

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри  
канд. техн. наук, доц.

\_\_\_\_\_ О. В. Попов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**  
**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ**  
**«МАГІСТР»**

**Тема: «Дослідження надійності вузлів тертя при використанні мастильних матеріалів з присадками»**

**Виконав:** \_\_\_\_\_ **Г. Л. Сухих**

**Керівник: д-р техн. наук, проф.** \_\_\_\_\_ **О. І. Духота**

**Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:**

**охорона праці: канд. техн. наук, доц.** \_\_\_\_\_ **О.М. Гунченко**

**охорона навколишнього**

**середовища: канд.техн.наук, доцент** \_\_\_\_\_ **Є.О. Бовсуновський**

**Нормоконтролер:** \_\_\_\_\_

**Київ 2021**

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Аерокосмічний факультет

Кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден

Освітній ступень «Магістр»

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»

Освітньо-професійна програма «Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

канд. техн. наук, доц.

\_\_\_\_\_ О. В. Попов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

## **ЗАВДАННЯ**

**на виконання кваліфікаційної роботи  
СУХИХ ГЕОРГІЯ ЛЕОНІДОВИЧА**

1. Тема роботи: «Дослідження надійності вузлів тертя при використанні мастильних матеріалів з присадками» затверджено наказом ректора від 11 жовтня 2021 року № 2197/ст.

2. Термін виконання роботи: з 25 жовтня 2021 року по 31 грудня 2020 року.  
Вихідні дані до роботи: статистичні дані за результатами досвіду використання пластичих мастильних матеріалів, пошкодження, які можуть виникати при використанні неякісних мастильних матеріалів, або неправильнопідбраного матеріалу.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз досвіду використання мастильних матеріалів в авіаційній техніці, аналіз методів покращення триботехнічних характеристик мастильних матеріалів, вплив присадок на мастильну протизносні характеристики мастил і матеріалів трибоспряження, розробка алгоритму дослідження властивостей мастильних матеріалів із додаванням присадок, дослідженні впливу додавання присадок в мастило, розробка заходів з охорони праці та навколишнього середовища.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:

---

---

---

Графічний (ілюстративний) матеріал виконано за допомогою Microsoft Office Excel, Power Point, та AutoCad та представлено у вигляді презентацій.

## 6. Календарний план–графік

Завдання	Строк виконання	Відмітка про виконання
Аналіз існуючих методів діагностування технічного стану елементів конструкції повітряних суден, що виготовлені із полімерних композиційних матеріалів	05.10 – 23.10.2021 р.	
Аналіз полімерних композиційних матеріалів та їх дефектів, що використовуються в авіаційній техніці Постановка задач дослідження	24.10 – 31.10.2021 р.	
Вибір методики діагностування технічного стану полімерних композиційних матеріалів	20.10 – 01.11.2021 р.	
Розробка плану експериментів дослідження змащувальних процесів	02.11 – 04.11.2021 р.	
Проведення досліджень та аналіз отриманих результатів	05.11 – 21.11.2021 р.	
Розробка рекомендацій щодо підвищення експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів	22.11 – 13.12.2021 р.	
Виконання окремих розділів роботи : охорона праці, охорона навколишнього середовища	17.10– 04.12.2021 р.	
Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу	25.11– 13.12.2021 р.	
Попередній захист дипломної роботи	14.12– 18.12.2021 р.	

## 7. Консультанти по окремих розділах

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Канд. техн. наук, доцент Гунченко О.М.		
Охорона навколишнього середовища	Канд. техн. наук, доцент Бовсуновський Є.О.		

8. Дата видачі завдання: « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 року.

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ О. І. Духота

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Г.Л. Сухих

# Реферат

Пояснювальна записка до дипломної роботи: «Дослідження надійності вузлів тертя при використанні мастильних матеріалів з присадками»:

100 с., 28 рис., 5 табл., 73 посил.

Об'єкт досліджень – надійність вузлів тертя авіаційної техніки.

Предмет досліджень – мастильні матеріали з присадками.

Мета дипломної роботи – є підвищення надійності вузлів тертя авіаційної техніки застосуванням мастильних матеріалів з присадками.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосовувалися методи математичної статистики, регресійного аналізу, метод штучних баз, об'ємний метод визначення зношування матеріалів, виконання стендових випробувань мастильних матеріалів, використання пенетрації для дослідження пластичних матеріалів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень підтверджено стендовими випробуваннями. Обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалася на ПЕОМ із використанням пакетів програм MathCAD, Excel.

Практичне значення роботи – Виявлено оптимальну концентрацію присадок у пластичних мастилах.

Проведені дослідження матеріалів із додаванням присадок на основі міді показали, що значне зниження коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування, а також підвищення якості поверхневого шару при використанні миристату міді до базової мастильної композиції.

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати в практичній діяльності авіаремонтних заводів і авіаційно-експлуатуючих підприємствах.

**МАСТИЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ, ПЛАСТИЧНІ МАСТИЛА,  
ЗНОШУВАННЯ, ПРИСАДКИ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, ПЕНЕТРАЦІЯ,  
ДОСЛІДЖЕННЯ**

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА ІНДЕКСІВ.....	8
ВСТУП .....	10
<b>1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ПЛАСТИЧНИХ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПАР ТЕРТЯ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Основи тертя та зношування у вузлах авіаційної техніки .....	13
1.2 Види мастильних матеріалів пар тертя машин і механізмів .....	18
1.3 Механізм антифрикційної дії мастильних матеріалів.....	24
1.4 Методи покращення триботехнічних характеристик мастильних матеріалів .....	27
1.5 Вплив існуючих присадок на властивості серійних мастильних матеріалів .....	33
1.6 Пластичні мастила .....	36
1.7 Додаткові функції мастильного матеріалу у вузлах тертя .....	40
Висновки до розділу 1 .....	42
<b><u>2</u> МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>43</b>
2.1 Випробування мастильних матеріалів .....	43
2.2 Вибір матеріалів для дослідження .....	45
2.3 Методика дослідження зносостійкості .....	45
2.4 Методика визначення реологічних характеристик одержаних мастильних матеріалів.....	52
2.5 Метод статистичної обробки даних .....	53
Висновки до розділу 2 .....	55
<b><u>3</u> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАСТИЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙ .....</b>	<b>56</b>
3.1 Дослідження впливу додавання мідних солей на антифрикційні характеристики вибраного мастильного матеріалу .....	56

3.2 Дослідження впливу додавання мідних солей на реологічні характеристики мастила Циатим 201.....	59
3.3 Дослідження впливу додавання присадок на основі міді на протизношувальні характеристики мастильного матеріалу .....	61
Висновки до розділу 3 .....	65
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....</b>	<b>66</b>
4.1. Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	66
4.1.1. Аналіз параметрів мікроклімату.....	66
4.1.2. Аналіз природного та штучного освітлення .....	68
4.1.3. Аналіз шуму та вібрації.....	71
4.2. Розробка заходів з поліпшення умов праці .....	74
4.2.1. Розробка заходів з нормалізації параметрів шуму .....	74
4.3. Пожежна безпека.....	76
Висновки до розділу 4 .....	83
<b>5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА .....</b>	<b>84</b>
5.1 Екологічна безпека для навколишнього середовища.....	84
5.2 Основні тенденції утилізації відпрацьованих мастильних матеріалів .....	87
Висновки до розділу 5 .....	96
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>97</b>
<b>СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>99</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА ІНДЕКСІВ**

CCD	- Charge-coupled device;
ICAO	- International Civil Aviation Organization;
ККМ	- керамічні композиційні матеріали;
КМ	- композиційні матеріали;
ЛА	- літальний апарат;
ЛКП	- лакофарбове покриття;
МКМ	- металеві композиційні матеріали;





## ВСТУП

Підвищення ефективності виробництва є найважливішою складовою частиною економічної стратегії країни.

Ефективність ведення авіаційного виробництва визначається в основному економічними показниками, до числа яких належить собівартість продукції. Собівартість авіаційної техніки, багато в чому залежить від надійності технічних засобів і витрат на їх обслуговування і ремонт.

Відповідно до ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. терміни та визначення» надійність – властивість готовності, що впливають на нього властивості безвідмовності і ремонтпридатності, і підтримка технічного обслуговування.

Таким чином, надійність є комплексним властивістю визначає ефективність і безпеку використання авіаційної техніки.

У загальному обсязі робіт по виробництву авіаційної продукції трудомісткість робіт по утриманню та експлуатації авіаційної техніки становить близько 30-35 %.

Дослідження надійності окремих агрегатів, вузлів і деталей авіаційної техніки є актуальним завданням на сучасному етапі.

Надійність техніки багато в чому визначається надійністю і довговічністю вузлів тертя машин. Тривалий термін служби вузлів тертя залежить від триботехнічних характеристик застосовуваних мастильних матеріалів.

Одним із шляхів, що дозволяють підвищити надійність елементів пар тертя авіаційної техніки та обладнання, є створення ефективних мастильних матеріалів, що дозволяють забезпечувати гідродинамічний режим змащування при змінних умовах експлуатації.

Відповідно до ДСТУ 2823-94. «Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення» однією з основних властивостей мастильного матеріалу є його мастильна здатність, яка визначає

властивість матеріалу знижувати знос і силу тертя незалежно від його в'язкості.

Для підвищення мастильної здатності застосовуваних мастильних матеріалів застосовуються різноманітні присадки і наповнювачі.

При цьому згідно з ДСТУ 7787:2015 «Забезпечення зносостійкості виробів. Метод випробовування матеріалів на зношування під час фретингу та фретинг-корозії» випробування на зносостійкість слід проводити для вирішення однієї або декількох завдань: отримання триботехнічних характеристик конструкційних і мастильних матеріалів, необхідних для обґрунтованого вибору матеріалів і мастил при проектуванні вузлів тертя; завдання оцінки надійності і безпеки вузлів тертя і їх елементів за параметрами зносостійкості.

Підтвердження зносостійкості допускається проводити в рамках робіт з підтвердження надійності або безпеки виробу. А підтвердження зносостійкості на стадіях науково-дослідних робіт проводиться з метою обґрунтування вибору оптимального варіанта оливи і мастильних матеріалів.

Таким чином, зносостійкість є елементом надійності і, відповідно, підвищення зносостійкості вузлів тертя авіаційної техніки при наявності мастильних матеріалів з присадками дозволяє досліджувати і підвищувати їх надійність. Одними з перспективних матеріалів, що дозволяють по новому вирішувати питання підвищення ефективності мастильних матеріалів, є рідкокристалічні з'єднання.

В даний час рідкі кристали широко використовуються при створенні моніторів, оптичних приладів, в медицині, авіаційному виробництві, хімічній промисловості і т.д.

Є дані про застосування рідкокристалічних сполук і в машинобудуванні, а також авіаційної техніки в якості добавок до мастильних матеріалів і мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ.

З огляду на анізотропію своїх властивостей в рідкокристалічному стані дані матеріали дозволяють поліпшувати основні триботехнічні характеристики як рідких, так і пластичних мастильних матеріалів.

Одними з рідкокристалічних сполук, які є перспективними для поліпшення триботехнічних характеристик мастильних матеріалів є присадки на основі міді (карбоксилати). Однак відсутність в даний час систематичних досліджень триботехнічних властивостей даних хімічних сполук при введенні їх в пластичні мастильні матеріали робить це завдання актуальною і важливою.

### **Актуальність роботи**

Підвищення ефективності виробництва є найважливішою складовою економічного розвитку країни.

Дослідження надійності окремих агрегатів, вузлів та деталей авіаційної техніки є актуальним завданням на сучасному етапі розвитку авіаційної промисловості.

Надійність техніки багато в чому визначається надійністю та довговічністю вузлів тертя машин. Тривалий термін служби вузлів тертя багато в чому залежить від триботехнічних характеристик мастильних матеріалів.

Одним із шляхів, що дозволяють підвищити надійність елементів пар тертя авіаційної техніки та обладнання, є створення ефективних мастильних матеріалів, що дозволяють забезпечувати гідродинамічний режим мащення за заданих умов експлуатації.

Таким чином, зносостійкість є елементом надійності і, відповідно, підвищення зносостійкості вузлів тертя авіаційної техніки за наявності мастильних матеріалів з присадками дозволяє досліджувати та підвищувати їхню надійність. Одними з перспективних матеріалів, що дозволяють по новому вирішувати питання підвищення ефективності мастильних матеріалів, є рідкокристалічні сполуки.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ПЛАСТИЧНИХ

### МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ

### ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПАР ТЕРТЯ

#### 1.1 Основи тертя та зношування у вузлах авіаційної техніки

Ресурсозберігаючі технології на сучасному етапі передбачають широке використання різних нанотехнологій. Основними областями застосування нанотехнологій в авіатехнічному комплексі є забезпечення надійності техніки і підтримання належного технічного обслуговування і інші напрямки.

Застосування сучасних наноматеріалів може істотно підвищити ресурс деталей машин і механізмів, знизити експлуатаційні витрати, поліпшити екологічні показники.

Робота всіх машин і механізмів заснована на відносному переміщенні спряжених поверхонь, що супроводжується їх тертям і зносом.

При терті одночасно відбуваються механічні, електричні, теплові, вібраційні і хімічні процеси.

Тертя може зміцнити або роззміцнити метал. При цьому тертя є самоорганізуючим процесом, при якому з певною послідовністю відбуваються явища, спрямовані на руйнування поверхні або ж, навпаки, на створення цілої серії систем, що знижують знос і тертя.

З тертям пов'язаний один з основних негативних процесів в роботі будь-якого механізму – зношування елементів.

Як зазначає ряд авторів, більшість машин (85 – 90 %) виходять з ладу через зношення деталей. Тому проблема тертя і зношування є однією з найбільш загальних і важливих, тих, що визначають в значній мірі розвиток і прогрес більшості галузей техніки.

Знос деталей робить вирішальний вплив на довговічність і експлуатаційну надійність машин. Збільшення зазору в сполученнях внаслідок

зносу часто супроводжується зниженням коефіцієнта корисної дії, виникненням ударних навантажень, збільшенням втрат на тертя і інтенсивності зношування сполучених деталей .

Розкриттю механізму і основних закономірностей тертя і зношування присвячені дослідження багатьох вчених, серед яких фундаментальне значення мають роботи Н.Є. Жуковського, Е.А. Чудакова, М.М. Хрущова, В.Д. Кузнєцова, П.А. Ребиндера, І.В. Крагельського, А.С. Ахматова, В.А. Білого, Ф. Боудена, Д. Тейбора, С. Баходур, Д. Баклі, Г. Польцер, Д.Н. Гаркунова, Н.Б. Демкина, Б.І. Костецького та ін.

Крагельський І.В. відзначає, що взаємодія твердих тіл являє собою складне явище, що складається з чотирьох груп процесів:

- 1) механічних (пружна і пластична деформація, коливання);
- 2) молекулярно-фізичних (дифузія, адсорбція, контактна плавлення, нагрівання);
- 3) механо-хімічних (хемосорбція на поверхнях, розпад і утворення хімічних і високомолекулярних сполук в оливі);
- 4) електричних, електрокінетичних, електрохімічних та інших в результаті Е.Р.С., електромагнітної індукції, гальванічної електрики.

В даний час найбільш розвиненою і фізично обґрунтованою вважається молекулярно-механічна теорія тертя, яка виходить з того, що контакт двох дискретних поверхонь здійснюється за окремими макрощинами, сумарна площа яких становить площу фактичного контакту. Згідно молекулярно-механічної теорії тертя, сила тертя розглядається як сума двох складових: сили, зумовленої молекулярною (адгезійною) взаємодією поверхонь, і сили, що виникає в результаті деформування поверхонь (механічна складова).

Залежно від відносної глибини розповсюдження макронерівностей і співвідношення між силами адгезії і когезії на плямах фактичного контакту є такі види фрикційних зв'язків: пружне деформування поверхонь; пластичне відтиснення матеріалу; мікрорізання або зріз нерівності, якщо вона недостатньо міцна; захоплення плівок, що покривають нерівності, і їх

руйнування (адгезійний відрив); захоплення поверхонь, що супроводжується глибинним вириванням матеріалу (когезійний відрив).

Таким чином, коефіцієнт тертя згідно молекулярно-механічної теорії тертя можна виразити наступною залежністю:

$$f = \left( \frac{\tau}{p_r} + \beta \right) + \left( k \times \sqrt{h/R} \right), \quad (1.1)$$

де  $\tau$  – тангенціальна міцність адгезійного зв'язку, що виникає на фактичній площі контакту;

$p_r$  – тиск на плямі фактичного контакту;

$\beta$  – коефіцієнт зміцнення адгезійного зв'язку;

$k$  – коефіцієнт, що характеризує механічну складову сили тертя;

$h$  – глибина впровадження мікронерівності при ковзанні;

$R$  – радіус заокруглення вершини мікронерівностей.

При цьому зношування розглядається як результат багаторазової деформації мікронерівностей, що призводять до руйнування і відділення частинки одиничного фрикційного зв'язку, і залежить від виду контакту (пружний або пластичний) і властивостей матеріалів.

Згідно кривої втоми Веллера, при пружному контакті число циклів навантаження до руйнування залежить від напруги на контакті і виражається наступним чином:

$$n = \left( \frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^{t_{\text{пр}}}, \quad (1.2)$$

де  $\sigma_0$  – константа, що має фізичний сенс міцності при одноразовому навантаженні;

$\sigma$  - діюче напруження на контакті;

$t_{\text{пр}}$  - коефіцієнт, що характеризує втомні властивості матеріалів.

Для пластичного контакту при визначенні числа циклів до руйнування мікронерівності використовують теорію малоциклової втоми, тобто:

$$n = \left( \frac{l_0}{l} \right)^{t_{\text{пл}}}, \quad (1.3)$$

де  $l_0$  – відносне подовження, відповідне руйнування при одноразовому навантаженні;

$l$  – відносне подовження, при якому руйнування відбувається через  $n$  циклів;

$t_{пл.}$  – коефіцієнт, що визначає втомні властивості матеріалів в умовах малоциклової пластичної деформації.

Відповідно до діючих стандартів розрізняють наступні види зношування: механічне, корозійно-механічне, абразивне, гідроерозійне (газоерозійне), гідроабразивне (газоабразивне), втомне, кавітаційне, при заїданні, окислювальне, при фретингу, при фретинг-корозії, електроерозійне.



Рисунок 1.1 – Види зношування

Абразивне зношування є однією з головних причин виходу з ладу як відкритих, так і закритих передач транспортної і авіаційної техніки, що працюють в агресивних середовищах. Інтенсивність абразивного зношування вивчена в роботах М.М. Хруцова, М.М. Тененбаума та інших дослідників.

У швидкохідних передачах і в передачах з підвищеним тертям на знос елементів впливає температура, що генерується в контакті. Знос пропорційний діючому навантаженню і шляху тертя, що пройшла точка на контактній поверхні [12].

Так як зношування різко зростає при переході від рідинного до граничного тертя, ще більше – при руйнуванні граничного шару, то великого значення набуває визначення меж таких переходів. В останньому випадку має місце інтенсивне зношування при заїданні і вихід з ладу вузла тертя. Перехід від одного режиму до іншого може мати місце при зменшенні мастильної плівки до критичної величини.

Руйнування мастильної плівки відбувається при певній температурі контакту (температурний критерій) або в результаті пластичної деформації металу поверхні (деформаційний критерій) [12].

Як результат, особливості тертя і зношування в значній мірі визначаються будовою приповерхневих шарів пари тертя і взаємодією їх з мастильним матеріалом.

Прискорене зношування призводить до зниження ресурсу елементів пар тертя. Втрата працездатності вузла настає при досягненні граничного зношування деталей, що труться. Для визначення граничних зносів потрібно керуватися трьома критеріями: технічним, функціональним і економічним.

Згідно з технічним критерієм граничного значення зносу відповідає: різке зростання інтенсивності зношування; зниження міцності деталі, що зношується; посилення впливу зносу на спряжених деталях та на працездатність інших деталей; самовимикання механізму при роботі.

Підставою для функціонального критерію є зміна якості функціонування механізму за рахунок зношування його деталей. Граничний знос за функціональним критерієм відповідає гранично допустимому відхиленню якості роботи від норми.



Економічним критерієм оптимального ресурсу вузла машини є найменші витрати на одиницю зношування при збереженні якості функціонування в заданих межах [6].

