X18 при рН5 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 200 мкм; б – металографічна діаграма

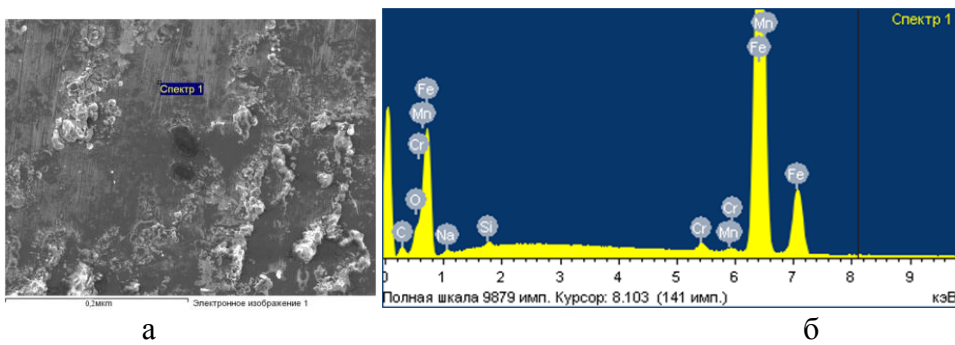


Рис. Б.22 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН8 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

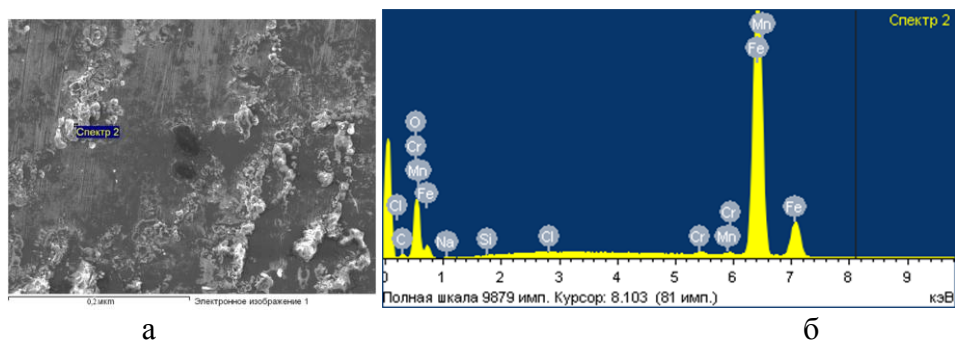


Рис. Б.23 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН8 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

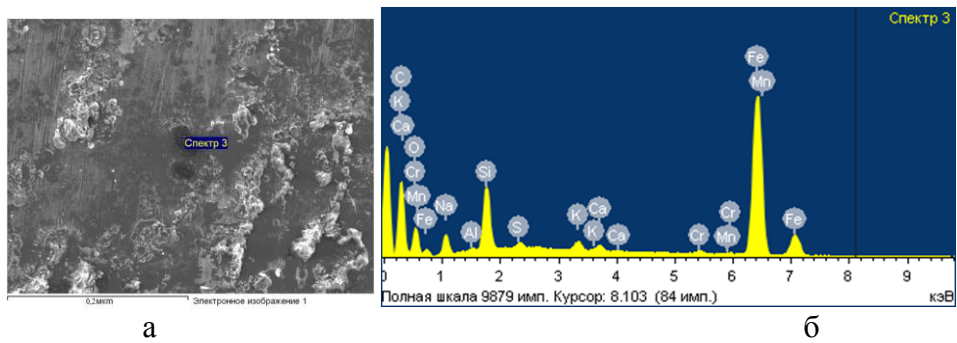


Рис. Б.24 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН5 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

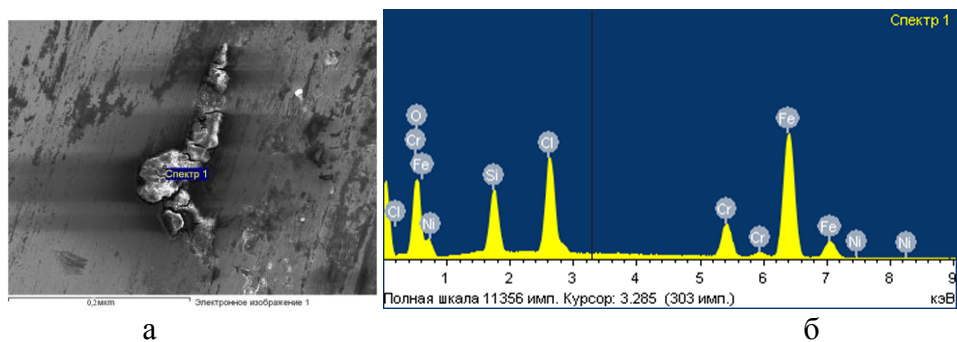


Рис. Б.25 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН5 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