## **1.2 Види мастильних матеріалів пар тертя машин і механізмів**

Тривалість ресурсу деталей, що труться, забезпечується застосуванням зносостійких матеріалів самих деталей, а також застосуванням мастильних матеріалів. При експлуатації шар мастильного матеріалу розділяє поверхні тертя і перешкоджає безпосередньому контакту поверхні підшипника і валу.

В даний час існують різні теорії змащування. Найбільшого поширення набула гідродинамічна теорія мащення, відповідно до якої при обертанні валу тонкий шар мастильного матеріалу, пов'язаний з поверхнею, силами сорбції переміщується, захоплює за собою наступні шари і нагнітає їх в звужену частину клиновидного зазору між валом і підшипником. В результаті цього виникає гідродинамічний тиск в шарі мастильного матеріалу, яке забезпечує поділ поверхні валу і підшипника. Тертя між поверхнями замінюється внутрішнім тертям в шарах мастильного матеріалу. При цьому знос є мінімальним і з'являється внаслідок електростатичних розрядів, що виникають при терті між поверхнями.

Розвиток гідродинамічного режиму в значній мірі визначається в'язкістю мастильного матеріалу.

Більш повно враховує умови експлуатації контактно-гідродинамічна теорія мащення. Вона побудована на врахуванні пластичної деформації металу в парі тертя і збільшенні в'язкості масла під впливом високих контактних тисків.

При цьому враховується не тільки залежність в'язкості мастильного матеріалу від тиску і температури, але і деформованість поверхонь тертя.

Таким чином, застосовувані мастильні матеріали повинні відповідати наступним вимогам:

- зберігати працездатність в широкому діапазоні температур, тиску і швидкостей;

- легко заповнювати западини і мікронерівності на робочих поверхнях;
- створювати якомога більший опір зрушенню в перпендикулярному і менше - в дотичному напрямку до поверхонь тертя;
- не викликати вибухів і пожеж;
- не чинити шкідливого впливу на матеріали, з яких виготовлені деталі машин;
- забезпечувати змащення при мінімальній витраті мастильних матеріалів;
- не змінювати властивостей при зберіганні і транспортуванні;
- не утворювати шкідливих і небезпечних відкладень;
- бути стійкими до радіоактивного опромінення або хімічно агресивних середовищ;
- не спінюватися і не утворювати емульсій.

Відповідно до ДСТУ 2823-94 розрізняють наступні види мащення (табл. 1.1) [5]: газове (мащення, при якому поділ поверхонь тертя деталей здійснюється газовим мастильним матеріалом); рідинне (мащення, при якому повне розділення поверхонь тертя деталей здійснюється рідким мастильним матеріалом); тверде (мащення, при якому поділ поверхонь тертя деталей, що знаходяться у відносному русі, здійснюється твердим мастильним матеріалом); гідродинамічне (газодинамічне) (рідинне (газове) мастило, при якому повне розділення поверхонь тертя деталей здійснюється в результаті тиску, що виникає в шарі рідини (газу) при відносному русі поверхонь); гідростатичне (газостатичне) (рідинне (газове) мастило, при якому повне розділення поверхонь тертя деталей, що знаходяться у відносному русі або спокої, здійснюється в результаті надходження рідини (газу) в зазор між поверхнями тертя під зовнішнім тиском); еласто-гідродинамічне (мащення, при якому характеристики тертя і товщини плівки рідкого мастильного матеріалу між двома поверхнями, що знаходяться у відносному русі, визначаються пружними властивостями матеріалів тіл, а також реологічними властивостями останнього); граничне мащення (мащення при якому тертя і

знос між поверхнями, що знаходяться у відносному русі, визначаються властивостями поверхонь і властивостями мастильного матеріалу, відмінними від об'ємної в'язкості); напіврідинне (змішане) (мащення, при якому здійснюється частково як гідродинамічне, частково як граничне мащення).

Таблиця 1.1 – Класифікація мастильних матеріалів

Мастильні матеріали															
За агрегатним станом				За способом отримання					За цільовим призначенням						
Рідкі – оливи	Тверді – тверді мастила	Мазеподібні – пластичні мастила	Газоподібні – газові мастила	Нафтові	Синтетичні	Тваринні	Рослинні	Змішані	Моторні	Газотурбінні	Трансмійні	Індустріальні	Холодильні	Електроізоляційні	Спеціальні (компресорні, трансформаторні,

Речовини, які використовуються як мастильні матеріали, залежно від їх агрегатного стану поділяють на:

- рідкі – мастила;
- тверді – тверді мастила;
- мазеподібні – пластичні мастила;
- газоподібні – газові мастила.

За способом отримання мастильні матеріали поділяють:

- на нафтові;
- синтетичні;
- змішані.

До нафтових належать усі мастильні матеріали на нафтовій основі, до змішаних – такі, що містять нафтові й синтетичні компоненти.

Залежно від призначення розрізняють [6]:

- **моторні мастила**, що використовуються для поршневих ДВЗ;
- **газотурбінні мастила** – для мащення газотурбінних двигунів;

- **трансмійні мастила** – для мащення зубчастих передач різних типів та інших рухомих елементів машин і механізмів (шарнірів, рейкових передач тощо);
- **індустріальні мастила** – для мащення промислового обладнання і приладів;
- **спеціальні мастила** – використовуються у конкретних галузях машинобудування (компресорні, трансформаторні, холодильні тощо).

Властивості мастильних матеріалів мають максимально задовольняти вимогам, що висуваються під час їх експлуатації, а також під час зберігання і транспортування.

У загальному випадку до мастильних матеріалів висувають такі вимоги [7]:

- наявність **мастильних властивостей**, тобто поєднання антифрикційних, протизносних і протизадирних властивостей;
- **в'язкісно-температурні** і депресорні властивості, тобто мінімальна залежність в'язкості і інших фізичних показників від температури;
- **стабільність властивостей**, тобто здатність зберігати показники якості як при зберіганні, так і при роботі у двигунах за заданих експлуатаційних умов протягом якомога більшого часу експлуатації;
- **антикорозійні і консерваційні властивості**, тобто здатність захищати конструкційні матеріали від корозії;
- **мийно-диспергуючі і промивні властивості**, тобто здатність запобігати утворенню відкладень у двигуні;
- **здатність відводити тепло і продукти зносу** від деталей двигунів і ущільнювати зазори між поверхнями тертя;
- **мінімальна токсичність і пожежна безпека**;
- **висока економічна ефективність**.

Під впливом високої температури масла, збільшенні навантаження, полегшенні витікання мастильного матеріалу з вузла тертя, товщина мастильної плівки зменшується менше критичного значення, в результаті чого

тертя і зношування залежить не від об'ємної в'язкості, а від інших факторів. Такі плівки називаються граничними і тертя при таких плівках граничним.

Мастильна дія граничних плівок оцінюють олійністю, здатністю мастильного матеріалу забезпечувати зниження коефіцієнту тертя в умовах, коли дія плівки не визначається тільки в'язкістю.

Розрізняють плівки хімічного походження (хемосорбція) і фізичного (адсорбція) [7].

Плівки, хімічно зв'язані з поверхнями, видаляються з великими труднощами, їх видалення супроводжується пошкодженням приповерхневих шарів. З підвищенням температури хімічні плівки товщають і руйнуються лише при досягненні точки плавлення. Плівки, зв'язані з поверхнями фізично, тобто силами адсорбції, легко видаляються з поверхні при температурі десорбції (близько 373 – 423 К). Видалення граничних шарів фізичного походження не відбивається на стані поверхні тертя. Як ті, так і інші шари легко саморегенеруються.

Плівки хімічного походження утворені в результаті взаємодії поверхні тертя з киснем (надходить до поверхні тертя з атмосфери або з мастильного матеріалу), а також дії на поверхні тертя присадок у мастильному матеріалі.

До плівок хімічного походження відносяться також різні мила, що утворилися з вищих органічних кислот, що знаходяться в змащувальному матеріалі. Полярно-активні компоненти масла, що утворилися в процесі його застосування і знаходилися в свіжому мастильному матеріалі, створюють граничні шари, що пов'язані з поверхнею силами фізичної сорбції, головним чином силами Вен-дер-Ваальса.

Адсорбційні шари утворюються щільно розташованими полярно-активними вуглеводнями (рис. 1.2). Ланцюгові молекули спрямовані перпендикулярно поверхні і повернуті до неї полярними групами: COOH, OH і іншими. Молекули назовні повернені неполярними метильними групами CH<sub>3</sub>. Після формування одного шару і заповненні всіх активних центрів поверхні, полярні молекули, що залишилися, заповнюють другий і наступні

шари. В результаті мономолекулярний шар перетворюється в полімолекулярний. Описана орієнтація молекул на металевій підкладці (поверхні тертя) спонукає до такої ж орієнтації і неполярні сполуки. Над граничним шаром, молекули вуглеводнів розташовані хаотично. У цій області можливий вже гідродинамічний механізм мастильної дії. До полярних сполук, що здатні до описаної орієнтації, відносяться не тільки сполуки, що містять спирти і карбоксильні групи, а й різні смоли, ефіри, сірчисті з'єднання.

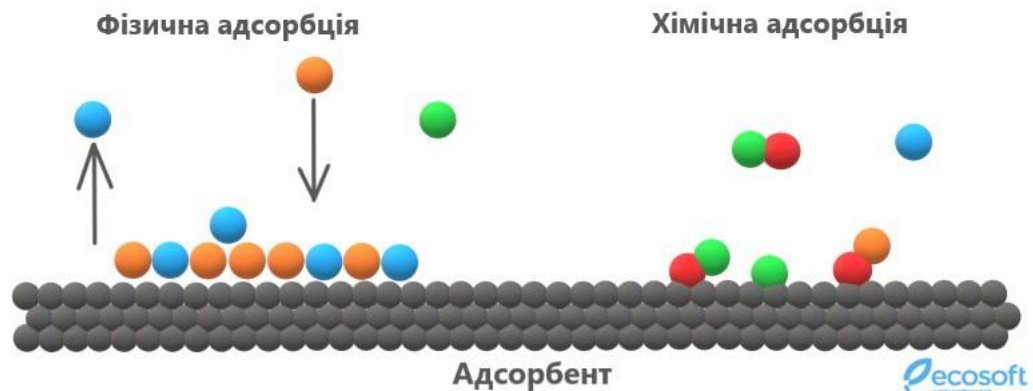


Рисунок 1.2 – Явище адсорбції мастильного матеріалу

Обидва види плівок забезпечують, насамперед, захист поверхні тертя. Вони перешкоджають взаємній адгезії поверхонь тертя. Ці плівки мають деяку міцність і стійкість, що дозволяє їм захищати поверхні тертя від механічних і теплових впливів. Мастильна дія визначається здатністю забезпечувати легке ковзання, вказує на те, що за фізичними і хімічними характеристиками ці плівки не рівноцінні.

Окисні (хімічні) плівки забезпечують, як правило, менший опір на зсув, ніж основний метал, тому при окисленні поверхонь, сила тертя знижується (мається на увазі тертя за відсутності мастила). Основна позитивна роль окисних плівок – попередження схоплювання, яке легко настає при торканні ювенільних поверхонь. З цієї точки зору швидкість регенерації окисних плівок після їх зношування має особливо велике значення.

При наявності граничних шарів вуглеводнів мастильного матеріалу, коефіцієнт тертя значно менший, ніж при роботі пари тертя за відсутності мастильного матеріалу. Це можна пояснити, перш за все, легкістю ковзання

орієнтованих шарів уздовж неполярних груп вуглеводнів. При збільшенні довжини ланцюга, молекули набувають здатність до нахилів і вигину, в результаті чого досягається деконцентрація контактних навантажень на поверхневих шарах. Властивості таких плівок в значній мірі залежать від властивостей металевої підкладки, від її суб- і мікромікрорельєфа.

Ці процеси пояснюються явищем адсорбційного пластифікування поверхневих шарів металевої поверхні, що сприяє зниженню сили тертя (ефект П. А. Ребіндера).

### **1.3 Механізм антифрикційної дії мастильних матеріалів**

Антифрикційна дія – це дія матеріалів, спрямована на зменшення тертя і зносу.

Механізм дії мастильного матеріалу полягає в поділі сполучених поверхонь деталей, що переміщуються щодо один одного, шаром мастила, товщина якої достатня для зменшення контакту мікровиступів поверхонь. Залежно від типу поділу поверхонь тертя виділяють наступні види змащування:

– Гідродинамічне масло – рідинне мастило, при використанні якого повне розділення поверхонь відбувається в результаті тиску, що виникає в шарі рідини при відносному русі цих поверхонь;

– Гидростатичене масло – рідинне мастило, при якому повне розділення поверхонь, що знаходяться у відносному русі або спокої, здійснюється рідиною, що надходить в зазор між цими поверхнями під зовнішнім тиском;

– Газодинамічне мастило – газове мастило, при використанні якого повне розділення поверхонь тертя, що знаходяться у відносному русі, визначається пружними властивостями матеріалів поверхонь тертя і мастильного матеріалу, а також реологічними властивостями останнього в зоні зіткнення поверхонь;

– Граничне масло – мастило, при використанні якого тертя визначається властивостями тонкого шару компонентів рідинного матеріалу, зумовленими взаємодіями матеріалу поверхонь тертя, мастильного матеріалу і середовища;

– Напіврідинне масло – мастило, при використанні якого рідкий мастильний матеріал, що передає навантаження, частково розділяє поверхні тертя деталей, що знаходяться у відносному русі.

Незалежно від типу поділу поверхонь, виду мастильного матеріалу, механізм антифрикційної дії представляється як сукупність дії кожного компонента мастильного матеріалу: масла, різноманітних присадок – речовин, що додаються в незначних кількостях в олії для поліпшення або додавання нових властивостей.

Мастильна дія мінерального масла з точки зору гідродинамічної і контактно-гідродинамічної теорій мастила пов'язана з його в'язкістю, яка повинна бути досить висока, трохи змінюючись при зміні навантаження і температури. Однак воно не забезпечує ефективної мастильної дії і вже при невисоких температурах від 20 до 40 °С спостерігається значне стрибкоподібне зростання коефіцієнта тертя, що свідчить про наявність безпосереднього металевих контакту поверхонь, що труться [1]. Тому зазвичай мінеральне масло не піддають високому ступеню очищення. У маслі залишаються технологічні домішки: смолисті речовини і органічні кислоти. Ці домішки називаються поверхнево-активними присадками, які розрізняються за характером їхньої взаємодії з поверхнею. Полярні групи цих речовин інтенсивно притягуються активними центрами на поверхні металу. При цьому бічні групи сусідніх молекул також взаємодіють одна з одною. На поверхні твердого тіла утворюється молекулярний "ворс". Мономолекулярний шар (рис. 1.3) мастила служить ніби продовженням твердого тіла, володіє міцністю і пружністю.

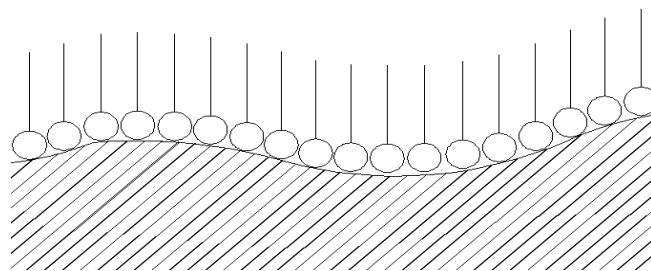


Рисунок 1.3 – Мономолекулярний шар ПАР на поверхні твердого тіла



В реальних умовах зазвичай виникають не мономолекулярні, а мультимолекулярні орієнтовані шари, в яких внутримолекулярне тертя набуває особливого характеру, який полягає в тому, що тертя відбувається між окремими шарами молекул, а не між окремими молекулами [1, 3, 4, 9, 10, 14, 15].

Різними поверхнево-активними присадками можуть бути різні мила жирних і нафтонових кислот, жирні аміни, амідни й інші солі органічних кислот. Введення таких речовин різко знижує коефіцієнт тертя і зрушує руйнування граничних шарів в область більш високих температур від 140 до 270 °С.

В сучасних важко-навантажених вузлах тертя: механізми–ресори, підвіски тракторів і гусеничних машин, відкриті шестеренні передачі, нарізні сполучення та ін. – потрібно хімічне модифікування поверхні за допомогою хімічно активних присадок.

Внаслідок фрикційного розігріву і впливу силового поля твердої фази молекули вступають в хімічну взаємодію з металом поверхні тертя, утворюючи модифіковані шари, що володіють зниженим опором і тому помітно знижують коефіцієнт тертя. Поділяючи поверхні тертя не тільки шаром ПАР, а й утвореним поверхневим з'єднанням, ці шари запобігають металевому контакту, і тим самим усувають адгезійний знос і заїдання.

При невисоких температурах до 200 °С хімічно активні присадки можуть забезпечити зниження тертя і зносу завдяки адсорбційному ефекту, а при температурах, що перевищують температуру розкладання присадки, завдяки утворенню хімічно модифікованих шарів.

Всіма цими властивостями володіють дисперсні системи нерозчинних в маслі твердих мастильних матеріалів:  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ , графіт,  $\text{BN}$ ,  $\text{MoSe}_2$ , де концентрація добавки не перевищує 10 %.

## **1.4 Методи покращення триботехнічних характеристик мастильних матеріалів**

Велика кількість вузлів і деталей авіаційної техніки експлуатуються в складних умовах, вони характеризуються високими навантаженнями, процесами абразивного зношування та впливом атмосферних факторів (вологи, пилу, агресивних хімічних сполук тощо) [14].

Забезпечення високого рівня працездатності та надійності авіаційної техніки – одна з необхідних умов ефективної експлуатації авіаційної техніки [15].

Підвищення терміну служби вузлів тертя та механізмів є найважливішим завданням машинобудування, вирішення якого дозволяє отримати економічний ефект за рахунок зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт, збільшення ресурсу деталей. Це має пряме відношення до машин, які експлуатуються у авіаційній промисловості [16].

З метою вдосконалення авіаційної техніки, важливе значення надається підвищенню надійності, зниженню питомої металоємності вузлів і агрегатів, економії палива та мастильних матеріалів.

Аналіз стану авіаційної техніки, що надходить у ремонт, вказує на те, що до 95 % деталей вибраковується через зношування [18].

Працездатність і ресурс авіаційної техніки значною мірою визначаються інтенсивністю зношування пар тертя. Через це явище щорічно простоює від 10 до 40 % літаків і вертольотів, що є причиною невиправдано великих витрат трудових та матеріальних ресурсів на технічне обслуговування та ремонт авіаційної техніки [18].

Швидке зношування техніки пояснюється низкою причин. Багато залежить від конструктивних недоліків, низьких показників її надійності [15].

Аналіз умов роботи літаків і вертольотів та іншої наземної техніки дозволив виявити основні фактори, що впливають на руйнування деталей, вузлів і агрегатів [15, 19]:

- абразивність та агресивність зовнішнього середовища, що передбачає наявність абразивних частинок на поверхнях деталей;
- вплив атмосферних опадів та навколишньої температури на утворення плівки вологи на поверхнях деталей;
- динамічні навантаження на матеріали деталей;
- початковий стан поверхонь: твердість, шорсткість тощо.

Окремі агрегати, компоненти, системи, деталі мають різний ресурс. В багатьох випадках ми можемо спостерігати усталений і неусталений режими зношування. Це залежить від початкових матеріалів, з яких були виготовлені деталі і компоненти, вплив навколишнього середовища, частоти заміни та характеру роботи конструктивних елементів, порушення регулювань і т.д.[15].

Одне з найпоширених видів зношування, що спостерігається серед деталей авіаційної техніки – корозійно-механічне зношування. Це руйнування деталей під дією сил тертя (механічне зношування) і корозійного процесу, що присутній в будь-якому навколишньому середовищі. [20].

Корозійно-механічне зношування характеризується руйнуванням металу під дією процесів, що відбуваються одночасно: електрохімічна або хімічна взаємодія металу з навколишнім середовищем і механічне руйнування продуктів цієї взаємодії і самого металу при терті [20].

Зношування відбувається внаслідок видалення та відділення окисленого металу – оксиди дрібних частинок. Пластична деформація металу, що супроводжує тертя, інтенсифікує його здатність до окислення. На поверхні металу практично миттєво утворюється тонкий шар оксиду завтовшки 10 – 15 Å. Утворення оксидів відбувається за рахунок хемосорбції атомів кисню з металевою поверхнею. Другий ступінь окислення супроводжується утворенням кристалічної фази оксидів. При цьому окислення відбувається за рахунок розташування атомів кисню в кристалічній решітці металу [20].

Надійність машин та їх складових частин значною мірою залежить від рівня вібрації, що виникає у процесі роботи. Дисбаланс (неврівноваженість) деталей, що швидко обертаються, і складальних одиниць є причиною

підвищеної вібрації. Вібрація характерна для наступних конструктивних елементів: маховиків, шківів, зубчастих коліс та інш.

Причинами невірноваженості деталей є похибки обробки деталей, нерівномірна щільність матеріалу, неправильне складання (зміщення, перекося тощо), появи деформацій та зносів у процесі експлуатації. Вібрація створює додаткові навантаження на деталі, у тому числі на підшипники, внаслідок чого процес зношування відбувається більш інтенсивно [15, 20].

Значна частина відмов авіаційної техніки має механічне походження – втрата міцності, зносостійкості тощо. За характером зміни параметрів, відмови поділяють на:

- поступові (параметричні) – наслідок повільної зміни одного чи кількох параметрів (знос або старіння елементів та/або всієї системи під впливом навантажень та інших чинників);
- раптові – результат стрибкоподібної зміни параметрів (крихке руйнування тощо) [20].

Низька зносостійкість деяких елементів трибоспряжень авіаційної техніки веде до невисоких показників надійності. За таких умов низьке напруження на відмову конструктивних елементів не дозволяє ефективно їх експлуатувати.

Підвищувати зносостійкість та надійність авіаційної техніки в даний час можна за рахунок застосування деталей машин, які виготовлені із зносостійких матеріалів, використовувати передові технологічні процеси підвищення міцності поверхонь деталей і компонентів авіацій техніки.

Безрозбірне відновлення – один із перспективних методів підвищення надійності авіаційної техніки.

Зважаючи на те, що ресурс авіаційної техніки багато в чому визначається ресурсом її трибоспряжень, одним із перспективних безрозбірних методів підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки є використання високоефективних мастильних матеріалів.

Зносостійкість у процесі експлуатації авіаційної техніки визначається насамперед якістю мастильних матеріалів, що використовуються при технічному обслуговуванні та ремонті [23, 24].

Досвід експлуатації та випробування вказують на те, що застосування якісних палив, гідравлічних та мастильних матеріалів значно збільшує надійність та довговічність техніки [21].

Участь мастильних матеріалів в трибосистемах необхідна, перш за все, для запобігання зношування, задиру і корозійного впливу навколишнього середовища на поверхні тертя. Як правило, пластичні мастильні матеріали краще виконують ці функції, ніж рідкі. Тому антифрикційні пластичні матеріали займають центральне місце серед інших груп мастильних матеріалів за обсягом та асортиментом виробництва [25].

Інколи пластичні мастильні матеріали, що використовуються в авіаційній техніці (ЦИАТИМ-201, ВНІНП-286 М (Ера), НК-50), не завжди в повній мірі задовольняють необхідним умовам роботи для забезпечення надійної роботи вузлів і агрегатів протягом усього періоду експлуатації. Особливо чутливі до якості мащення підшипники кочення. Цю проблему можливо вирішити шляхом застосування спеціальних добавок у мастильні матеріали. В даний час цей напрямок набув широкого поширення і є досить перспективним [26].

Аналіз видів пошкоджень та зношування поверхонь деталей і вузлів через різні навантаження вказує на недостатні антифрикційні та протизносні властивості застосованих мастильних матеріалів, тому є актуальним завдання щодо створення нових зносостійких консистентних мастил, що витримують великі питомі навантаження [27].

Автори роботи [28] також підтверджують, що підвищення терміну служби авіаційних трибоспрямлень за рахунок поліпшення протизносних властивостей мастил є актуальним завданням.

З метою підвищення ресурсу та надійності важко навантажених вузлів та деталей авіаційної техніки розробляються та застосовуються

високоєфективні мастильні матеріали на основі нанотехнологій. Важливе місце серед них займають консистентні мастила, що являють собою структуровані дисперсії загусників у мастилах. При звичайних температурах у більшості мильних консистентних мастил загусник диспергований у вигляді анізодіаметричних кристалічних частинок, що мають колоїдні розміри в одному або двох вимірах [14].

Для поліпшення експлуатаційних властивостей мастил та надання їм стабільних фізико-хімічних показників застосовують різні наповнювачі, присадки, добавки тощо [14].

Одним із методів підвищення довговічності трибосполучень за рахунок модифікування поверхонь тертя є застосування металоплакувальних мастил, до складу яких введені дисперсні феромагнетики. Практичне значення мають перехідні метали, а також деякі їх інтерметалічні сполуки, наприклад, залізо-нікель, залізо-кобальт, молібден.

Розділовий шар, що утворюється в зоні контакту і що перешкоджає взаємодії деталей пари тертя в таких мастилах, формує частинки металів або металовмісні з'єднання, заповнюючи мікронерівності поверхонь тертя і зменшуючи тим самим величину контактного тиску. В якості таких добавок використовують високодисперсні порошки цинку, бронзи, міді, свинцю та деякі інші з розміром частинок 10...100 мкм, солі монокарбонічних кислот з металами або металевий порошок – промисловий відхід електрохімічного процесу гальваніки (містить мідь), змішаний з олеїною кислотою. При формуванні мелалоплакуючої плівки в зоні контакту відбувається прискорення перенесення частинок з об'єму мастила, що забезпечує зниження зносу, моменту тертя та підвищення протизадірної стійкості вузлів тертя [29].

Підшипники ковзання найчастіше виходять з ладу за рахунок зношування та заїдання поверхні. Основної причиною цього є патологічні процеси тертя, що відбуваються при пуску та зупинці механізму. У такий період роботи в опорах валів спостерігаються найважчі умови тертя, що

зумовлено дуже малою дією гідродинамічного ефекту або повною його відсутністю [30].

Відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя, запропонованої І. В. Крагельським [31], в ході відносного ковзання поверхонь, що контактують, відбувається безперервне утворення та руйнування фрикційних зв'язків. Ці процеси, зумовлені міжмолекулярною взаємодією між тілами, що контактують в зонах фактичного дотику, і відображає сутність адгезійної складової зовнішнього тертя. Міцність фрикційних зв'язків залежить від величини дотичних напружень на межі поділу твердих тіл і визначається відношенням зсувного опору молекулярного зв'язку до межі витривалості основного матеріалу. Зниження міцності таких зв'язків сприяє нормальній роботі вузла тертя [32].

Робота деталей авіаційної техніки, в переважній більшості, відбувається в основному в режимі граничного тертя. Висока навантаженість механізмів авіаційної техніки в умовах підвищеного навантаження, вимагає більш інтенсивного формування та відновлення захисної плівки на поверхнях тертя [17].

Ефективним способом зниження зовнішнього тертя є локалізація деформації матеріалу в тонкому поверхневому шарі, так званої деформаційної зоні захисної плівки.

Для здійснення цієї локалізації необхідне дотримання правила позитивного градієнта, згідно з яким міцність молекулярних зв'язків повинна бути меншою за міцність нижчих шарів, тобто. [17]:

$$d\tau/dz > 0, \quad (1.4)$$

де  $\tau$  – опір матеріалі на зріз, Па;

$z$  – відстань від поверхні по нормалі до неї, м

Відповідно до молекулярно – механічної теорії І.В. Крагельського, сила тертя складається з деформаційної та адгезійної складових:

$$F_{тр} = F_{деф} + F_{ад} \quad (1.5)$$

Силу тертя, що виникає при деформуванні, визначають за формулою:

$$F_{\text{деф}} = W/i, \quad (1.6)$$

де  $W$  – робота деформованого матеріалу, Дж;  
 $i$  – переміщення, м.

Робота деформування матеріалу при переміщенні його на діаметр плями дотику дорівнює [17]:

$$W = V \times \sigma_{\tau}, \quad (1.6)$$

де  $V$  – деформований об'єм, м<sup>3</sup>;  
 $\sigma_{\tau}$  – середнє напруження в тангенціальному напрямку при зрізі, Па.  
 Адгезійна складова сили тертя дорівнює:

$$F_{\text{ад}} = \tau_{\text{зр}} \times A_{\text{зр}} \quad (1.7)$$

де  $\tau_{\text{зр}}$  – тангенціальне напруження, при якому відбувається зріз плівки, Па;  
 $A_{\text{зр}}$  – площа зрізу плівки, м<sup>2</sup>.

Таким чином, введення в мастильний матеріал добавок, наповнювачів та присадок, що дозволяють знижувати як деформаційну, так і адгезійну складову, дозволяє знижувати силу тертя та підвищувати зносостійкість деталей машин.

Створення ефективних протизносних та антифрикційних присадок та наповнювачів до пластичних мастильних матеріалів, що використовуються в авіаційній промисловості, є одним з перспективних шляхів підвищення працездатності трибоспряжень авіаційної техніки.

### **1.5 Вплив існуючих присадок на властивості серійних мастильних матеріалів**

Значний внесок у науку з дослідження мастильних матеріалів для підвищення експлуатаційних характеристик авіаційної техніки зробили вчені: С.М. Гайдар, Д.М. Гаркунов, М.В. Райко, С.В. Венцель, О.В. Карлашов, Р.Г. Мнацаканов, М. Ф. Дмитриченко, О.О. Мікосянчик та ін.

Дослідження електричних властивостей граничних мастильних шарів показали, що для останніх, типові нелінійні вольт-амперні характеристики



(ВАХ) та кулоновольтні характеристики гістерезисного типу, які характерні для сегнетоелектриків, що мають доменну структуру [7].

Таким чином, ефективність мастильних матеріалів, що полягає у здатності утворювати на поверхні тертя плівки хімічного та фізичного походження, багато в чому визначається наявністю в базовому мастильному матеріалі різних хімічних сполук – присадок.

Для рідких та пластичних мастильних матеріалів випускаються такі основні типи присадок: мийно-диспергуючі, інгібітори окиснення та корозії, в'язкі, депресорні, протизносні, протизадирні, протипінні та приробіткові.

За хімічним складом присадки можуть бути розділені на кілька груп: алкіл фенольні, сульфонатні, алкілсалицилатні, діалкілдітіофосфатні, полімерні та сукциніміди [7].

Для пластичних мастильних матеріалів найбільш характерно застосування антиокислювальних, протизносних та протизадирних присадок.

В основу дії антиокислювальних присадок покладено розривання окисних ланцюгів [7]. Дослідження Г. І. Шора зі співробітниками [34] показали, що процес окислення мастильного матеріалу пов'язаний з роботою виходу електронів металу на поверхні, яка у свою чергу безперервно змінюється внаслідок впливу на процес компонентів мастильного матеріалу та присадок.

Таким чином, присадки, що знижують роботу виходу електронів металевої поверхні, впливають на мастило як антиокислювачі. Негативні іони, що виникають у мастильному матеріалі внаслідок електричних взаємодій з металевою поверхнею тертя, гальмують окиснення вуглеводнів.

Противозадирні присадки діють наступним чином. Між компонентами присадки, що містить сірку, фосфор або хлор, і металом відбуваються хімічні реакції, в результаті чого в них утворюються продукти, що відрізняються за властивостями від поверхні тертя (менша твердість, низька температура плавлення). Хімічні реакції відбуваються насамперед на вершинах мікронерівностей поверхонь, де концентрується енергія. В результаті

шорсткості згладжуються або нівелюються. Таке хімічне полірування полегшує створення мастильного клину.

Дія зазначених сполук як протизносні присадки пов'язана з формуванням на поверхні тертя адсорбційних шарів [7].

Ряд дослідників пов'язують протизносну дію присадок з хімічною модифікацією ювенільних і хімічно активних поверхонь тертя продуктами термічного розкладання присадок.

Ф.П. Боуденом [35] встановлено, що при граничному терті крім фізичної адсорбції полярних молекул мастильного матеріалу, відбувається хімічна взаємодія з металами жирних кислот, що містяться в присадках до мастильних матеріалів. За здатністю до реакції з маслом, метали поділяються на активні (Sn, Cu, Zn, Pb, та ін) і неактивні (Ag, Au, Pt та ін). Перші утворюють з жирними кислотами, хімічні сполуки типу металевих мил, і є хорошими мастильними матеріалами. Такі мила утворені внаслідок хімічної реакції з олівами, що здатні зберігати граничні плівки до значно вищих температур. При цьому на відміну від граничних плівок, утворених в результаті фізичної адсорбції, плівки на основі мила відновлюються в процесі їхнього руйнування або зносу [36].

На основі енергетичних та колоїдних уявлень розроблена теорія вибіркового перенесення послужила основою при доборі матеріалів для багатьох пар тертя та при розробці різних металоплакувальних мастильних матеріалів [6, 37].

При цьому в процесі перенесення металів (наприклад, міді) на сталеву поверхню, важливу роль відіграють маслорозчинні ПАР, що містяться в мастилі [37].

При вибіркового перенесенні на поверхнях тертя утворюється полімерна плівка, що захищає поверхні тертя від контакту та зношування. При деформуванні полімерна плівка не руйнується і не піддається руйнуванню втоми. Вона сприймає всі навантаження, покриває шорсткі поверхні тертя деталей, які беруть участь у процесі тертя. В умовах навантаження вона

рівномірно розподіляється по поверхні тертя, у результаті знижується контактний тиск. Полімерна плівка має здатність до відновлення. Це сприяє продовженню ресурсу вузла тертя.

Методи підвищення працездатності трибоспряжень, пов'язані з реалізацією хімічних реакцій на поверхнях тертя, не є завжди прийнятними за умов роботи спряження. Зокрема, вони можуть призводити до корозії контактуючих матеріалів та їх інтенсивного корозійно-механічного зношування [44].

Відомо, що структуру мастильних граничних шарів можна розглядати як епітропну рідкокристалічну фазу (ЕРК) [44-46].

Мастильна дія таких шарів визначається рівнем орієнтації молекул щодо змащувальних поверхонь тертя. При цьому орієнтація молекул на міжфазній границі розділу твердого тіла та рідкого мастила відтворює орієнтацію поверхневого шару твердого тіла. Отже, зміною рівня орієнтації поверхневого шару можна регулювати мастильну та несучу здатність граничних шарів. Існування у вузлах тертя ЕРК-шарів мастила з певною орієнтаційно-упорядкованою структурою забезпечує парам тертя необхідну зносостійкість і зменшення втрат енергії на тертя [44].

В останні роки спостерігається тенденція використання як присадки до мастильних матеріалів сполук, що мають в певних умовах рідкокристалічний стан.

## **1.6 Пластичні мастила**

Колоїдна система пластичних мастил має просторовий структурний каркас, утворений при охолодженні системи загущувачем (дисперсною фазою). Високий ступінь структурування додає мастилам пластичність, пружність, нерозтікання під дією власної маси. При порівняно малих навантаженнях, що перевищують границю міцності структурного каркасу, мастила починають текти, як пластичне тіло, але без порушення суцільності. У той же час при знятті навантаження розтікання припиняється і мастило відновлює первісні властивості (тиксотропні перетворення).

Якість пластичних мастил оцінюють по фізико–хімічним показникам (в'язкість, щільність, температура каплепадіння, випаровуваність, діелектричним, оптичним і деякими іншими властивостями) і експлуатаційним (міцністю і в'язко–температурної, мастильної і герметизуючої здатності і стійкості проти окислення і корозії) [12].

**Експлуатаційні властивості пластичних мастил.** Міцнісні властивості пластичних мастил оцінюють межею міцності – мінімальним навантаженням, при якому відбувається незворотна деформація зсуву. При перевищенні межі міцності мастила починають деформуватися, а при навантаженні нижче межі міцності вони мають пружність як у твердих тіл. З підвищенням температури в більшості випадків межа міцності мастил зменшується. Верхня температурна межа працездатності мастил відповідає температурі, при якій межа їхньої міцності наближається до нуля і мастила переходять із пластичного стану в рідке. Значення межі міцності і його залежність від температури в значній мірі визначають сили зрушення у вузлах тертя, здатність пластичного мастила надходити до поверхонь трибоспряжень і утримуватися на них.

Межу міцності визначають різними методами: при зрушенні коаксіальних циліндрів чи зрушенням мастила в оребреному капілярі при вириванні з мастила шурупа пластини. Для більшості пластичних мастил межа міцності при температурі 20 °С знаходиться в межах 100 – 1000 Па.

Міцність пластичного мастила у виробничих умовах часто визначається числом penetрації, що виміряється глибиною занурення в мастило конуса стандартної маси протягом 5 с і виражається в десятих долях міліметра. Чим глибше занурення конуса, тим вище penetрація і менше міцність мастила. Число penetрації мастил змінюється в межах 170 – 420.

В'язкість пластичних мастил на відміну від в'язкості масел залежить не тільки від температури, але і від градієнта швидкості зрушення. Зі збільшенням швидкості зрушення в'язкість різко знижується. Тому визначається, так названа, ефективна в'язкість при заданому градієнті

зрушення. Для виміру в'язкості застосовують капілярні і ротаційні віскозиметри. Збільшення температури приводить до зниження в'язкості. В умовах мінімальних робочих температур в'язкість не повинна перевищувати 2000 Па·с (при градієнті зрушення  $10^{-1}$  с). В'язкісно-температурні властивості пластичних мастил вище, ніж у масел, тому що температура мало впливає на міцність структурного каркаса мастил. Підвищення концентрації і ступеня дисперсності загущувача збільшує в'язкість мастил.

Тиксотропні перетворення мастил чи їхня механічна стабільність залежить від типу загущувача, розмірів і форми його частинок, міцності зв'язку між дисперсними частками, а також від складу і властивостей дисперсійного середовища, наявності в мастильному матеріалі поверхнево-активних речовин (ПАР), наповнювачів та добавок. Механічна стабільність зростає зі збільшенням концентрації загущувача для мильних мастил зі збільшенням відношення довжини волокон до їхнього діаметру [8]. Механічну стабільність пластичних мастил визначають у ротаційному приладі – тиксометрі – по зміні механічних властивостей у процесі руйнування мастил чи безпосередньо після закінчення руйнування і розраховують по зміні межі міцності мастила на розрив індекс руйнування  $K_p$  і індекс тиксотропного відновлення  $K_v$ . Здатність пластичних мастил утримувати масло в каркасі називається колоїдною стабільністю. Ця експлуатаційна характеристика мастил залежить від досконалості структурного каркасу, в'язкості дисперсійного середовища і технології виготовлення мастила (режим охолодження). Надмірно велике виділення масла з пластичного мастила в процесі роботи приводить до різкого зміцнення мастила і порушує надходження його до поверхні тертя. Колоїдну стабільність оцінюють методом механічного відпресовування масла з деякого обсягу мастила на приладах типу КСА при кімнатній температурі протягом 30 хв. (виражається у відсотках і не повинна перевищувати 30 %).

Важливою характеристикою пластичних мастил є їхня хімічна стабільність – стійкість проти окислювання киснем повітря, кислотами,

лугами. При окислюванні мастил відбувається їхнє розміцнення, погіршення колоїдної стабільності, мастильної здатності, зниження температури каплепадіння. Хімічну стабільність оцінюють при прискореному окислюванні мастил під впливом високої температури і каталізаторів по кислотному числу, кількості і швидкості поглинання кисню, зміні структури мастил. Мастильну здатність пластичних мастил – їх антифрикційні, протизносні і протизадирні властивості оцінюють методами, застосовуваними в цих цілях для масел.

**Класифікація і призначення пластичних мастил.** По призначенню розділяють пластичні мастила [13]:

- 1) антифрикційні для зниження тертя і зношування деталей машин і механізмів;
- 2) ущільнювальні для герметизації вузлів тертя, сальників, зазорів і ін.;
- 3) консерваційні для запобігання металевих конструкцій від корозії;
- 4) спеціального призначення (фрикційні, припрацювальні та ін.) [36].

Мастила класифікують і по складу змащувального матеріалу. Так, по типу загущувача їх поділяють на органічні (загущувачі – мила, тверді вуглеводи, пігменти, деякі кристалічні полімери) і неорганічні (загущувачі – селікагель, бентоніт, сажа і ін.). Мильні мастила у свою чергу поділяють на кальцієві, натрієві, літієві, барієві, алюмінієві.