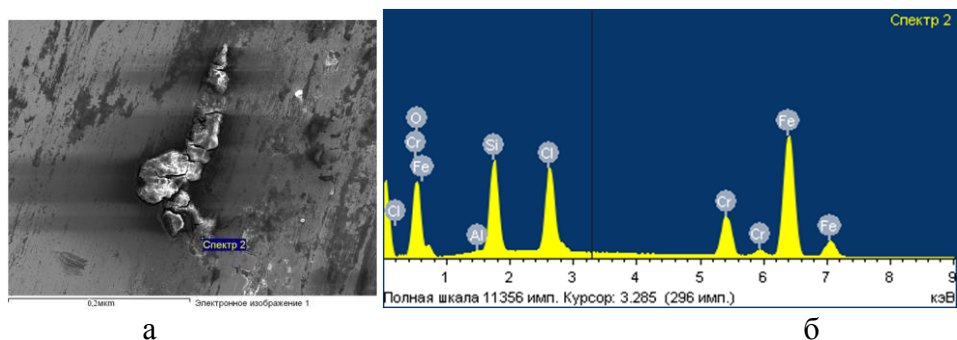


Рис. Б.26 – Хімічний аналіз поверхні тертя сталі 95X18 при рН8 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

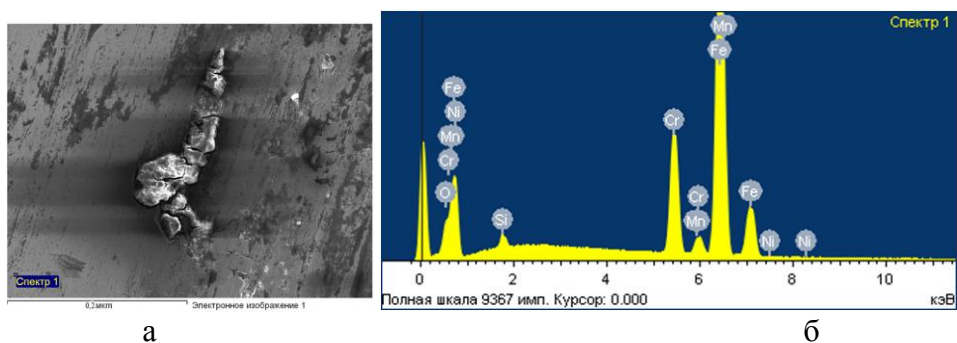
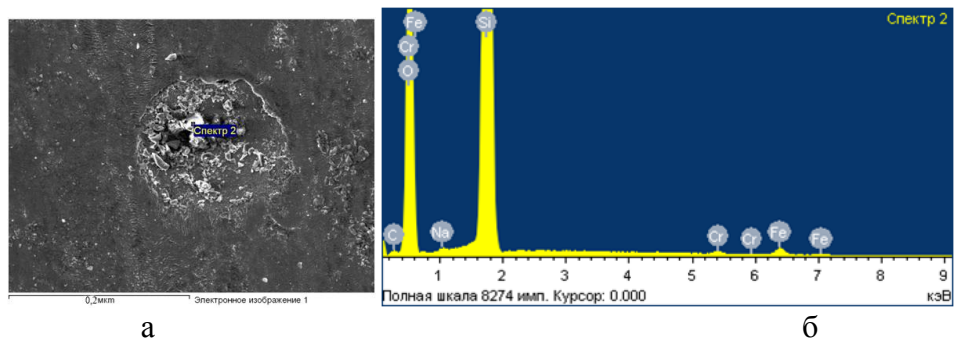


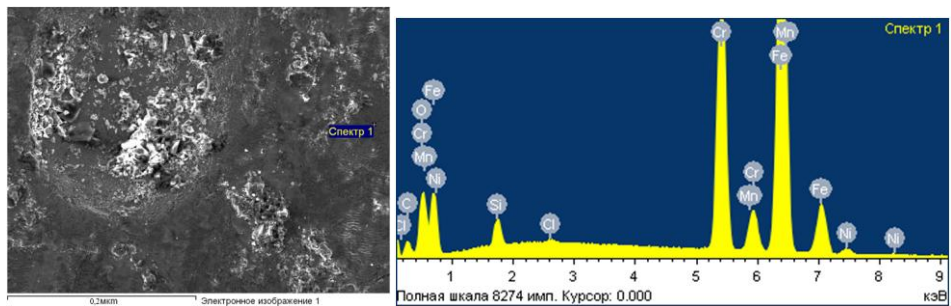
Рис. Б.27 – Хімічний аналіз поверхні тертя сталі 95X18 при рН8 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



а

б

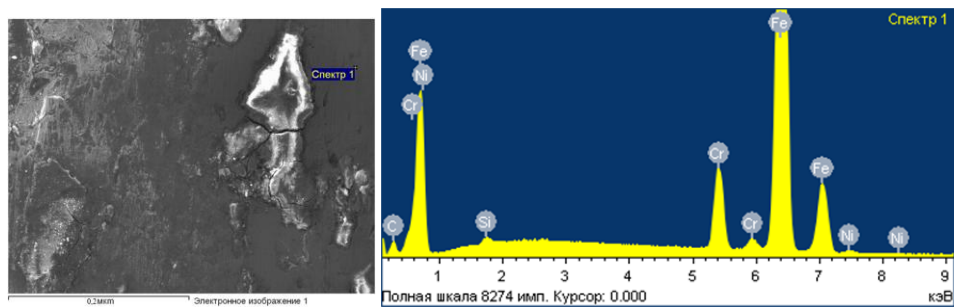
Рис. Б.28 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН8 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



а

б

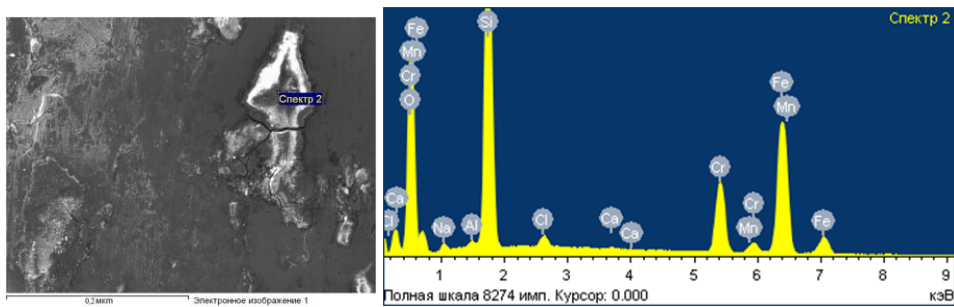
Рис. Б.29 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН8 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



а

б

Рис. Б.30 – Хімічний аналіз поверхні тертя чавуну ЧХ32 при рН8 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



а

б

Рис. Б.31 – Хімічний аналіз поверхні тертя чавуну ЧХ32 при рН8 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма



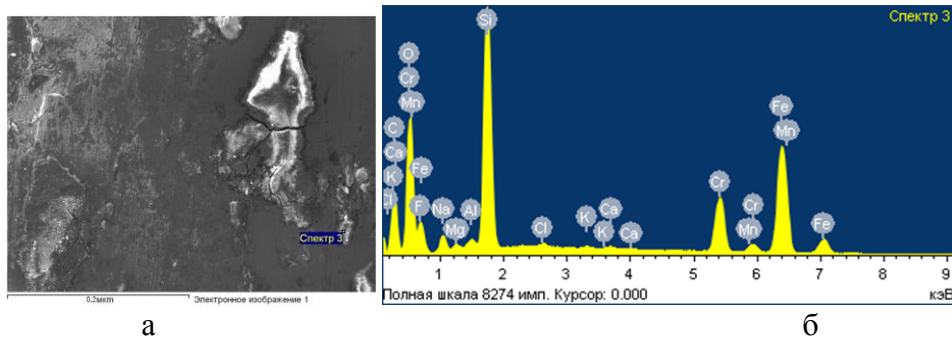


Рис. Б.32 – Хімічний аналіз поверхні тертя чавуну ЧХ32 при рН8 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