**Антифрикційні пластичні мастила** широко застосовують для змащення підшипників кочення і ковзання, зубчастих, гвинтових і ланцюгових передач, шарнірів, плоских направляючих, електричних контактів і багатьох інших механічних систем і конструкцій. Підрозділяють на мастила загального і спеціального призначення. У загальній групі виділяють мастила для невисоких температур (до 70 °С) і для підвищених температур (до 120 °С і вище). Спеціальні антифрикційні мастила поділяють на термостійкі (150 °С і вище), морозостійкі (40 °С і нижче), а також на противозадирні і протизносні та на хімічно і радіаційно стійкі.

**Консерваційні пластичні мастила.** Для тривалого зберігання металів від корозії консерваційні мастила повинні мати наступні властивості: хімічну

інертність стосовно металу (тобто не викликати корозію), малу проникність для корозійно-агресивних речовин, водостійкість, високу хімічну і колоїдну стабільність, гарну адгезію до поверхні в широкому діапазоні температур. Захисний ефект консерваційних мастил визначають в основному два фактори – механічна ізоляція металу від вологи і кисню повітря і гальмування електрохімічних процесів корозії в результаті інгібіруючої дії компонентів мастила, тобто опір струму корозії, що виникає в результаті анодної чи катодної поляризації металу під тонким шаром мастила.

Асортимент консерваційних мастил порівняно невеликий [36]. Найбільше застосування мають вуглеводневі мастила з низькою температурою плавлення (40 – 75 °С), що дозволяє наносити їх на поверхню в розплавленому виді зануренням деталі в розплав чи методом розпилення. Недолік більшості вуглеводневих мастил – обмеження застосування при температурах вище 50 °С.

### **1.7 Додаткові функції мастильного матеріалу у вузлах тертя**

Крім поділу сполучених поверхонь і зниження тертя мастило паралельно може володіти додатковими функціями [18 –19]:

– Відведення тепла від сполучених поверхонь;

Ця функція в повному обсязі притаманна лише рідким мастильним матеріалам, пластичним – тільки з системою циркуляційного змащування. В тому і в іншому випадках тепло передається мастильним матеріалом від більш нагрітих поверхонь тертя до оточуючих холодних стінок, тим самим, зупиняючи деформацію і руйнування.

– Захист поверхні металу від атмосферної корозії;

Функція характерна для мастильного матеріалу з тривалим терміном роботи і зберігання. Наприклад, антифрикційні мастила, моторні масла, індустриальні масла з присадками АКОР для межопераційного захисту на металообробних підприємствах.

Іноді покладають на мастила функцію захисту вузла тертя від попадання пилу і води з навколишнього середовища. Доцільність пред'явлення до мастил

таких вимог є досить сумнівною. В силу своїх фізико-хімічних властивостей, мастило здатне накопичувати в собі частинки пилу (іноді і вологу), викликаючи прискорений знос деталей, тому проблему захисту від попадання в вузол тертя речовин із зовнішнього середовища ведуть конструкційним шляхом.



## Висновки до розділу 1

На основі літературних даних з питання використання мастильних матеріалів, які працюють в різних умовах, можна зробити наступні висновки:

Сьогодні широко використовуються різні рухомі механізми, де є пари тертя, необхідно щоб вони задовольняли технічним характеристикам і зберігали працездатність досить тривалий час, тому необхідно постійно удосконалювати існуючі види пар тертя, методи їх виготовлення та матеріали, з яких вони виготовлялися.

Великий асортимент існуючих мастильних матеріалів дозволяє розподілити їх на види та типи і використовувати в різних машинах та механізмах, що значно спрощує процес виробництва як самого мастильного матеріалу, так і механізму, в якому вони працюють. Однак в сучасних умовах в період розвитку нових технологій не завжди економічно використовувати вже давно прийняті, в окремих випадках, для застосування типу змащувального матеріалу у вузькому асортименті механізмів, тому необхідно виходити на рівень підбору нових матеріалів для розширення і покращення умов роботи машин і механізмів шляхом додавання присадок до мастильних матеріалів, таким чином створюючи персональну композицію для найкращої роботи пари тертя залежно від умов роботи.

Крім основних властивостей змащувальні матеріали повинні мати низьку випаровуваність, піноутворюючу здатність і емульгованість, не здійснювати негативного впливу на ущільнюючі матеріали, не бути токсичними, не піддаватися біопшкодженням, не змінювати властивостей при зберіганні регенерації, легко транспортуватися і не викликати забруднення навколишнього середовища.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 2.1 Випробування мастильних матеріалів

Вирішуючи практичну задачу вибору вихідних компонентів при створенні нового мастила, необхідно: вивчити дані фізико-хімічних властивостей вже виготовлених мастильних матеріалів, а потім на основі порівняльного підходу провести експерименти з вивчення властивостей розробленого матеріалу. Слід мати на увазі, що результати оцінки фізико-хімічних властивостей порівнюваних мастильних матеріалів, як правило, суперечливі [19].

Лабораторні методи випробування мастильних матеріалів поділяються на:

1) прямі (на спеціальних нафтодослідних машинах і пристроях в умовах тертя твердих тіл);

2) Непрямі (змащувальні дії оцінюються за різними фізико-хімічними параметрами без відтворення тертя між поверхнями мастила).

Безпосереднє триботехнічне випробування мастильних матеріалів включає оцінку протизносних, екстремальних тисків і антифрикційних властивостей на лабораторних приладах або установках з випробувальними зразками геометричної форми (площини, циліндри, сфери), на яких моделювали машини або спеціально виготовлені подібні деталі, підшипники ковзання або кочення) і безпосередньо в реальних вузлах машин і механізмів в умовах експлуатації

При випробуваннях на машинах в умовах експлуатації на отримані результати, крім основних параметрів (відносна швидкість руху поверхонь, що труться, тиск, температура), впливають умови роботи машини (наявність частих зупинок і пусків, зміни навантаження та швидкості, наявність вологи

та інших корозійних речовин, а також абразивних частинок у навколишньому середовищі тощо). За цих умов важко виділити найважливіший параметр, який має вирішальний вплив на поведінку мастила. Щоб зменшити ці наслідки, випробування мають бути тривалими і проводитися на кількох машинах одного типу, що займає багато часу та дорого. Тому в більшості випадків тести продуктивності використовуються для остаточного визначення оптимальних мастильних матеріалів, вибраних із серії лабораторних і стендових випробувань.

Стендові випробування на моделюючих машинах дають змогу визначити трибологічні характеристики мастильних матеріалів в умовах тертя реальних деталей машин і механізмів при контролі всіх впливових параметрів [23]. Проте випробування на моделюючих машинах є тривалими і дорогими і в основному використовуються для визначення екстремальних тисків і протизносних властивостей пластичних мастильних матеріалів, комплексного випробування моторних олів на одно- та багатоциліндрових установках, а також на стендах для випробування підшипників.

На відміну від випробування мастильних матеріалів в умовах експлуатації та на стендах, лабораторні випробування не вимагають багато часу; вони дозволяють значною мірою змінити основний параметр, що впливає на трибологічні характеристики мастильних матеріалів. Умови випробувань відрізняються від умов реальних машин, але переваги лабораторних випробувань сприяють їх широкому застосуванню, особливо при розробці нових присадок і мастильних матеріалів.

Найпоширенішими машинами є машина «поворотний ролик – часткова вставка», машина Ольмена-Віланда, машина Фалекс, машина Шкода-Савін, машина SAE та чотирикулькові машини тертя [1].

Непрямими методами є дослідження фізико-хімічних властивостей систем: визначення контактного кута змочування, поверхневого натягу, колоїдної стійкості систем, контактної різниці потенціалів, електродного потенціалу, вимірювання теплоти адсорбції [3; 6].

## 2.2 Вибір матеріалів для дослідження

Для дослідження використовувалися пластичне мастило ЦИАТИМ 201, що отримало широке використання в авіаційній промисловості.

Вибране мастило використовувалося як основа мастильної композиції. Як досліджувані присадки застосовувалися сполуки на основі міді. Досліджувалися такі сполуки: валерат міді та миристант міді. Вибір даних хімічних сполук був зумовлений тим, що вони здатні при підвищенні температури переходити в рідкокристалічний стан (утворювати мезофазу), а в мезоморфному стані здатні утворювати впорядковані колончасті дискотичні структури [107].

В таблиці 2.1 наведено структурні формули кислот, що використовувалися для отримання присадок на основі міді.

Таблиця 2.1 – Структурні формули валеріанової і миристинової кислот

Число атомів вуглецю	Хімічна формула	Тривіальна назва кислоти	Назва солі
5	$C_4H_9COOH$	валеріанова	валерат
22	$C_{21}H_{43}COOH$	миристинова	миристант

Отримані сполуки відрізняються будовою, яка визначається умовами створення присадок. Основною відмінністю даних сполук одна від одної є розмір центрального фрагмента молекули та довжина вуглеводневого ланцюга.

Досліджувався різний відсотковий вміст присадок у мастилі. Максимальний вміст присадок у мастилі не перевищував 20%.

## 2.3 Методика дослідження зносостійкості

Триботехнічні випробування мастильних матеріалів включають їх оцінку протизносних, протизадирних та антифрикційних властивостей на лабораторних приладах або установках з випробувальними зразками простої геометричної форми. На відміну від випробувань мастильних матеріалів в умовах експлуатації та на стендах, лабораторні випробування не вимагають великих витрат часу, вони з більшою мірою дозволяють змінювати умови на

поверхні тертя і виділяти основний параметр, що впливає на трибологічні характеристики мастильних матеріалів [5, 109].

У роботі для оцінки та порівняння розроблених присадок були досліджені триботехнічні характеристики – залежності коефіцієнта тертя від прикладеного навантаження, величини зносу від шляху тертя при постійному навантаженні та залежність інтенсивності зношування від прикладеного навантаження при фіксованому шляху тертя. Ці характеристики визначають межі працездатності пари тертя. Стійкість матеріалів до зношування при різних режимах тертя, визначають ресурс та працездатність вузлів тертя.

У зв'язку з тим, що на тертя та знос впливає велика кількість факторів, випробування досліджуваних матеріалів проводилося у кілька етапів, згідно [110, 111]:

1. Фізико-механічні випробування матеріалів;
2. Випробування матеріалів на тертя та зносостійкість у лабораторних умовах на установках щодо визначення параметрів зносостійкості матеріалів (прилад тертя ПТ-4Ц). Проводилася оцінка впливу фізико-механічних властивостей матеріалів та режимів тертя на їх триботехнічні характеристики;
3. Випробування матеріалів на тертя та зносостійкість при терті у технологічних середовищах та різних режимах тертя;

Дослідження триботехнічних характеристик проводилося на машинах для випробування матеріалів на тертя та знос моделей ПТ-4Ц (рис 2.1).

Випробування проводилися за схемою "диск – вкладиш", що представлено на рис. 2.2.

Момент тертя на валу (диску, що обертається) вимірювався за допомогою безконтактного індуктивного датчика. Електричні сигнали з вимірювальних котушок датчика подаються в електричну схему порівняння і далі потенціометр КСП-005, вмонтований в електричний блок керування машиною.



Рисунок 2.1 – Загальний вид установки ПТ-4Ц для дослідження триботехнічних характеристик пари тертя

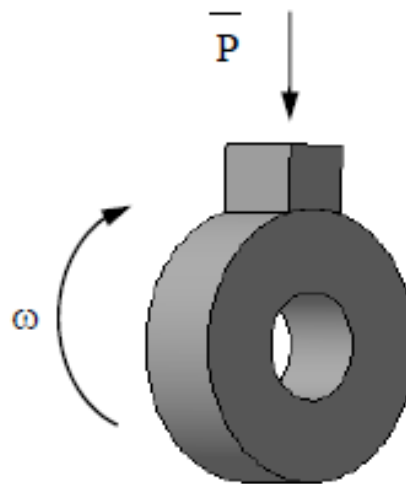


Рисунок 2.2 – Схема випробування зразків (диск – обертається, вкладиш – нерухомий)

Геометричні розміри зразка «вкладиш» представлено на рис. 2.3.

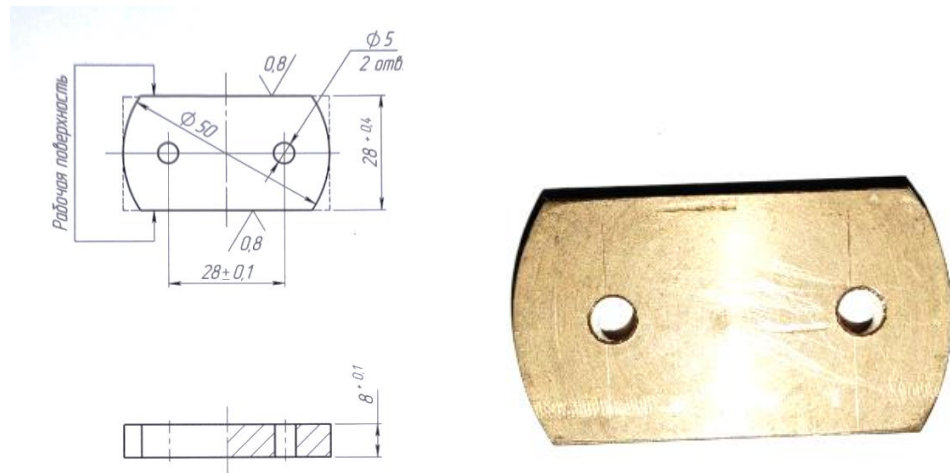


Рисунок 2.3 – Геометричні розміри та фото зразка

Геометричні розміри контрзразка «диск» представлено на рис. 2.4.

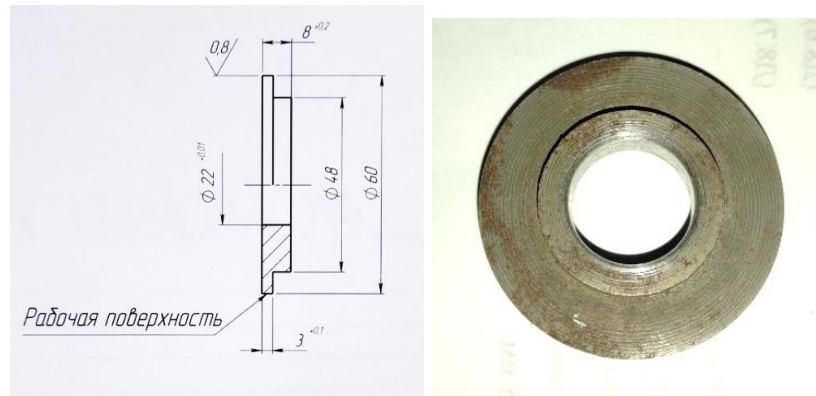


Рисунок 2.4 – Геометричні розміри та фото контрзразка

При дослідженні триботехнічних властивостей розроблених мастильних матеріалів, були обрані наступні режими роботи пари тертя: швидкість ковзання 1 м/с; тертя граничне (мастило наносилося на ролик 1 раз перед кожним випробуванням); навантаження на зразок підвищувалося ступінчасто до різкого збільшення моменту тертя. Перед випробуванням кожного нового мастила поверхні зразка та контрзразка поверталися до вихідної шорсткості (9-10 клас) шляхом шліфування та полірування.

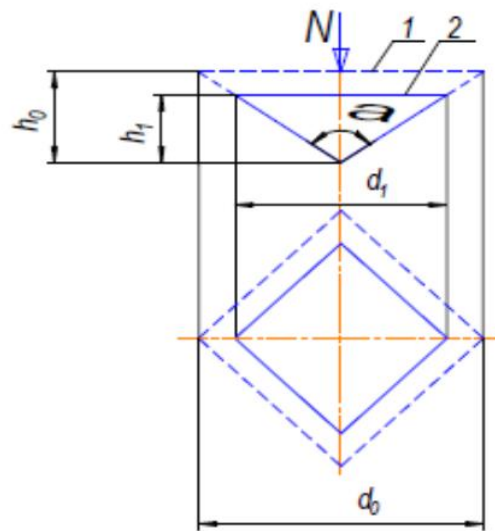
Матеріал зразка сталь ШХ 15. Матеріал контрзразка сталь 45 з твердістю HRC 45 – 50.

Під час дослідження властивостей мастильних матеріалів за схемою тертя диск – вкладиш фіксувалися зміни коефіцієнта тертя та зміни інтенсивності зношування пари тертя.

У даній роботі використовувалися методи визначення лінійного та об'ємного зносу зразків.

Вимірювання лінійного зносу проводили методом "штучних баз" – встановленням лінійного зносу за задалегідь нанесеними відбитками на твердомірі ПМТ-3 з чотиригранною діамантовою пірамідкою з кутом при вершині  $\alpha = 136^\circ$  (рис. 2.5).

Діагональ відбитка вимірюють за допомогою мікроскопа, що вмонтовано в твердомір. Основним недоліком цього методу є спучування поверхні при нанесенні відбитку.



1 – поверхня тертя до зношування; 2 – поверхня тертя після зношування

Рисунок 2.5 – Схема визначення лінійного зносу методом "Штучних баз" на приладі ПМТ-3

При цьому наносилося три відбитки. Знос визначався як середнє значення з трьох вимірів.

Для визначення триботехнічних характеристик, як пластичних мастильних матеріалів, так і рідких масел на машинах тертя застосування знайшли схеми тертя зі змінною площею контакту зразків.

Досвід проведення триботехнічних досліджень показує [112-116], що випробування за такими схемами відрізняються високою експресністю та надійністю результатів. Серед експериментальних установок призначених для



оцінки мастильних властивостей мастил, мастил та композицій найбільш поширена чотирикулькова машина тертя [113]. Проте дефіцитність її змушує дослідників розробляти методики оцінки триботехнічних властивостей мастильних матеріалів, що не поступаються за надійністю та експресності методики чотирикулькової машини та легко реалізовані на інших машинах тертя [114, 115].

Для проведення дослідження використовувалася установка ПТ-4Ц, вона дозволяє проводити дослідження протизносних властивостей мастильних матеріалів. Методика передбачає використання зразків і контрзразків, що представлені на рисунках 2.3 і 2.4. Схему встановлення зразків представлено на рис. 2.6.

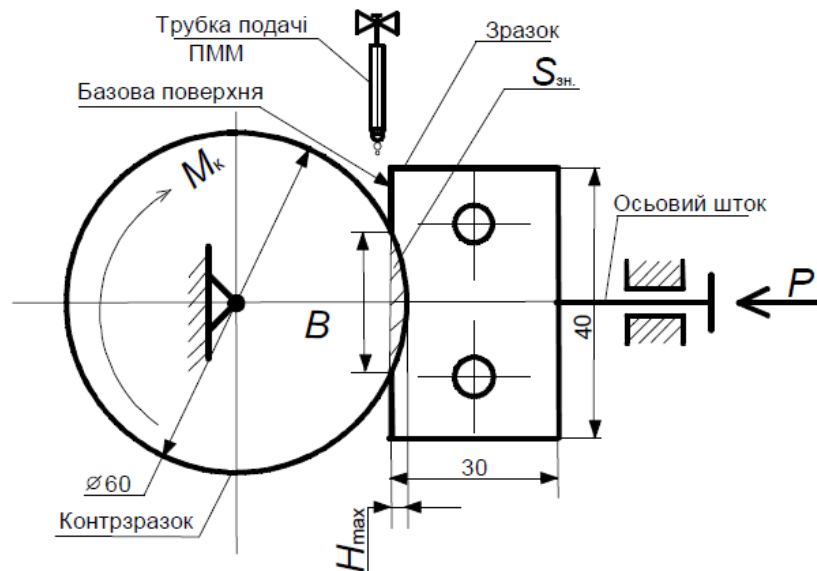


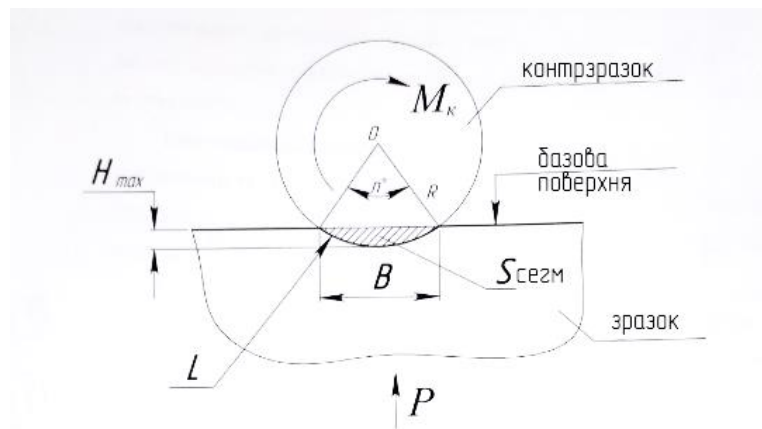
Рисунок 2.6 – Схема встановлення зразків і контрзразків для дослідження властивостей мастильних матеріалів на установці «ПТ-4Ц»

Як видно з рисунку, контрзразок здійснює обертання із заданою швидкістю, взаємодіє із робочою поверхнею зразка на який діє сила притискування  $P$ . Швидкість обертання і сила притискування встановлюються у відповідності до умов дослідження.