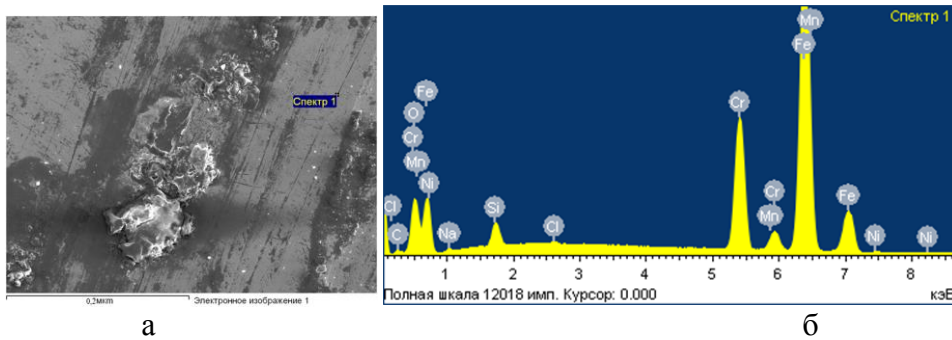


Рис. Б.33 – Хімічний аналіз поверхні тертя підібраної сталі 95X18 при рН11 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

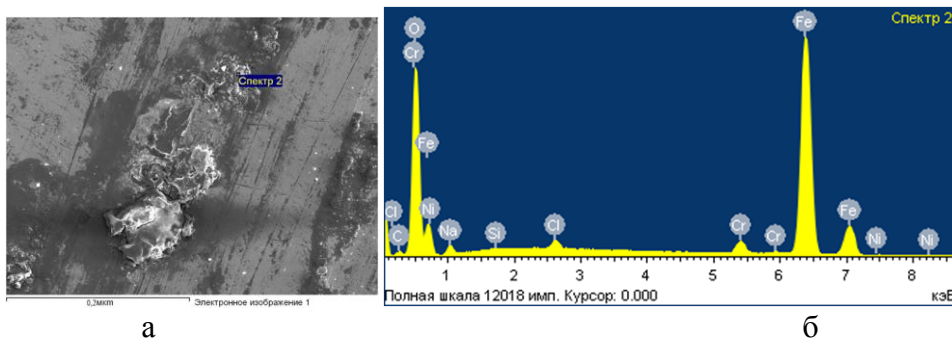


Рис. Б.34 – Хімічний аналіз поверхні тертя підібраної сталі 95X18 при рН11 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

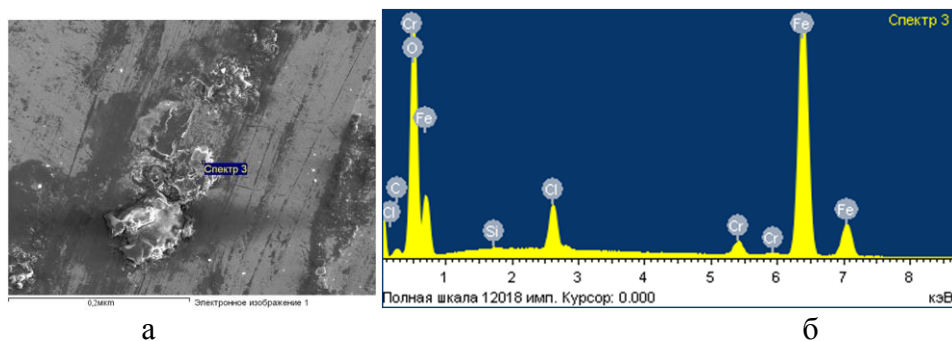


Рис. Б.35 – Хімічний аналіз поверхні тертя підібраної сталі 95X18 при рН11 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

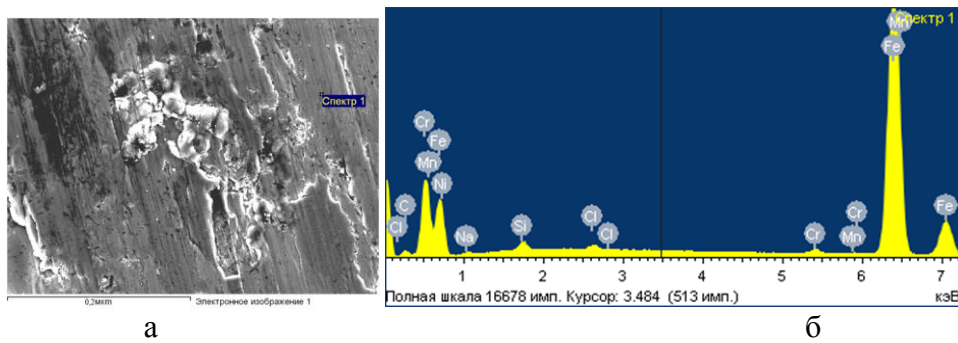


Рис. Б.36 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН11 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