Критерієм визначення величини зношування було прийняти величину об'ємного зношування ( $H_v$ , м<sup>3</sup>) дослідного зразка, яку отримали шляхом добутку площі зношування на товщину зразка ( $b = 0,003$ м). Для розрахунку

площі зношування  $S_{\text{сегм}}$  ( $\text{м}^2$ ), на яку контрзразок заглиблюється в досліджуваний зразок відносно базової поверхні у процесі зношування матеріалу. Знаходили глибину доріжки тертя на нерухомому зразку і вимірювали за допомогою профілографа-профілометра ПП-1П. Даний прилад дозволяє вимірювати профілограми за глибиною зношеного матеріалу вздовж доріжки ковзання через кожен міліметр поверхні, а отже дозволяє вимірювати довжину профілограми та доріжки ковзання.

Площу сегментної ділянки ( $S_{\text{сегм}}$ ) розраховують як суму площ вписаного в сегмент трикутника та площ прямокутних трапецій (рис. 2.7).



$L$  – довжина дуги зношеної ділянки,  $B$  – ширина зношеної ділянки,  $H_{\text{max}}$  – максимальна глибина в зношені ділянці

Рисунок 2.7 – Профілограма зношеної поверхні зразка, що записано вздовж шляху тертя

$$S_{\text{сегм}} = \frac{R \times L - B(R - H_{\text{max}})}{2}, \quad (2.1)$$

де  $L = 0,01747 \times R \times n^\circ$  – довжина дуги, що утворюється в процесі зношування;

$n^\circ$  – величина центрального кута сегменту в процесі зношування.

Тоді отримуємо, що величина об'ємного зношування визначається за формулою:

$$H_v = S_{\text{сегм}} \times b. \quad (2.2)$$

А оємна інтенсивність зношування  $I_v$ , за формулою:

$$I_v = H_v / l, \quad (2.3)$$

де  $l$  – довжина шляху тертя трибоспряження.

## 2.4 Методика визначення реологічних характеристик одержаних мастильних матеріалів

Оскільки як основа мастильної композиції використовувалися пластичні мастильні матеріали різної природи, то відповідно до ДСТУ 4295:2004 «Мастила. Метод визначення пенетрації конусами з половинною та четвертою шкалами» [123] та ASTM D217-10 «Стандартні методи визначення пенетрації консистентного мастила методом занурення конуса» для них визначався коефіцієнт пенетрації.

Коефіцієнт пенетрації визначався за допомогою напівавтоматичного пенетрометра ПН-1ЖВ (див. рис. 2.8, 2.9).

Умови проведення досліджень, як базових мастильних матеріалів та експериментальних мастильних композицій представлені в ДСТУ 4295:2004 та ASTM D217-10.



Рисунок 2.8 – Прилад ПН-1ЖВ для вимірювання пенетрації пластичних мастильних матеріалів

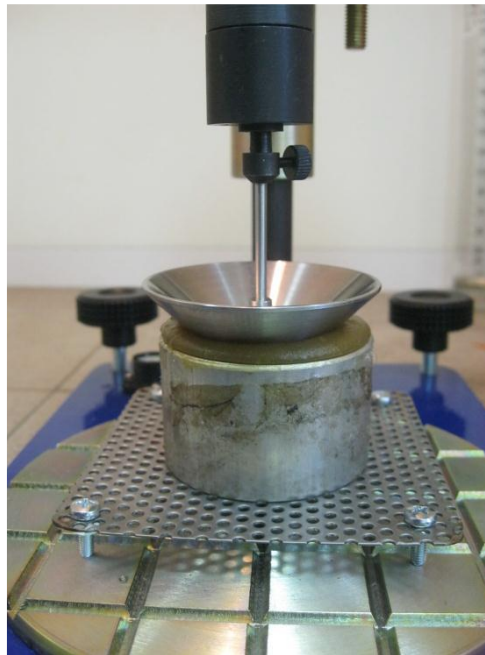


Рисунок 3.14 – Вимірювання пенетрації мастильного матеріалу приладом ПН-1ЖВ

Також визначалася температура розм'якшення та краплепадіння базових та експериментальних мастильних матеріалів. Дані реологічні характеристики визначалися відповідно до ГОСТ 6793-74 «Нафтопродукти. Метод визначення температури краплепадіння» [124] ASTM D 566 «Стандартний метод випробування точки краплепадіння мастила».

## 2.5 Метод статистичної обробки даних

Статистична обробка експериментальних даних проводилася щодо визначення їх довірчих інтервалів:

- обчислення середнього значення  $n$  вимірів:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i;$$

- визначення похибки окремих вимірювань:

$$\Delta a_i = \bar{a} - a_i;$$

- перевірка на наявність неправильних досліджень;

- визначення середньої квадратичної похибки результату серії вимірювань:

$$\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}};$$

- визначення значення достовірності  $\alpha$  ( $\alpha=0,90$ ) та визначення коефіцієнту Стюдента  $t_{\alpha}(n)$  для заданої достовірності  $\alpha$  та кількості проведених вимірювань  $n$ ;

- визначення меж довірного інтервалу (за похибкою результату вимірювань):

$$\Delta a_i = t_{\alpha}(n) \times \Delta S_{\bar{a}};$$

- запис заключного результату у вигляді:

$$a = \bar{a} \pm \Delta a;$$

- визначення відносної похибки результату серії вимірів:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\bar{a}} \times 100 \%$$

## **Висновки до розділу 2**

На основі огляду літератури та аналізу машин, що використовуються для дослідження триботехнічних характеристик матеріалів, було вибрано триботехнічну установку, що дозволила створити оптимальні умови для проведення досліджень. Дана установка дозволяє визначати коефіцієнт тертя і величину об'ємного зношування.

Всі трибологічні дослідження в сучасних умовах виконуються з використанням лабораторної випробувальної техніки. Простота конструкції машин тертя забезпечує її надійність і зручність в обслуговуванні, використання необхідних експериментальних параметрів. Все вище перелічене сприяє отриманню правдоподібних досліджуваних результатів дослідження і можливість проведення якісного експерименту.

## РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАСТИЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙ

### 3.1 Дослідження впливу додавання мідних солей на антифрикційні характеристики вибраного мастильного матеріалу

Додавання досліджуваних присадок в Циатим 201 в цілому призводить до зниження коефіцієнту тертя в трибоспряженні, що в цілому дозволяє зменшувати втрати на тертя в трибоспряженні, а, відповідно, і втрати енергії на холостий привід механізмів авіаційної техніки .

Слід зазначити, що при дослідженні матеріалів спостерігається тенденція до покращення характеристик зі збільшенням кількості присадки у базовому мастилі. Ця закономірність простежується для різного діапазону навантажень.

Результати дослідження антифрикційних характеристик Циатим 201 з додаванням мідної присадки наведено на рисунках 3.1 – 3.2

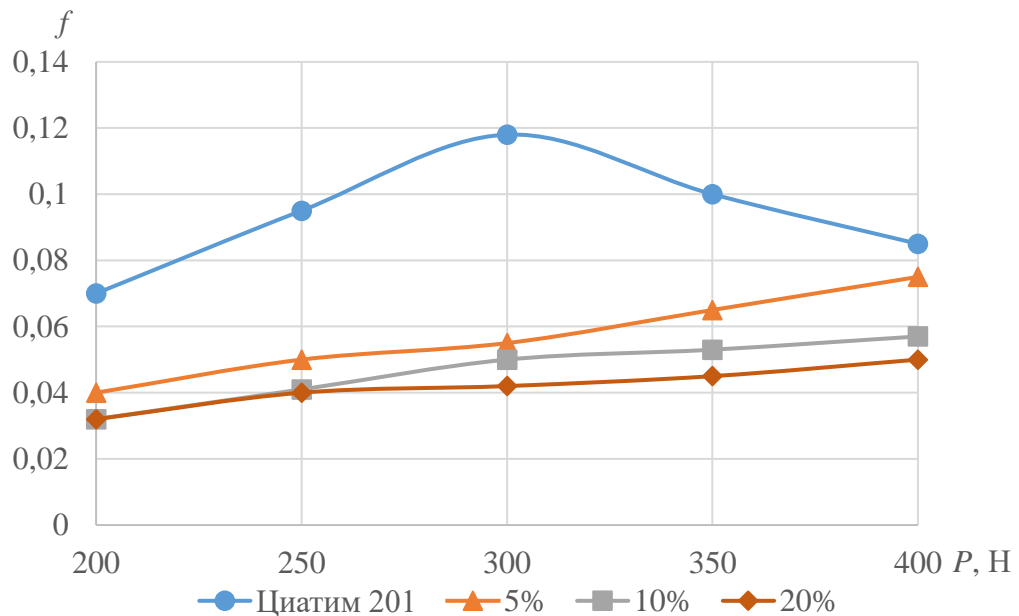


Рисунок 3.1 – Залежність коефіцієнта тертя від навантаження при додаванні валерата міді

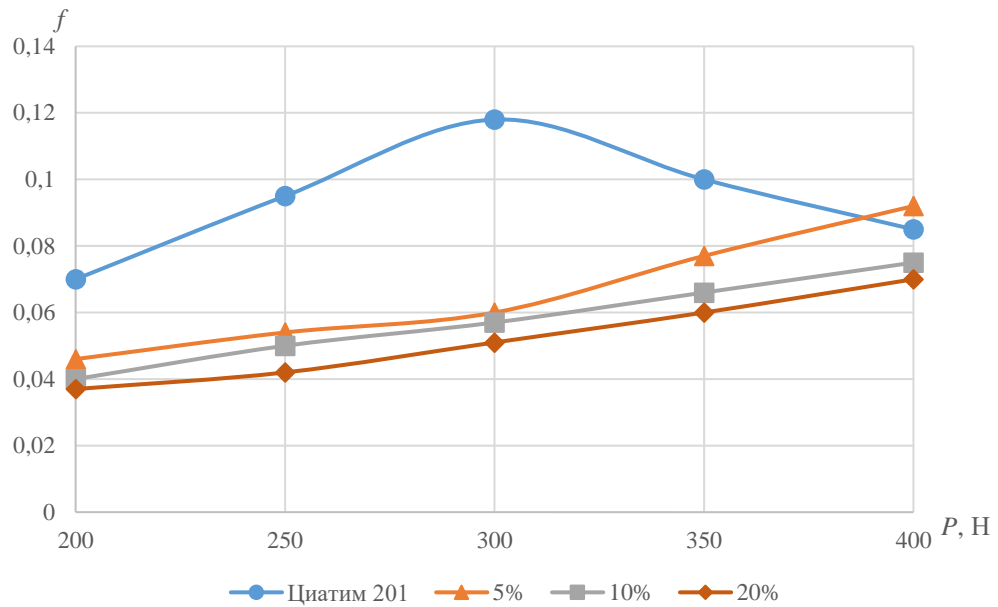


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта тертя від навантаження при додаванні мирстрата міді

На рисунках 3.3 – 3.5 представлено закономірності за якими можна відмітити, що при збільшенні кількості присадки в базовому мастилі, спостерігається тенденція до зниження антифрикційних характеристик. Слід зазначити, що при додаванні валерату міді до базового мастила, ми спостерігаємо найкращі антифрикційні характеристики.

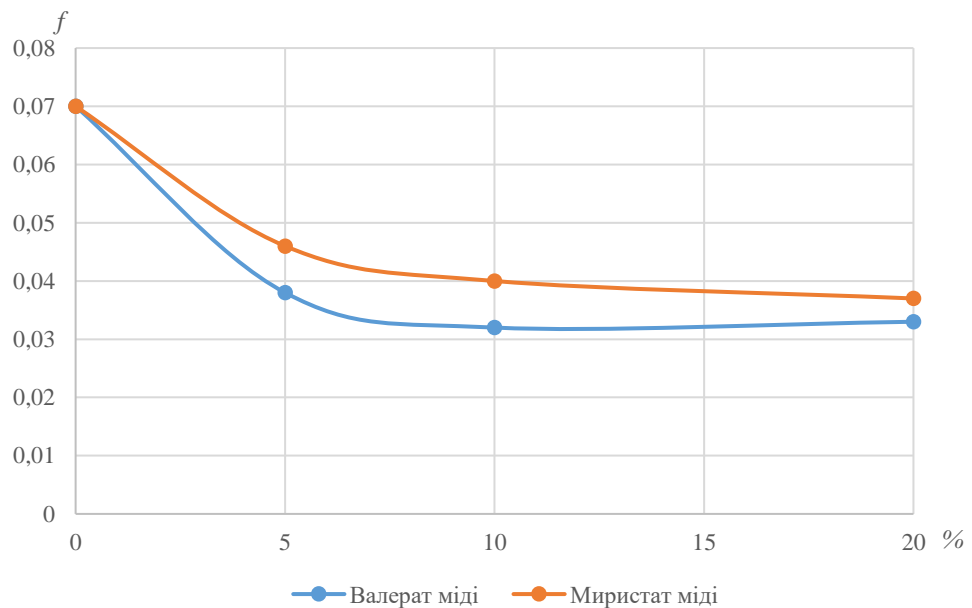


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта тертя від відсоткового вмісту присадок в базовому мастилі при навантаженні на зразки 200 Н



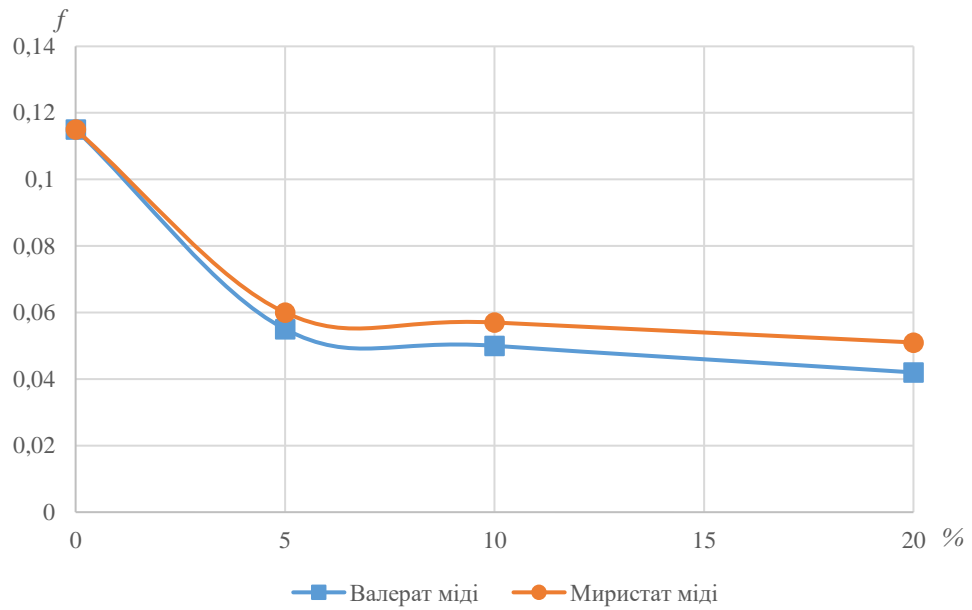


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта тертя від відсоткового вмісту присадок в базовому мастилі при навантаженні на зразки 300 Н

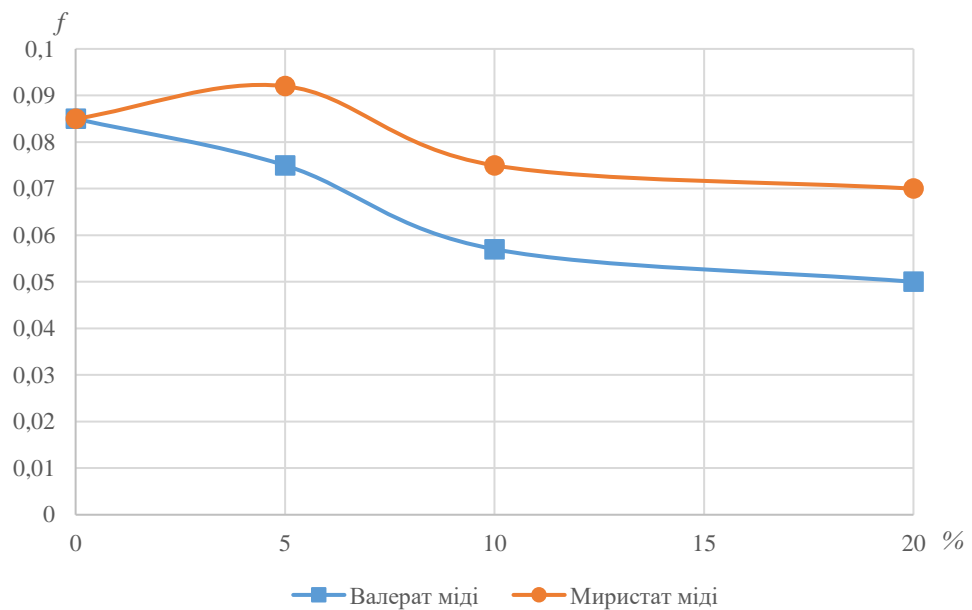


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта тертя від відсоткового вмісту присадок в базовому мастилі при навантаженні на зразки 400 Н

Така закономірність найбільше відслідковується при збільшенні навантаження на зразок. Збільшення навантаження на зразок призводить до більш інтенсивного збільшення температури в зоні тертя.

При досягненні температури переходу присадки в мезофазу, відбувається трансформація рідкокристалічних комплексів. Такі явища

призводять до того, що вони розташовуються по поверхні тертя і утворюють граничні плівки рідких кристалів, що вказує на низьким зсувним опором високою навантажувальною здатністю. Це призводить до того, що відбувається ефективне розділення поверхонь тертя, зниження рівня зношування і підвищення довговічності трибоспряжень.

### 3.2 Дослідження впливу додавання мідних солей на реологічні характеристики мастила Циатим 201

Додавання присадок на основі міді до базового мастила призводить до зміни основних реологічних характеристик мастильного матеріалу.

На рисунку 3.6 представлено результати визначення пенетрації мастильного матеріалу при додаванні в нього валерату і миристату міді і при температурі 17 °С в лабораторії для дослідження.

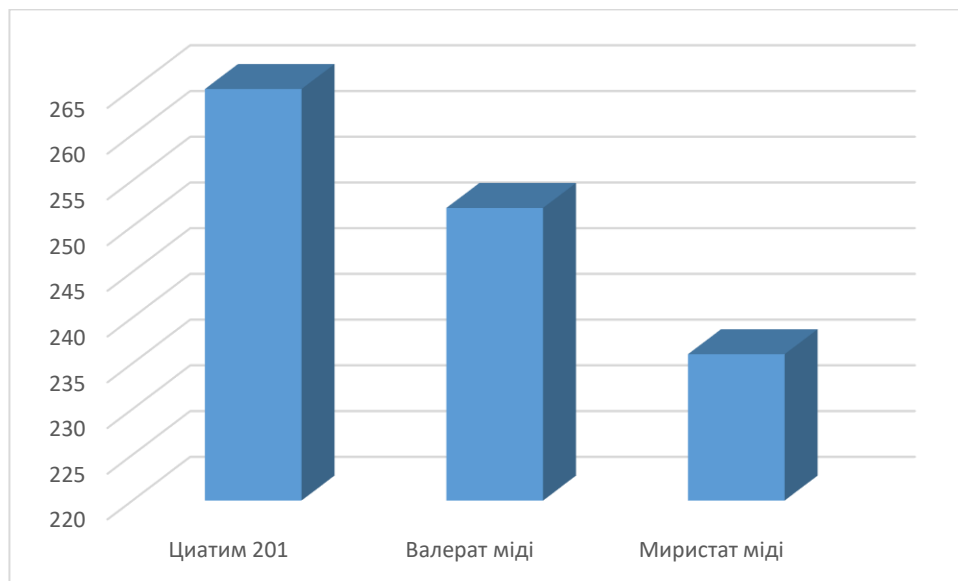


Рисунок 3.6 – Результати визначення пенетрації при додаванні валерату і миристату міді відповідно

З отриманих результатів видно, що введення в базове мастило присадок на основі міді призводить до загущення і підвищення міцності.