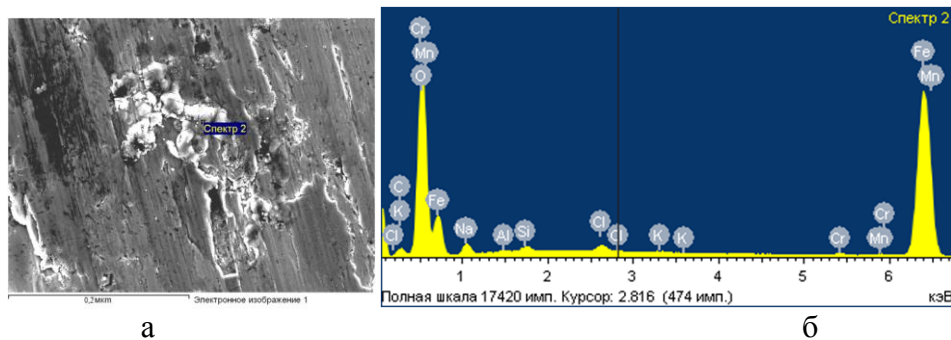


Рис. Б.37 – Хімічний аналіз поверхні тертя базової сталі 40X при рН11 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

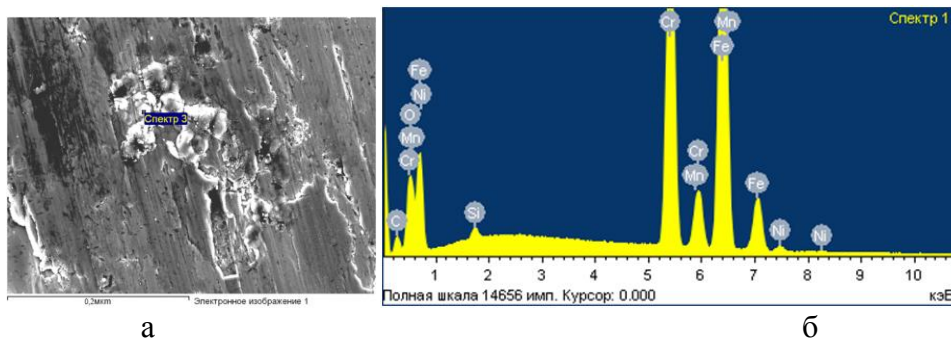


Рис. Б.38 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН11 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

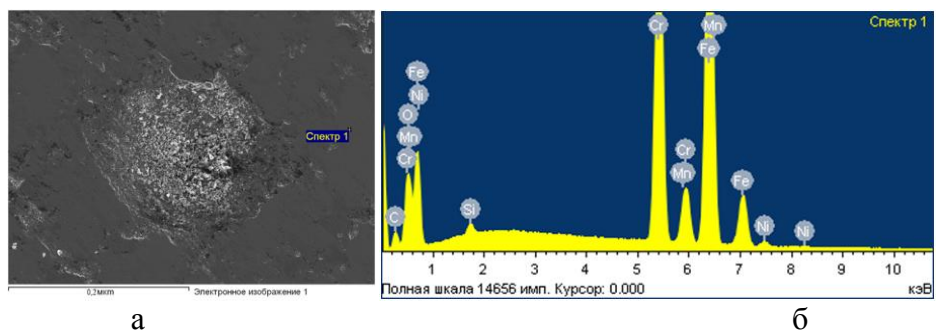


Рис. Б.39 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН11 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

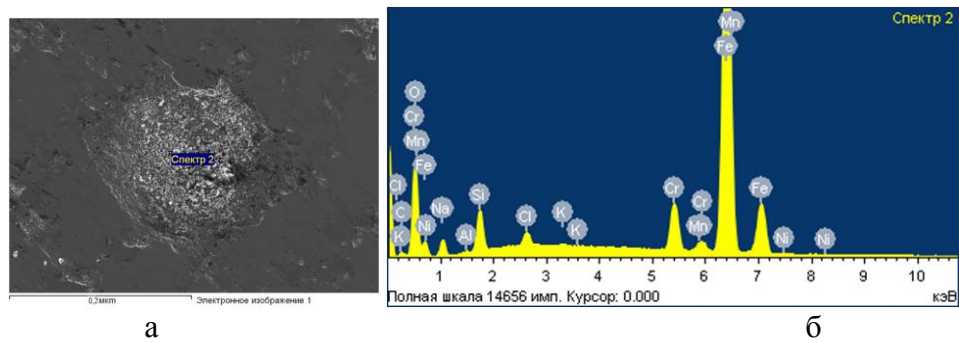


Рис. Б.40 – Хімічний аналіз поверхні тертя базового чавуну ЧХ22Н2 при рН11 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

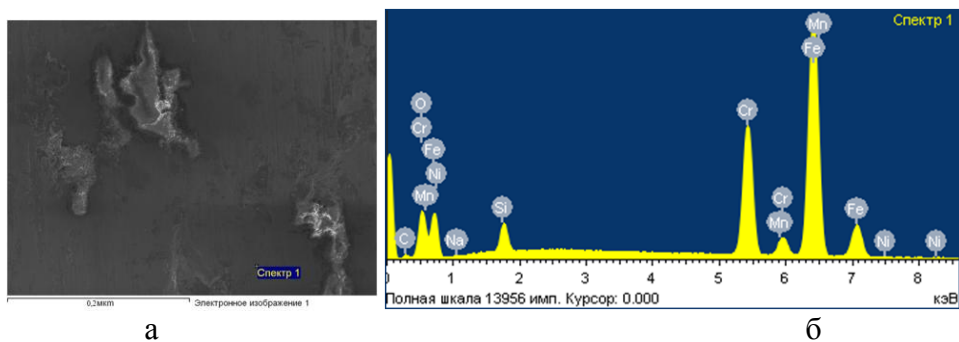


Рис. Б.41 – Хімічний аналіз поверхні тертя чавуну ЧХ32 при рН11 та абразивності 10 % спектр 1: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

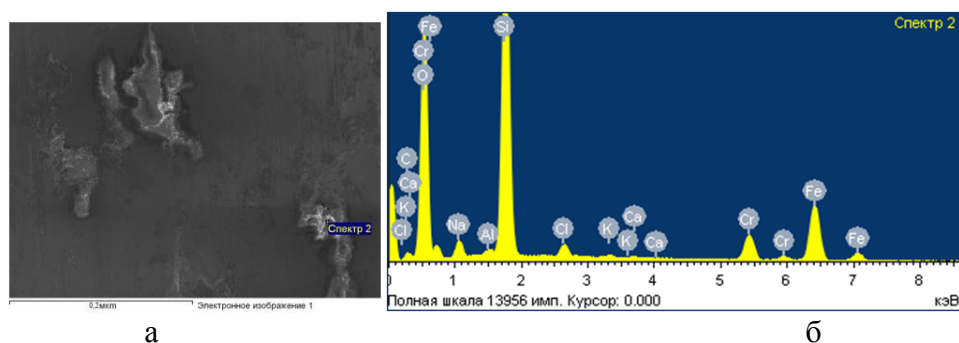


Рис. Б.42 – Хімічний аналіз поверхні тертя чавуну ЧХ32 при рН11 та абразивності 10 % спектр 2: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

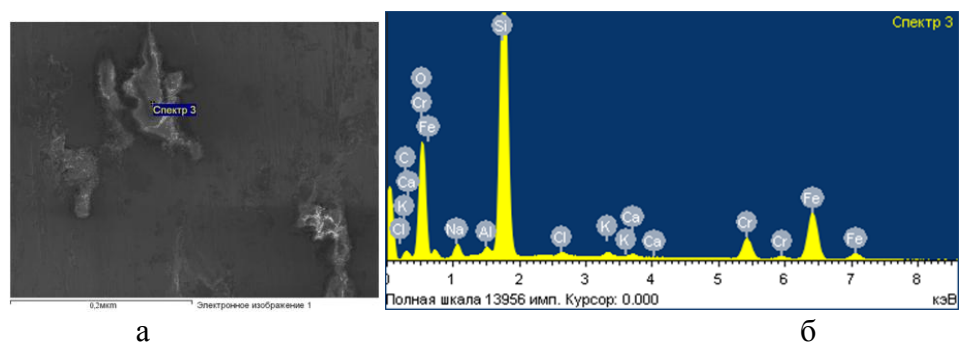


Рис. Б.43 – Хімічний аналіз поверхні тертя чавуну ЧХ32 при рН11 та абразивності 10 % спектр 3: а – мікрофотографія поверхні тертя при збільшенні 0,2 мкм; б – металографічна діаграма