Зміна консистенції мастильного матеріалу при додаванні в нього валерату і миристату міді призводить до зміни температури краплепадіння і розм'якшення.

Результати визначення цих параметрів подано рисунках 3.7 і 3.8.

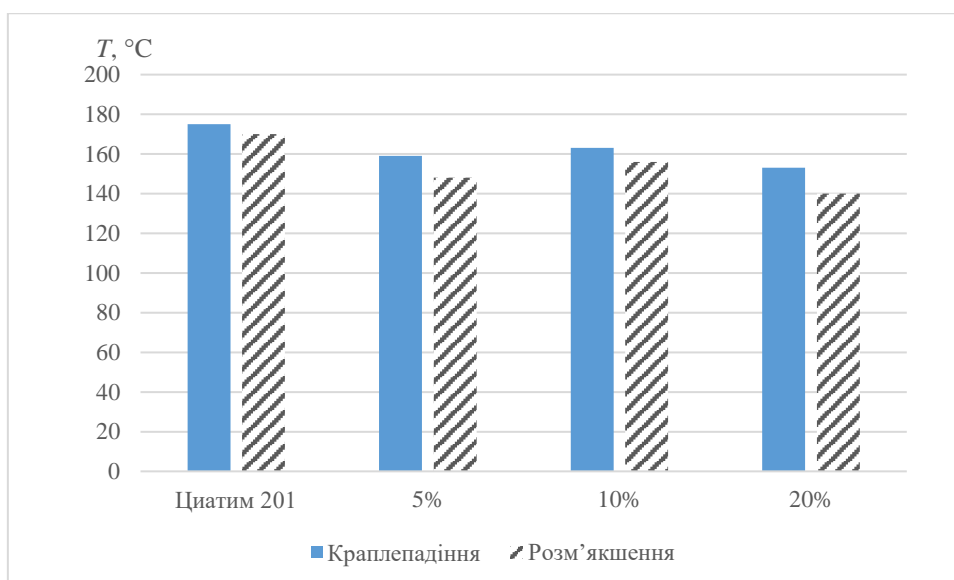


Рисунок 3.7 – Визначення температур краплепадіння і розм'якшення при даванні валерату міді

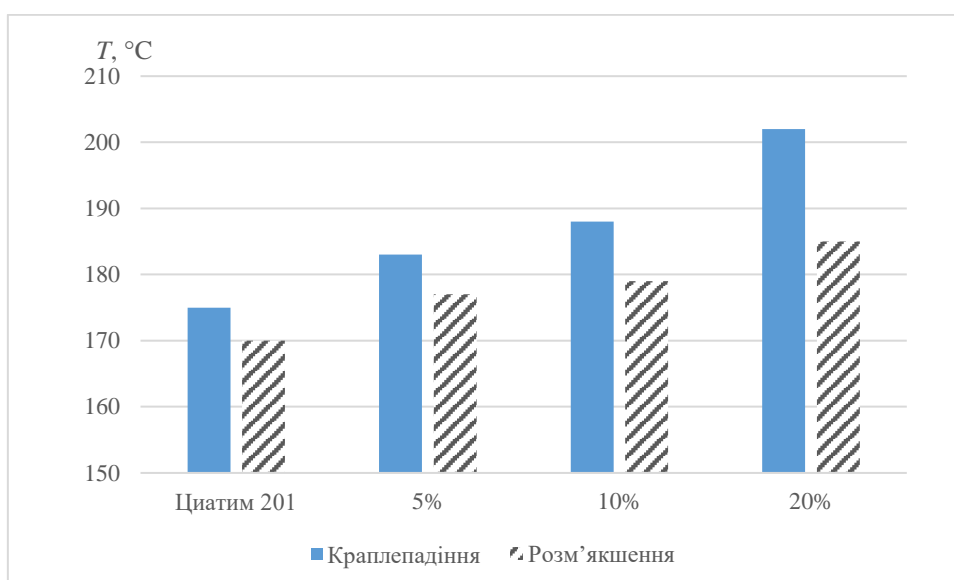


Рисунок 3.8 – Визначення температур краплепадіння і розм'якшення при даванні миристату міді

Результати дослідження мастила Циатим 201 з додаванням валерату і миристату міді вказують на зміну температури краплепадіння і розм'якшення. На підставі дослідження **робіт [1]**, можна говорити, що збільшення температури пов'язано і з наявністю довголанцюгових гомологів. Таке явище пояснюється

довжиною вуглеводневих радикалів і розмірами молекули кислоти. Також можна відмітити вплив концентрації солей міді в базовому мастилі.

Дослідження залежності температури краплепадіння і розм'якшення від відсоткового вмісту присадок на основі міді в мастильному матеріалі вказують на те, що при збільшенні С-Н радикалів, призводить до збільшення значень температури краплепадіння і розм'якшення. Нажаль таке явище не характерне при додаванні валерату міді, оскільки вона містить всього 5 додаткових радикалів групи С-Н на відміну від миристату, де їх 22.

Такі зміни реологічних характеристик мастильних матеріалів позитивно впливає на пластичні матеріали, оскільки таким чином підвищуються протизносні характеристики цих матеріалів.

### 3.3 Дослідження впливу додавання присадок на основі міді на протизношувальні характеристики мастильного матеріалу

Додавання присадок на основі міді в базове мастило покращує її протизносні характеристики. На рисунках 3.9 – 3.12 представлено результати дослідження зношування елементів трибоспряження в залежності від навантаження на зразки.

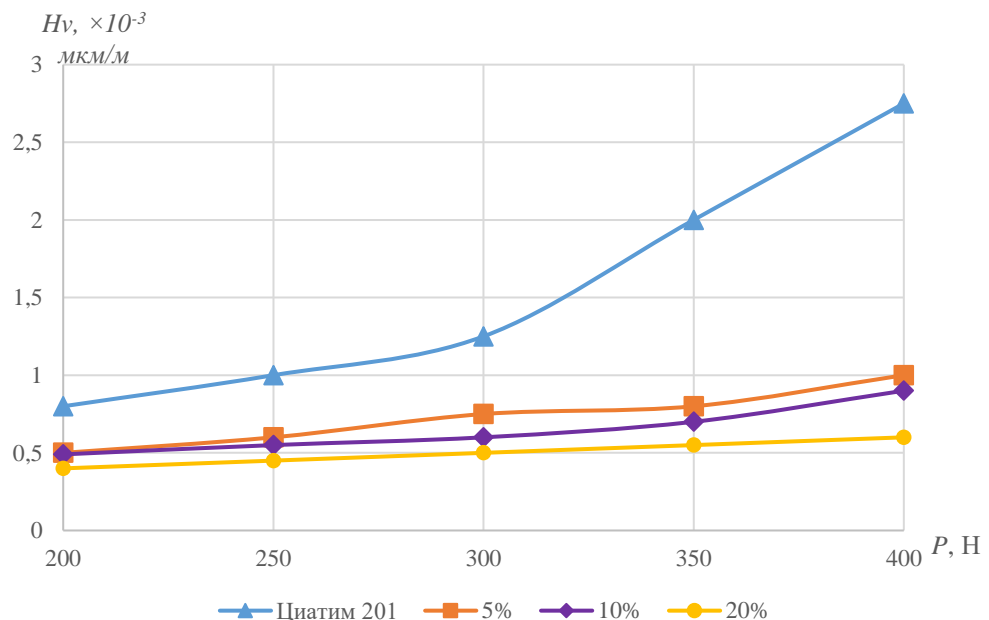


Рисунок 3.9 – Залежність зношування вкладиша від навантаження при додаванні валерата міді до базового мастила

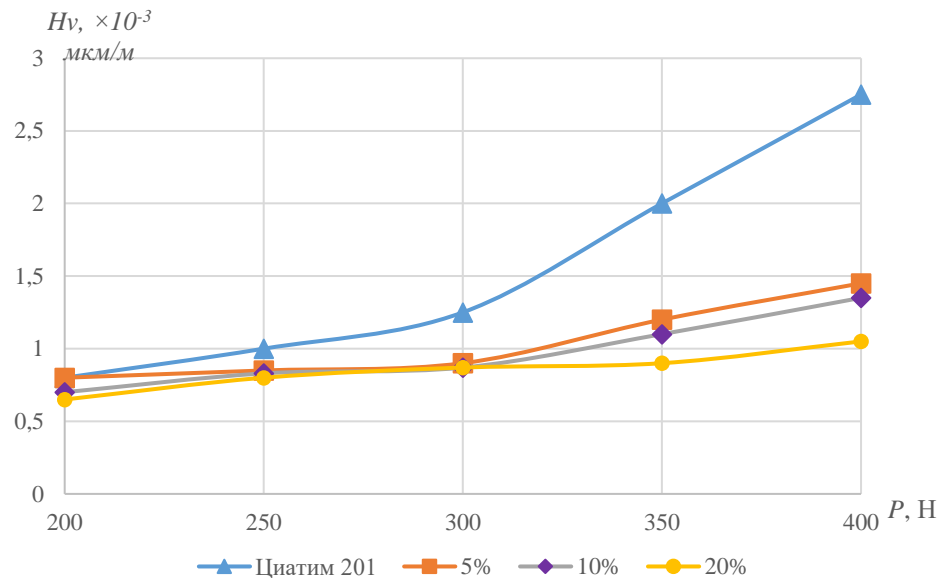


Рисунок 3.10 – Залежність зношування вкладиша від навантаження при додаванні миристату міді до базового мастила

Як показали дослідження, введення присадок на основі міді дозволяють знизити зношування нерухомого зразка. Одночасно, додавання таких присадок, позитивно впливає і на зношування рухомого контрзразка.

Результати дослідження зношування рухомого ролика, показали, що при наявності рідкокристалічних присадок на основі міді зношування зразків суттєво знижується.

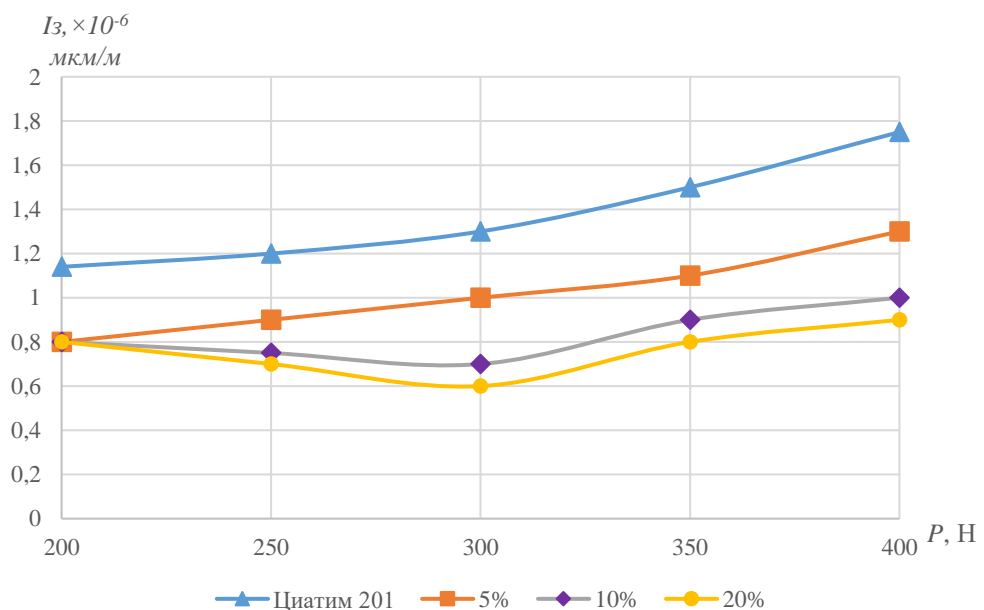


Рисунок 3.11 – Залежність зношування ролика від навантаження при додаванні валерата міді до базового мастила

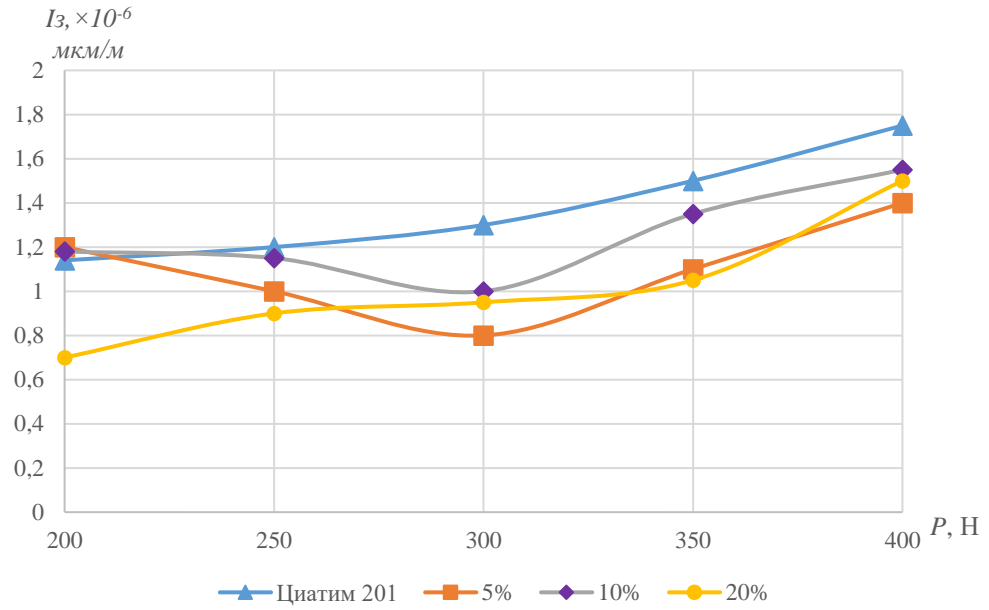


Рисунок 3.12 – Залежність зношування ролика від навантаження при додаванні миристату міді до базового мастила

Залежності зношування елементів трибоспряження в залежності від відсоткового вмісту присадок наведено на рис. 3.13 – 3.

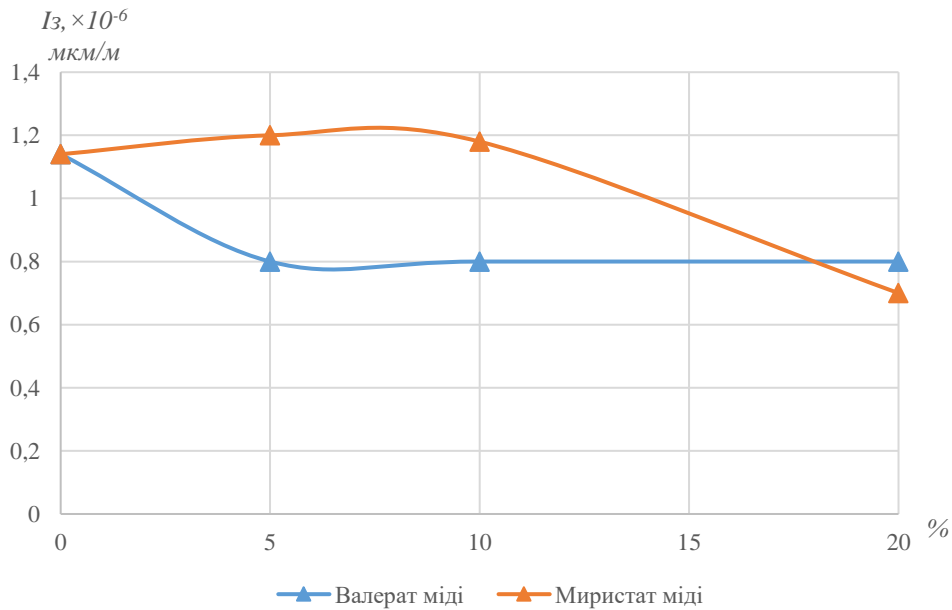


Рисунок 3.13 – Залежність зношування ролика від відсоткового значення присадок основі міді до базового мастила при навантаженні 200 Н

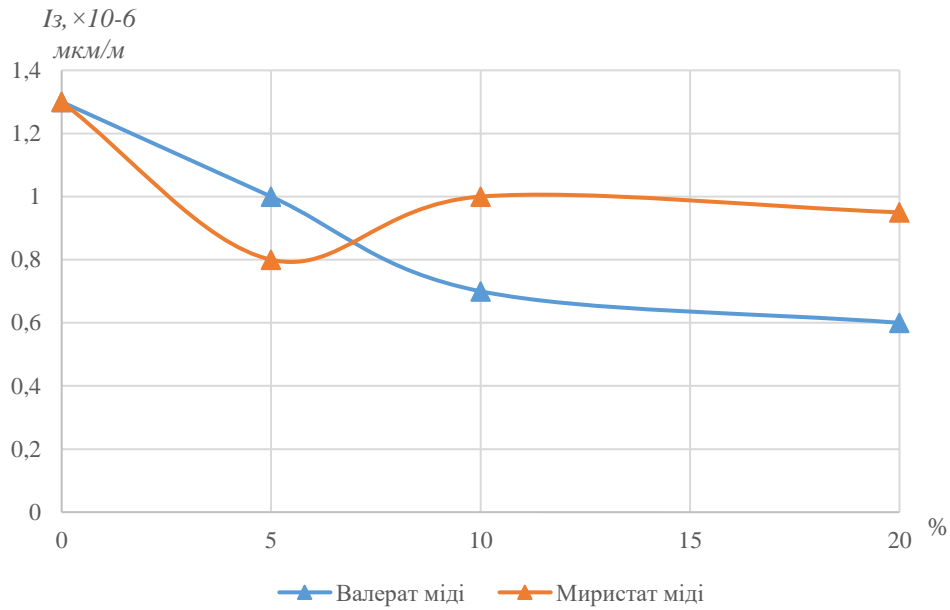


Рисунок 3.14 – Залежність зношування ролика від відсоткового значення присадок основі міді до базового мастила при навантаженні 300 Н

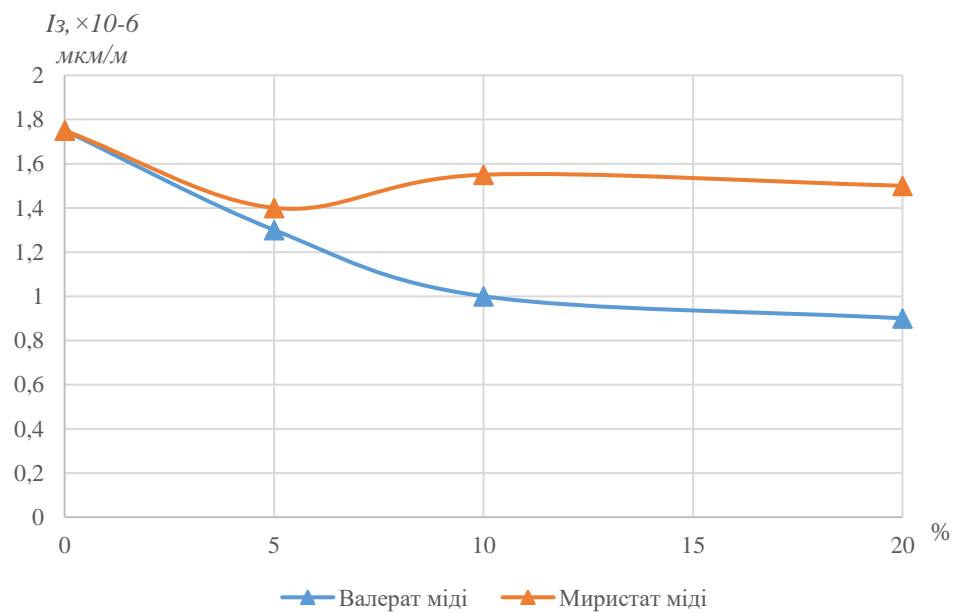


Рисунок 3.15 – Залежність зношування ролика від відсоткового значення присадок основі міді до базового мастила при навантаженні 400 Н

За результатами проведених досліджень щодо визначення зносу зразків можна відзначити, що при введенні досліджених присадок на основі міді, зношування, як рухомого зразка, так і нерухомого зразка має тенденцію до зниження при збільшенні відсоткового вмісту присадки в базовому мастильному матеріалі.

### **Висновки до розділу 3**

Методика досліджень основних триботехнічних властивостей пластичних мастил з використанням присадок на основі міді та визначення їх впливу на зносостійкість вузлів тертя, експериментально підтвердила, що покращення антифрикційних і протизносних характеристик обумовлено можливістю солей міді створювати на поверхнях тертя мастильний шар з особливою структурою, що визначається переходом рідкокристалічних сполук у мезофазу.