### Рекомендації при експлуатації екструдерів з використанням сировини з слаболужним середовищем, близьким до нейтрального

Виходячи з приведених досліджень, можливо дати наступні рекомендації щодо зменшення абразивно-корозійного зношування робочих деталей екструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М шляхом використання присадки водного розчину луги, гідроксиду натрію. Тверде паливо можливо отримати шляхом очищення рослинної сировини від мінеральних домішок, її подрібнення, висушування, змішування з гідроксидом натрію та пресування. Перед пресуванням визначається вміст мінеральних домішок, кислотність сировини та виконується її розкиснення за рахунок додавання гідроксиду натрію, маса якого визначається за залежністю:

$$m_{\text{луги}} = \frac{(V_T - V_x) * v * p * M * V_d}{m_b * k * V_e}, \text{ кг/т}, \quad (\text{В.1})$$

де  $V_m$  – об'єм розчину гідроксиду натрію з концентрацією 0,01 моль/дм<sup>3</sup>, використаного на титрування, см<sup>3</sup>;

$V_x$  – об'єм розчину гідроксиду натрію з концентрацією 0,1 моль/дм<sup>3</sup>, використаного у холостому досліді, см<sup>3</sup>;

$p$  – коефіцієнт перерахунку 0,01 нормального розчину гідроксиду натрію;

$m_b$  – маса наважки рослинної сировини, г;

$k$  – коефіцієнт перерахунку на суху сировину;

$V_d$  – об'єм води, використаної для приготування екстракту, мл;

$V_e$  – об'єм екстракту, взятого для титрування, мл;

$v$  – молярна концентрація гідроксиду натрію, моль/л;

$M$  – молярна маса гідроксиду натрію, г/моль.

Запропонований спосіб отримання твердого біопалива з рослинної сировини реалізується наступним чином. Рослину сировину очищують від мінеральних домішок, потім її подрібнюють, висушують до вологості не більше 8–10 %, змішують з гідроксидом натрію. Далі визначається кислотність очищеної рослинної сировини підготовленої до пресування. Якщо кислотність становить рН < 7, то необхідно виконувати розкиснення. Розкиснення пропонується виконувати за рахунок додавання гідроксиду натрію, маса якого визначається за наведеною вище залежністю.

Для того, щоб визначити активну і загальну кислотність та масу гідроксиду натрію для нейтралізації кислот в одній тонні сировини, необхідно відібрати проби по 500 г в різних місцях партії в розмірі 1 %, але не менше 3 та не більше 8 пакувальних одиниць.

Необхідно взяти 30 мл 0,01 нормального розчину гідроксиду натрію, 0,01 нормального та помістити в хімічний стакан об'ємом 50 мл, опустити в

розчин електродну пару, постійно перемішувати магнітною мішалкою та вимірювати рН розчину.

Коефіцієнт перерахунку 0,01 нормального розчину гідроксиду натрію розраховується за формулою:

$$p = \frac{10^{-(14-pH)}}{k}, \quad (\text{В.2})$$

де  $10^{-(14-pH)}$  – визначена концентрація розчину гідроксиду натрію, яка є точною, моль/л;

$pH$  – активна кислотність 0,01 нормального розчину гідроксиду натрію;

$k$  – концентрація розчину гідроксиду натрію, яка задається, моль/л.

Для того, щоб визначити коефіцієнт перерахунку на суху сировину необхідно визначити вологість сировини, яка визначається сушінням з постійним перемішуванням в електричній шафі за температури 105 °С та наважки масою 5 г в бюксі та розраховується за формулою:

$$X = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100, \quad (\text{В.3})$$

де  $m_1$  – маса бюкси, г;

$m_2$  – маса бюкси з наважкою до сушіння, г;

$m_3$  – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Коефіцієнт перерахунку на суху сировину визначається за формулою:

$$k = \frac{(100-X)}{100}, \quad (\text{В.4})$$

де  $X$  – визначена вологість сировини, %.

Середню пробу досліджуваної сировини необхідно ретельно перемішати та відібрати 100 г, які подрібнити на лабораторному млині. Наважку подрібненої сировини масою 5 г необхідно всипати в конічну колбу місткістю 500 мл та додати частину дистильованої води об'ємом 250 мл.

Отриману суміш треба обережно перемішати, а воду, яка залишилась, використати для змивання частинок сировини зі стінок колби. Конічну колбу з отриманою суспензією підключити до зворотного холодильника та нагріти до кипіння на електричній плитці з закритою спіраллю, постійно збовтувати та витримати протягом 1 години.

Після цього примусово колбу необхідно охолодити до температури  $20 \pm 2$  °С та надати можливість відстоятися. Взяти фільтр, який попередньо промити дистильованою водою, та профільтрувати суміш крізь воронку з фі-

льтром. Відміряти та 200 мл фільтрату перенести в хімічний стакан місткістю 400 мл.

Для того щоб визначити загальну та активну кислотність сировини, необхідно у склянку з екстрактом опустити електроди рН-метра, визначити активну кислотність рН та за допомогою бюретки титрувати розчином гідроксиду натрію з 0,01 нормальністю.

Графічним методом Туббса визначити точку еквівалентності, яка є переходом з слабокислого середовища в слаболужне середовище. В екстракт за допомогою бюретки необхідно порціями приливати по 0,1 мл 0,01 нормального розчину гідроксиду натрію до рН10 та побудувати точку еквівалентності, відкладаючи на вісі абсцис кількість витраченої луги, а на вісі ординат – відповідне значення рН [148]. Аналогічно необхідно провести холостий дослід з дистильованою водою.

Загальна кислотність рослинної сировини для виробництва твердого палива з рослинної сировини визначається за формулою:

$$K = \frac{(V_T - V_X) \cdot \nu \cdot p \cdot M \cdot V_D}{m_b \cdot k \cdot V_e}, \text{ мг/г}, \quad (\text{B.5})$$

де  $V_m$  – об'єм розчину гідроксиду натрію з концентрацією 0,01 моль/дм<sup>3</sup>, використаного на титрування, см<sup>3</sup>;

$V_x$  – об'єм розчину гідроксиду натрію з концентрацією 0,1 моль/дм<sup>3</sup>, використаного в холостому досліді, см<sup>3</sup>;

$p$  – коефіцієнт перерахунку 0,01 нормального розчину гідроксиду натрію;

$m_b$  – маса наважки рослинної сировини, г;

$k$  – коефіцієнт перерахунку на суху сировину;

$V_D$  – об'єм води, використаної для приготування екстракту, мл;

$V_e$  – об'єм екстракту, взятого для титрування, мл;

$\nu$  – молярна концентрація гідроксиду натрію, моль/л;

$M$  – молярна маса гідроксиду натрію, г/моль.

За результат прийняти середнє арифметичне значення результатів двох паралельних випробувань, абсолютна різниця між якими не перевищує 0,02 мг NaOH/г. Результат випробування округлити до третього десяткового знаку. Визначену масу гідроксиду натрію перемішують з подрібненою рослинною сировиною та пресують в брикети Pini-Kau.

Отримане таким чином тверде біопаливо має нейтральну кислотність і, тим самим, не викликає абразивно-корозійного зношування як екструдера, так і паливного котла, що підвищує термін їх служби і, у цілому, використання твердого біопалива.

**Наукове видання**

**Цимбал Богдан Михайлович**  
**Войтов Віктор Анатолійович**  
**Артем'єв Сергій Робленович**  
**Малько Олександр Дмитрович**  
**Шароватова Олена Павлівна**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОНАННЯ ЗАХОДІВ  
З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС  
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ШНЕКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ**

**Монографія**

Підписано до друку 22.11.18. Формат 60x84/16.  
Папір 80 г/м<sup>2</sup>. Ум. друк. арк. 11,5.  
Тираж 500 прим. Вид. № 65/18. Обл. вид арк. 6,8.  
Сектор редакційно-видавничої діяльності  
Національного університету цивільного захисту України  
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94  
[www.nuczu.edu.ua](http://www.nuczu.edu.ua)