Визначено оптимальну концентрацію присадок на основі міді для додавання пластичні мастильні матеріали типу Циатим 201. Під час дослідження було встановлено, що оптимальною є концентрація присадок у матеріалах на базі літєвих мастил (Циатим 201) від 1 до 20 масових часток залежно від конкретного типу радикала присадки та навантаження на зразки.



## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. (Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 №2694-12.)

Організація, забезпечення і контроль трудової діяльності працівників в організації повинен відповідати вимогам Закону України «Про охорону праці» і забезпечувати безпечні методи праці на кожному робочому місці.

Науково-дослідна лабораторія з дослідження мастильних матеріалів знаходиться в навчально-лабораторному корпусі. Використання дослідного обладнання може створювати несприятливі умови роботи в прилеглих приміщеннях оскільки при виконанні дослідження використовується устаткування, що створює підвищений шум і в певний час вібрацію.

Виходячи з переліченого, необхідно здійснити аналіз негативного впливу небезпечних факторів на умови праці і розробити заходи щодо зниження впливу цих факторів при роботі лабораторії.

#### **4.1. Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів**

##### **4.1.1. Аналіз параметрів мікроклімату**

Дослідження мікроклімату в приміщеннях дозволяє перевірити їх за різними параметрами, виявити слабкі місця та небезпечні мікроорганізми. За результатами дослідження даються рекомендації, які допомагають із мінімальними витратами значно покращити оточення. Мікроклімат приміщення складається з кількох параметрів:

- температура повітря;
- температура об'єктів;

- вологість повітря;
- швидкість руху повітря;
- інтенсивність випромінювання тепла.

Людина може тривалий час погано почуватися або хворіти, хоча об'єктивної причини не спостерігається. При цьому сама людина перебуває у некомфортному стані, зі зниженим трудовим потенціалом. Так, підвищена температура викликає втомлюваність, млявість, головний біль. З іншого боку, зайва прохолода проявляється ознобом, загальмованістю, зрештою, раннім відходом з роботи.

**Вплив мікроклімату на організм людини.** Здорове тіло людини має постійну температуру 36,6 °С, яка підтримується системами організму природною терморегуляцією за рахунок конвекції, випаровування або випромінювання. При порушенні комфортного зовнішнього середовища та наближенні до граничних значень тілу важче регулювати температуру. А це позначається на стані здоров'я загалом. Можуть спостерігатися такі порушення:

- Піт – перший спосіб, яким організм знижує температуру, якщо зовнішнє середовище занадто гаряче. Якщо додатково спостерігається висока вологість, прояви даного симптому посилюються. Це призводить до збоїв у роботі серцево-судинної системи. З організму посилено виводяться солі та рідина.
- Попри поширену думку, що волога є найкращим середовищем для розвитку мікроорганізмів, низька вологість призводить до пересихання слизових оболонок. Але зниження рідини погіршує можливості імунної системи. Тому важливо підтримувати нормальний рівень вологості. А якщо це неможливо, використовується спеціальне обладнання.
- Фахівці не рекомендують встановлювати кондиціонер над кріслом. Це правильно, тому що при включеному приладі повітря починає рухатися посилено. Це призводить до посиленої тепловіддачі та гіпотермії,

піднімаються дрібні частинки пилу. Крім того, на старому устаткуванні можуть накопичуватися небезпечні бактерії.

- Довготривале підтримання зниженої температури призводить також до переохолодження та захворювань.

У цьому випадку приміщення, де він переважно знаходиться, визнається потенційно шкідливим чи небезпечним. Обов'язково проводиться аналіз мікроклімату в приміщеннях, що дозволяє виявити будь-які негативні дії.

Серед маси вимог до санітарних норм порушення мікроклімату зустрічається найчастіше. Хоча за ступенем впливу на організм цей фактор можна порівняти із забрудненнями від шуму та вібрації.

З метою профілактики несприятливого впливу мікроклімату повинні бути використані захисні заходи (системи місцевого кондиціонування повітря, повітряні душі, компенсація несприятливого впливу одного параметра мікроклімату зміною іншого, спецодяг та інші засоби індивідуального захисту, приміщення для відпочинку та обігріву, регламентація часу роботи, зокрема перерви у роботі, скорочення робочого дня, збільшення тривалості відпустки, зменшення стажу роботи та ін.).

#### **4.1.2. Аналіз природного та штучного освітлення**

Серед факторів зовнішнього середовища, які впливають на організм людини в процесі праці, світло займає одне з перших місць. Адаптація до освітлення. Адаптація – пристосування ока до зміни умов освітлення. Адаптація – пристосування ока до зрозумілого бачення предметів, які знаходяться на неоднаковій відстані від нього, за рахунок зміни кривизни кришталика.

**Адаптація** – пристосування ока до зміни умов освітлення.

**Акомодація** – пристосування ока до зрозумілого бачення предметів, які знаходяться на неоднаковій відстані від нього, за рахунок зміни кривизни кришталика.

**Конвергенція** – здатність ока при розгляданні близьких предметів займати положення, при якому зорові осі обох очей перетинаються на предметі.

Природне освітлення має важливе фізіолого-гігієнічне значення для працюючих. Воно сприятливо впливає на органи зору, стимулює фізіологічні процеси, підвищує обмін речовин та покращує розвиток організму в цілому. Сонячне випромінювання зігріває та знезаражує повітря, очищуючи його від збудників багатьох хвороб (наприклад, вірусу грипу). Окрім того, природне світло має і психологічну дію, створюючи в приміщенні для працівників відчуття безпосереднього зв'язку з довкіллям. Природному освітленню властиві і недоліки:

- воно непостійне в різні періоди доби та року, в різну погоду;
- нерівномірно розподіляється по площі виробничого приміщення;
- при незадовільній його організації може викликати засліплення органів зору.

На рівень освітленості приміщення при природному освітленні впливають наступні чинники: світловий клімат; площа та орієнтація світлових отворів; ступінь чистоти скла в світлових отворах; пофарбування стін та стелі приміщення; глибина приміщення; наявність предметів, що закривають вікно як зсередини так і з зовні приміщення.

Оскільки природне освітлення непостійне впродовж дня, кількісна оцінка цього виду освітлення проводиться за відносним показником – коефіцієнтом природного освітлення (КПО):

$$\text{КПО} = \frac{E_{\text{вн}}}{E_{\text{зовн}}},$$

де  $E_{\text{вн}}$  – освітленість в даній точці всередині приміщення, що створюється світлом неба (безпосереднім чи відбитим);  $E_{\text{зовн}}$  – освітленість горизонтальної поверхні, що створюється в той самий час ззовні світлом повністю відкритого небосхилу.

Нормовані значення КПО визначаються «Природне і штучне освітлення» (ДБН В.2.5-28-2018). В основі визначення КПО покладено розмір

об'єкта розпізнавання, під яким розуміють предмет, що розглядається або ж його частину, а також дефект, який потрібно виявити.

Розрахунок природного освітлення полягає у визначенні площі світлових отворів (вікон, ліхтарів) у відповідності з нормованим значенням КПО. Розрахунок площі вікон при боковому освітленні проводиться за допомогою наступного співвідношення:

$$100 \frac{S_B}{S_{\Pi}} = \frac{e_H K_3 \eta_B K_{\text{буд}}}{\tau_B \cdot r},$$

де  $S_B$  – площа вікон;  $S_{\Pi}$  – площа підлоги приміщення;  $e_H$  – нормоване значення КПО;  $K_3$  – коефіцієнт запасу;  $\eta_B$  – світлова характеристика вікон;  $K_{\text{буд}}$  – коефіцієнт, що враховує затінення вікон протилежними будівлями;  $\tau_B$  – загальний коефіцієнт світлопропускання;  $r$  – коефіцієнт, що враховує підвищення КПО завдяки світлу, відбитому від поверхонь приміщення та поверхневого шару, що прилягає до будівлі (земля, трава).

**Штучне освітлення** передбачається у всіх виробничих та побутових приміщеннях, де недостатньо природного світла, а також для освітлення приміщень в темний період доби. При організації штучного освітлення необхідно забезпечити сприятливі гігієнічні умови для зорової роботи і одночасно враховувати економічні показники. Найменша освітленість робочих поверхонь у виробничих приміщеннях регламентується ДБН В.2.5-28-2018 і визначається, в основному, характеристикою зорової роботи. Норми носять міжгалузевий характер. На їх основі, як правило, розробляють норми для окремих галузей промисловості.

Освітленість вимірюють люксометром. Люксометр типу Ю-16 складається з двох самостійних приладів: фотоелектричного елемента і гальванометра. При попаданні світлового потоку на фотоелектричний елемент в останньому виникає електрорушійна сила. Величина  $E_{PC}$  залежить від потужності світлового потоку. Фотоелемент з'єднаний двома проводами з гальванометром, шкала якого проградуєрована в люксах (лк).

На корпусі приладу є перемикач на 500, 100 і 20 лк. Щоб уберегти прилад від перевантажень, потрібно перемикач спочатку встановлювати на

500 лк. Для вимірювання освітленості фотоелектричний елемент необхідно покласти або тримати горизонтально на рівні робочого місця. Наприклад, при вимірюванні освітленості в дослідній лабораторії фотоелемент потрібно покласти на стіл.

Для більш точної характеристики освітленості робочого місця вимір слід провести в п'яти точках лабораторії, а в майстерні – на кожному робочому місці. Наприклад, в аудиторії освітленість можна заміряти в чотирьох симетричних точках по діагоналях і в центрі. Якщо приміщення вузьке і довге, освітленість можна заміряти більш ніж в п'яти точках. Це дозволить міркувати про рівномірність освітлення.

#### **4.1.3. Аналіз шуму та вібрації**

Деякі виробничі процеси супроводжуються значним шумом і вібрацією. Зокрема в лабораторії, де виконувалися дослідження мастильних матеріалів, знаходиться багато дослідних установок, які при роботі створюють знаний шум. Деякі з установок циклічні переміщення, що в свою чергу є джерелами, окрім шуму, ще і вібрації. **Джерела інтенсивного шуму і вібрації** – машини і механізми з невірноваженими обертовими масами, а також технологічні установки і апарати, в яких рух газів і рідин відбувається з великими швидкостями і має пульсуючий характер. Сучасний розвиток техніки, оснащення підприємств потужними і швидкими машинами і механізмами призводить до того, що людина постійно піддається впливу шуму все зростаючої інтенсивності. **Підвищення рівня шуму та вібрації** на робочих місцях шкідливо впливає на організм людини. У результаті тривалого впливу шуму порушується нормальна діяльність серцево-судинної і нервової системи, травних і кровотворних органів, розвивається професійна приглухуватість, прогресування якої може привести до повної втрати слуху.

На промислових підприємствах і в дослідних лабораторіях серед виробничих шкідливих факторів одне з провідних місць займає шум і вібрація. Шкідливий вплив підвищеного рівня шуму на організм людини загальновідомий, тому актуальність даної проблеми очевидна.

**Шум.** Для зниження шуму в промислових умовах на підприємствах використовується п'ять методів:

- зменшення шуму в джерелі його виникнення: зміна напрямку випромінювання від джерела шуму;
- будівельно-акустичний: зменшення шуму на шляху його розповсюдження;
- використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Зменшення шуму в джерелі його виникнення найбільш раціональне. Конкретний спосіб зменшення шуму вибирають з урахуванням його походження. Шум, який з'являється від технологічного обладнання, може бути викликаний механічним, аеродинамічним та магнітним процесами. Причинами механічного шуму є вібрація машин і обладнання.

Неврівноваженість деталей, які обертаються, призводить до виникнення вібрацій машин.

Існує багато способів зменшення шуму механічного походження. Наприклад, заміна ударних процесів безударними, штампування – пресуванням, склепування – зварюванням та ін., прямозубих шестерень – косозубими, підшипників кочення – підшипниками ковзання із використанням примусового змащування, чітке балансування обертальних елементів машин.

Зменшення шумів механічного походження повинно бути передбачено вже на стадії проектування шляхом вдосконалення обладнання та технологічних процесів.

Джерелами аеродинамічних шумів є відцентрові та осьові вентилятори, компресорні агрегати та ін. Щоб зменшити аеродинамічний шум, необхідно покращити аеродинамічні характеристики машин та агрегатів, встановити глушники, ізолювати джерела звукопоглинальними матеріалами.

Є два типи глушників: активні і реактивні. Активні глушники вміщують звукопоглинальний матеріал і поглинають звукову енергію, що потрапила в них, перетворюючи її в теплову. Реактивні глушники відбивають енергію і допомагають поглинати звукових хвиль. Реактивні глушники настроюють

на найбільш інтенсивну складову шуму за частотою шляхом розрахунку та розміщення елементів в глушнику. При цьому досягається зниження шуму на 20...30 дБ. Для отримання ефективного зниження шуму у широкому діапазоні частот застосовують комбіновані глушники.

Згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 «Настанова з розрахунку шуму в приміщеннях і на територіях» наведені правила проектування захисту від шуму територій з нормованими рівнями шуму і об'єктів будівництва з застосуванням містобудівних, архітектурно-планувальних заходів та акустичних засобів зниження шуму, норми допустимих рівнів шуму на територіях і в приміщеннях будинків різного призначення, положення щодо проведення акустичного розрахунку і оцінки шумового режиму на територіях і в приміщеннях будинків, вимоги до звукоізоляції внутрішніх і зовнішніх огорожувальних конструкцій житлових і громадських будинків, порядок вибору і застосування планувальних заходів і акустичних засобів для зниження рівнів шуму до величин, встановлених санітарними нормами.

Положення цих будівельних норм встановлюють мінімальні вимоги до акустичних показників об'єктів будівництва. За узгодженням із замовником (споживачем, інвестором) рівень вимог щодо звукоізоляції огорожувальних конструкцій і допустимих рівнів шуму для об'єктів нового будівництва може бути підвищеним у порівнянні з вимогами цих будівельних норм.

**Електромагнітний шум** виникає при взаємодії феромагнітних мас і змінних магнітних полів. Цей шум характерний для обладнання із електроприводом. Зниження шуму електромагнітного походження досягається шляхом конструктивних змін в електричних машинах.

Другий метод – заміна напрямку випромінювання – застосовується при проектуванні установок із направленим випромінюванням. Установки слід розташовувати таким чином, щоб напрямок найбільш інтенсивного випромінювання не був орієнтований в бік робочих місць.

Захист від шуму будівельно-акустичним методом потрібно проектувати на підставі акустичного розрахунку, який дозволяє визначити в розрахункових



точках очікувані рівні звукового тиску та співставити з нормованими. Визначення рівней звукового тиску в розрахункових точках проводять згідно зі ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму». Для зниження шуму всередині промислових приміщень проводять їх акустичну обробку, яка полягає в розміщенні на внутрішніх поверхнях приміщень звукопоглинальних матеріалів. Ефект від їх використання досягається за рахунок зменшення енергії звукових хвиль. Як звукопоглинальні матеріали використовують супертонке скловолокно, капронове волокно, мінеральну вату, мінераловатні плити та ін. При виборі матеріалу для акустичної обробки приміщень потрібно враховувати частотні характеристики шуму в приміщеннях.

## **4.2. Розробка заходів з поліпшення умов праці**

### **4.2.1. Розробка заходів з нормалізації параметрів шуму**

#### **Розрахунок системи звукопоглинання**

У лабораторному приміщенні планується зробити звукопоглинальне облицювання стелі та стін. Площа стін –  $S_{\text{стін}}$ , площа стелі –  $S_{\text{стелі}}$ , площа підлоги –  $S_{\text{стелі}}$ . Середній коефіцієнт звукопоглинання в приміщенні до облицювання дорівнює  $\alpha_{\text{сер1}} = 0,1$ , коефіцієнт звукопоглинання використаного облицювання  $\alpha_2 = 0,9$ , рівень шуму у приміщенні  $L_1 = 73$  дБ.

Вихідні дані для облаштування звукопоглинального облицювання:

$$S_{\text{стін}} = 83,7 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{стелі}} = S_{\text{підл}} = 45 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{вікон}} = 8,74 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{дверей}} = 3,2 \text{ м}^2.$$

Зниження рівня шуму в приміщенні як наслідок використання облицювання з більш високим коефіцієнтом звукопоглинання, дБ, можна визначити за формулою

$$\Delta L_{\text{обл}} = 10 \lg \frac{B_2}{B_1}, \quad (4.1)$$

де  $B_1$  та  $B_2$  – сталі приміщення відповідно до та після облицювання.

У загальному випадку

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_{\text{сер}}}, \quad (4.2)$$

де  $A$  – еквівалентна площа звукопоглинання,  $A = \alpha_{\text{сер}} \cdot S_{\text{пов}}$ ;

$\alpha_{\text{сер}}$  – середній коефіцієнт звукопоглинання внутрішніх поверхонь приміщення площею  $S_{\text{пов}}$ ;

$$S_{\text{пов}} = S_{\text{стелі}} + S_{\text{підл}} + S_{\text{стін}} - S_{\text{вікон}} - S_{\text{дверей}},$$

$$S_{\text{пов}} = 45 + 45 + 83,7 - 8,74 - 3,2 = 161,76 \text{ м}^2.$$

За таких означень стала приміщення до облицювання складає

$$B_1 = \frac{\alpha_{\text{сер1}} \cdot S_{\text{пов}}}{1 - \alpha_{\text{сер1}}} \quad (4.3)$$

$$B_1 = \frac{0,1 \cdot 161,76}{1 - 0,1} = 17,97.$$

При визначенні сталої приміщення після облицювання треба звернути увагу на зміну середнього коефіцієнта звукопоглинання. До облицювання він складав для всіх внутрішніх поверхонь за умовами задачі  $\alpha_{\text{сер1}} = 0,1$ . Після облицювання підлога залишилась з попереднім коефіцієнтом звукопоглинання ( $\alpha_{\text{сер}} = 0,1$ ), а у стелі та стін він буде дорівнювати  $\alpha_2 = 0,9$ . Середній коефіцієнт звукопоглинання після облицювання можна визначити як середньозважену величину від площі внутрішніх поверхонь, що мають різні коефіцієнти звукопоглинання:

$$\alpha_{\text{сер2}} = \frac{(S_{\text{пов}} - S_{\text{підл}}) \cdot \alpha_2 + S_{\text{підл}} \cdot \alpha_{\text{сер1}}}{S_{\text{пов}}}$$

$$\alpha_{\text{сер2}} = \frac{(161,76 - 45) \cdot 0,9 + 45 \cdot 0,1}{161,76} = \frac{109,58}{161,76} = 0,68$$

Тоді стала приміщення після облицювання складає:

$$B_2 = \frac{(S_{\text{пов}} - S_{\text{підл}}) \cdot \alpha_2 + S_{\text{підл}} \cdot \alpha_{\text{сер1}}}{1 - \alpha_{\text{сер2}}},$$

$$B_2 = \frac{(161,76 - 45) \cdot 0,9 + 45 \cdot 0,1}{1 - 0,68} = \frac{109,58}{0,32} = 342,44$$

Враховуючи попередні розрахунки, визначаємо зниження рівня шуму після облицювання за формулою 4.1:

$$\Delta L_{\text{обл}} = 10 \lg \frac{B_2}{B_1} = 10 \lg \frac{342,44}{17,97} = 10 \lg 19 = 10 \cdot 1,28 = 12,8.$$

Рівень шуму в приміщенні після облицювання, дБА, визначається за формулою і становить:

$$L_2 = L_1 - \Delta L_{\text{обл}}$$

$$L_2 = 73 - 12,8 = 60,2 \text{ дБ.}$$

Порівнюючи рівень шуму в приміщенні після облицювання з допустимим ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 Настанова з розрахунку шуму в приміщеннях і на територіях в таблиці 1 для наукових-дослідних приміщень, отримане значення задовольняє вимогам максимального рівня звуку для даного класу приміщень  $L_{A\text{макс доп}} = 65 \text{ дБА}$ ,  $L_2 < L_{A\text{макс доп}}$ .

### 4.3. Пожежна безпека

Вогонь здавна супроводжує людину, дає тепло, допомагає зберігати від псування продукти харчування, очищати поля від бур'янів, отримувати метал. Вміння користуватися вогнем дало людині почуття незалежності від циклічної зміни тепла та холоду, світла і темряви. Вогонь є важливим емоційним символом, соціальним згуртовуючим чинником. Однак вогонь, що вийшов з-під контролю, здатний спричинити значні руйнівні і навіть смертоносні наслідки.

**Пожежа** – процес неконтрольованого горіння поза визначеним для цього місцем, що поширюється у часі і просторі.

Пожежа знищує матеріальні цінності, загрожує життю та здоров'ю людей, довкіллю. Проблема пожеж стає глобальною за своїми масштабами, торкаючись не тільки національних, а й міжнародних інтересів. Про це свідчать катастрофа на Чорнобильській АЕС, тривалі пожежі на нафтових об'єктах Іраку як наслідок війни у Перській затоці, горіння великих лісових масивів. Щорічно на Землі виникає 7 млн пожеж. Згідно зі статистичними прогнозами, у світі протягом року може загинути на пожежах 225 тис. осіб, 2 млн 250 тис. – отримати каліцтво, 4,5 млн – тяжкі опікові травми.

**Пожежна безпека** – стан об'єкта, за якого з регламентованою ймовірністю унеможливаються виникнення і розвиток пожежі та вплив на людей її небезпечних чинників, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

Основними напрямками забезпечення пожежної безпеки є усунення умов виникнення пожежі та мінімізація її наслідків. Пожежа виникає за одночасної наявності горючої речовини, джерела займання та окисника (кисню, повітря), що разом утворюють горюче середовище. Якщо вилучити або заблокувати будь-який із цих чинників, то пожежі не буде. На цьому ґрунтуються основні напрями попередження пожеж та способи пожежогасіння.

У приблизно 90% випадків до пожеж призводять: необережне поводження з вогнем; порушення правил монтажу та експлуатації електроустаткування і побутових електроприладів; порушення правил монтажу та експлуатації приладів опалення і теплогенеруючих установок; підпали; пустощі дітей із вогнем; несправність виробничого устаткування.

Отже, забезпечення пожежної безпеки є обов'язковою складовою виробничої та іншої діяльності посадових осіб, працівників підприємств, установ, організацій і підприємців. Органи державного пожежного нагляду контролюють стан пожежної безпеки, вдаючись до різних санкцій (відмова у виданні дозволу на початок роботи або оренду приміщень, штрафи, призупинення експлуатації приміщень, споруд, устаткування, об'єктів тощо).

Відповідно до Правил пожежної безпеки в Україні до основних організаційних заходів із її забезпечення належать:

- визначення обов'язків посадових осіб щодо гарантування пожежної безпеки;
- призначення відповідальних за пожежну безпеку окремих будівель, споруд, приміщень, ділянок тощо, технологічного та інженерного устаткування, а також за утримання та експлуатацію наявних технічних засобів протипожежного захисту;

- встановлення на кожному підприємстві (установі, організації) відповідного протипожежного режиму;
- розроблення і затвердження загальнооб'єктової інструкції про заходи пожежної безпеки та відповідних інструкцій для всіх вибухопожежонебезпечних та пожежонебезпечних приміщень, організація вивчення цих інструкцій працівниками;
- розроблення планів (схем) евакуації людей на випадок пожежі;
- встановлення порядку (системи) оповіщення людей про пожежу, ознайомлення з ним усіх працівників;
- визначення категорій будівель та приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою відповідно до вимог чинних нормативних документів, встановлення класів зон за Правилами улаштування електроустановок;
- забезпечення територій, будівель та приміщень відповідними знаками пожежної безпеки, табличками із зазначенням номера телефону та порядку виклику пожежної охорони;
- створення та організація роботи пожежно-технічних комісій, добровільних пожежних дружин і команд.

Комплексна реалізація цих заходів дає змогу запровадити протипожежний режим.

**Протипожежний режим** – комплекс загальнообов'язкових норм поведінки, правил виконання робіт та експлуатації об'єкта (виробу), спрямованих на гарантування його пожежної безпеки.

Він є основою системи пожежної безпеки – комплексу організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на запобігання пожежі та збиткам від неї.

**Пожежобезпека об'єкта** – стан об'єкта, за якого з регламентованою ймовірністю виключається можливість виникнення і розвитку пожежі, а також забезпечується захист матеріальних цінностей. Рівень забезпечення пожежної безпеки – кількісна оцінка попереджених збитків у разі можливої пожежі.

Ймовірність виникнення пожежі (вибуху) в пожежо- небезпечному об'єкті визначають на етапах його проектування, будівництва й експлуатації. Для оцінювання ймовірності виникнення пожежі (вибуху) на діючих підприємствах або об'єктах, що споруджуються, у будівлях необхідно мати статистичні дані про різні пожежовибухонебезпечні події. Ймовірність виникнення пожежі (вибуху) у проєктованих об'єктах визначають на підставі показників надійності елементів (складових) об'єкта, що дає змогу обчислити ймовірність ситуацій, які можуть призвести до реалізації пожежовибухонебезпечних подій.

Аналіз пожежної безпеки полягає у визначенні наявності горючих речовин і можливих джерел запалювання, ймовірних шляхів поширення пожежі та необхідних засобів пожежогасіння.

Теплові джерела запалювання різноманітні, наприклад, навіть звичайний графин із водою, залишений на підвіконні, може стати оптичною лінзою і запалити порт'єру. Однак до основних джерел запалювання належать:

- відкритий вогонь;
- розжарені продукти горіння та нагріті ними поверхні;
- теплові прояви електричної, механічної, сонячної та ядерної енергій, а також хімічних реакцій;
- інші джерела запалювання.

Багато пожеж виникає внаслідок несправностей та порушень правил експлуатації електротехнічних, електронагрівальних приладів, пристроїв і устаткування, від коротких замикань в електричних ланцюгах; перегрівання та займання речовин і матеріалів, розташованих близько до нагрітого електроустаткування; струмових перевантажень проводів та електричних машин; великих перехідних опорів тощо.

Аналіз пожежної безпеки будівель, приміщень, технологічного устаткування тощо повинен дати відповіді на питання: де, за яких умов і в який спосіб може виникнути пожежа, як вона розвиватиметься, до чого це призведе. Кінцевою метою такого аналізу має бути максимально можливе виключення

потенційних джерел запалювання, зведення до мінімуму горючого середовища, встановлення такого рівня протипожежного режиму, за якого ймовірність виникнення пожежі та масштаби її наслідків будуть найменшими.

Методика аналізу пожежної небезпеки зводиться до виявлення та оцінювання:

- потенційних та наявних джерел запалювання;
- умов формування горючого середовища;
- умов виникнення контакту джерел запалювання та горючого середовища;
- умов і причин поширення вогню в разі виникнення пожежі;
- наявності та масштабів імовірної пожежі, загрози життю і здоров'ю людей, навколишньому середовищу та матеріальним цінностям;
- рівня працездатності систем протипожежного захисту та протипожежної стійкості кожної ділянки і об'єкта загалом;
- порушень протипожежного режиму, норм і правил пожежної безпеки.

Аналіз пожежної небезпеки є основою для розроблення всіх видів протипожежних заходів. Тому повнота, своєчасність та якість його проведення істотно впливають на загальний протипожежний стан і організацію пожежно-профілактичної роботи.

Оскільки повністю виключити імовірність виникнення пожежі неможливо, то необхідно використовувати стратегію обмеження її наслідків, вдаючись до таких заходів:

- забезпечення вогнестійкості будівель та споруд;
- своєчасна евакуація людей та відповідність чинним нормам шляхів евакуації;
- створення умов для ефективного гасіння пожежі;
- обмеження поширення пожежі;
- ліквідація горіння.

Вказані заходи реалізують через систему забезпечення протипожежного захисту.

Комплекс організаційно-технічних, економічних заходів, норм пожежної безпеки повинен забезпечувати впровадження сучасних ефективних заходів та засобів, а також підтримання пожежної безпеки на необхідному рівні. Цей комплекс передбачає:

- організацію пожежної охорони відповідного виду (згідно із Законом України "Про пожежну безпеку" діють чотири види пожежної охорони: державна, відомча, місцева та добровільна);
- облік та аналіз даних про пожежі та збитки від них;
- паспортизацію речовин, матеріалів, виробів, технологічних процесів, будівель та споруд об'єктів в напрямі забезпечення пожежної безпеки;
- збирання, систематизацію та аналіз даних (вітчизняних та зарубіжних) про досвід і перспективні вирішення питань щодо забезпечення пожежної безпеки;
- організацію навчання правилам пожежної безпеки працівників за місцем роботи та населення за місцем проживання;
- розроблення та реалізацію норм і правил пожежної безпеки, інструкцій про заходи поводження з пожежонебезпечними речовинами та матеріалами, дотримання протипожежного режиму і порядок дій у разі пожежі;
- облік та аналіз витрат на забезпечення пожежної безпеки, фінансування відповідних заходів;
- матеріально-технічне забезпечення систем запобігання пожежам та протипожежного захисту;
- розроблення прогнозів і планів забезпечення пожежної безпеки, контроль та координування їх виконання;
- виготовлення і застосування наочних засобів протипожежної пропаганди щодо забезпечення пожежної безпеки;
- нормування кількості людей на об'єкті за умовами їх безпеки у разі пожежі;
- встановлення порядку зберігання речовин та матеріалів, методи гасіння яких залежать від їх фізико-хімічних та пожежонебезпечних властивостей;



- розроблення заходів, дій адміністрацій об'єктів, робітників, службовців та населення у разі пожежі та організації евакуації;
- забезпечення необхідної кількості, розміщення та обслуговування пожежної техніки, яка має сприяти ефективному гасінню пожежі та бути безпечною для природи і людей;
- залучення громадськості та широких верств населення до питань забезпечення пожежної безпеки.

Гарантування пожежної безпеки є складником виробничої та іншої діяльності посадових осіб, працівників підприємств, установ, організацій та підприємців. Це відображають у трудових договорах (контрактах) та статутах підприємств, установ та організацій.

#### **Висновки до розділу 4**

У результаті проведеного аналізу небезпечних та шкідливих виробничих факторів у приміщенні науково-дослідної лабораторії встановлено небезпечну дію шуму, вібрації, випарів мастильних матеріалів. Для зменшення несприятливого впливу на персонал, який виконує наукові дослідження, обробку їх даних, здійснення навчальної і адміністративної діяльності в прилеглих приміщеннях та при подальшій експлуатації науково-дослідної лабораторії, де розташовані зазначені робочі місця розроблені заходи з поліпшення мікроклімату, освітленості робочого простору лабораторії, зниження шуму і забезпечення пожежної безпеки.

Також проведено проектний розрахунок параметрів для облаштування звукопоглинального облицювання.

Запропоновані заходи дозволять зменшити ризик виникнення професійних захворювань та травмування на зазначеному об'єкті дослідження.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

#### 5.1 Екологічна небезпека для навколишнього середовища

Виробнича діяльність людини супроводжується утворенням великої кількості відходів, що викидаються в біосферу Землі у вигляді газів, рідин і твердих залишків. Значна частина цих відходів є шкідливою не тільки для людини, а й для всього живого [1]. Природне середовище не встигає засвоювати, переробляти та нейтралізувати величезну масу цих речовин, що надходять у біосферу в зростаючому обсязі.

Людство має інформацію про небезпеку, яка загрожує навколишньому середовищу, але до останнього часу багато з нас вважає її неприємним, але неминучим породженням цивілізації й гадає, що ми ще встигнемо впоратися з усіма труднощами, що виникли. Проте останні десятиріччя переконливо показали, що потрібно діяти вже зараз, що час вимагає створення економічно чистих технологій і машин, розроблення методів інженерно-екологічної профілактики, випереджального планування природоохоронних заходів.

Екологічні дослідження, показали, що зростаючий руйнівний вплив антропогенних факторів на навколишнє середовище привело її на грань кризи. Найбільш загрозливий характер прийняла проблема забруднення повітря, води й ґрунту відходами промисловості й транспорту.

Сучасні авіапідприємства ЦА є найбільшими джерелами забруднення.

Повітряні судна є нестационарними джерелами викиду шкідливих речовин в атмосферу.

В нашій державі вживаються заходи щодо зниження викидів в атмосферу шляхом оснащення джерел викидів шкідливих речовин пилогазоочисними установками. Здійснюється заміна або реконструкція морально та фізично застарілих пилогазоочисних установок, впровадження мало- та безвідходних технологічних процесів та інше. Одне з провідних місць

у забрудненні атмосфери займає транспорт. Так, більше 40% оксиду вуглецю, 46% вуглеводнів і близько 30% окислів азоту від загальної кількості цих речовин, які потрапляють в атмосферу, припадає на транспорт. Загальний обсяг шкідливих викидів автотранспорту - 2,7 млн. тонн на рік.

Розроблено ряд нормативно-правових актів для збереження нормального екологічного стану навколишнього середовища. Серед них є:

1. Закон України “Про охорону навколишнього середовища” [2], що визначає такі головні принципи охорони довкілля:

1) пріоритетність вимог екології безпеки, обов’язковість дотримання екологічних стандартів, нормативів і лімітів використання природних ресурсів;

2) гарантування екологічно безпечного середовища для життя і здоров’я людини;

3) екологізація матеріального виробництва на засадах комплексного вирішення питань охорони навколишнього середовища.

2. Згідно статті 8 Закону України “Про основи національної безпеки України” [3] основними напрямками державної політики з питань національної безпеки України в екологічній сфері є:

1) здійснення комплексу заходів, які гарантують екологічну безпеку ядерних об’єктів і надійний радіаційний захист населення та довкілля, зведення до мінімуму впливу наслідків аварії на Чорнобильській АЕС;

2) впровадження у виробництво сучасних екологічно безпечних, ресурсо- та енергозберігаючих технологій, підвищення ефективності використання природних ресурсів, розвиток технологій переробки та утилізації відходів;

3) поліпшення екологічного стану річок України, насамперед басейну річки Дніпро, та якості питної води;

4) стабілізація та поліпшення екологічного стану в містах і промислових центрах Донецько-Придніпровського регіону;

5) недопущення неконтрольованого ввезення в Україну екологічно небезпечних технологій, речовин і матеріалів, збудників хвороб, небезпечних для людей, тварин, рослин, організмів;

б) реалізація заходів щодо зменшення негативного впливу глобальних економічних проблем на стан екологічної безпеки України, розширення її участі у міжнародному співробітництві з цих питань.

На сьогоднішній день будь-яке виробництво потребує великих затрат енергії, вироблення якої приводить до забруднення навколишнього середовища. Отже, при підготовці виробництва слід вирішити таке питання:

- забезпечення виробничого процесу потрібною енергією, але щоб її кількість була якомога меншою.

Цього можна досягти завдяки впровадженню нових технологій та обладнання.

Енергозберігаючі технології – це метод виробництва продукції при раціональному використанні енергії, що дозволяє одночасне зниження енергетичного навантаження на навколишнє середовище і кількість енергетичних відходів, які є результатом виробництва і експлуатації виробленого продукту.

Використання енергоефективного обладнання сприяє зниженню загального споживання енергії, але може скластись ситуація, коли вартість обладнання буде значно вище отриманого енергозбереження [4]. Тому перед впровадженням нових технологій обов'язково потрібно виконувати економічний аналіз ефективності застосування цих технологій і тільки на основі даного аналізу приймати рішення про його застосування.

Необхідно проводити аналіз ефективності використання енергії на об'єкті (в даному випадку - цеху), який може вирішити наступні питання:

а. розрахувати об'єм споживання енергії різними споживачами в межах об'єкту;

б. розподілити фінансові витрати на енергію пропорційно між споживачами;

- c. порівняти енергоспоживання з випуском продукції;
- d. визначити відхилення від норми відносно споживання енергії.

В основі будь-якого виробництва лежить проблема забезпечення енергією. Промисловість майже повністю базується на енергії викопного палива та частково атомній енергетиці. Енергетичні потреби промислового виробництва дуже великі, бо витрачаються не тільки на пряме виробництво, а й на роботи з відновлення порушень у навколишньому середовищі, з витратами на охорону здоров'я і т.п.

Інтенсивний розвиток електроніки та радіотехніки викликав забруднення природного середовища електромагнітним випромінюванням (полями). Головними їх джерелами є радіо-, телевізійні і радіолокаційні станції, високовольтні лінії електропередачі, електротранспорт. Поблизу кожного обласного центру, багатьох районних центрів, великих міст розташовані телевізійні центри, або ретранслятори, радіоцентри, засоби радіозв'язку різного призначення.

Рівень електромагнітних випромінювань у таких районах (діапазон радіочастот об'єктів може змінюватися від 50 – 100 Гц до 100 ГГц) часто перевищує допустимі гігієнічні норми й дуже шкодить здоров'ю людей, що мешкають поруч.

## **5.2 Основні тенденції утилізації відпрацьованих мастильних матеріалів**

Проблеми екологічної безпеки застосування мастильних матеріалів невід'ємні від утилізації відпрацьованих мастильних матеріалів (ВММ), які в даний час є одними з найпоширеніших техногенних відходів, що негативно впливають на всі об'єкти довкілля – атмосферу, ґрунт та воду [5]. Тільки забруднення вод відпрацьованими нафтовими маслами становить 20% від загального техногенного забруднення, або 60% забруднення нафтопродуктами. Тут розглянуто основні напрями вирішення проблеми, описано найважливіші технологічні процеси всіх видів ВММ.

Необхідність утилізації ВММ в даний час ні в кого не викликає сумнівів, оскільки їх поховання та знищення (в основному – шляхом спалювання) породжують часом ще більші екологічні проблеми, ніж самі ВММ, і при значних витратах не дозволяють повторно використовувати цінну вторинну сировину, що не вигідно вже з економічного погляду. При цьому дуже важливо, щоб процеси утилізації власними силами не становили суттєвої загрози біосфері.

Як уже зазначалося, найбільш раціональним напрямком у вирішенні сучасних екологічних проблем є практична реалізація концепції запобігання забруднення, оскільки колосальні витрати на усунення забруднень, що виникли, і неможливість передбачати і усунути всі їх наслідки цілком і повністю виправдовують розробку нових більш безпечних технологій і створення принципово нового.

Як і в основних галузях промисловості, в галузі переробки вторинної сировини дедалі більше фахівців висловлюється на користь відмови від традиційних методів боротьби із забрудненнями шляхом встановлення очисного обладнання наприкінці технологічного ланцюжка. Висувається завдання розв'язання екологічних проблем у процесі виробництва, на основі нових технологічних рішень.

Ідеальне втілення цієї думки – створення промислових підприємств із мінімальними викидами. Оскільки виникнення відходів у промисловому виробництві уникнути не можна, оскільки неможливо уникнути термодинамічно обумовлених втрат речовини та енергії та повністю переробити сировину в бажану продукцію, створення підприємств такого роду передбачає систему технологічних процесів, що забезпечують комплексне використання сировини та енергії, коли побічні продукти та відходи одного процесу є сировиною чи реагентами іншого. Комплексна переробка сировини включає уловлювання, виділення та переробку всіх відходів у готову продукцію або екологічно безпечні речовини, придатні до безпечного захоронення.

Комплексне використання сировини – найбільш повне, економічно та екологічно виправдане використання всіх корисних компонентів, що містяться у сировині, а також у відходах виробництва; при цьому передбачається максимальний вихід продукції на кожній стадії переробки, що підвищує ефективність виробництва та зменшує утворення відходів.

Беручи до уваги, що термін «безвідходна або екологічно нешкідлива (чиста) технологія», який існує в даний час, навряд чи слід вважати вдалим. Будь-яка технологія спочатку і об'єктивно протиставлена біосфері і тому не може не становити для неї загрози (більшою чи меншою мірою).

Найбільш прийнятним є термін «маловідходна технологія» – такий спосіб виробництва продукції, при якому шкідливий вплив на навколишнє середовище не перевищує рівня, допустимого санітарно-гігієнічними нормами, при цьому з технічних, економічних, організаційних або інших причин частина сировини та матеріалів переходить у відходи, що не використовуються, а прямують на тривале зберігання або поховання.

Найважливіша умова організації маловідходного виробництва – наявність системи знешкодження відходів, що не використовуються, насамперед токсичних. Вплив відходів на довкілля не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій.

Розробляються такі шляхи створення маловідходних технологій:

- 1) комплексне перероблення сировини;
- 2) розробка принципово нових процесів та схем отримання відомих видів продукції;
- 3) проектування безстічних та замкнутих систем водоспоживання;
- 4) рекуперація промислових відходів;
- 5) розробка та створення територіально-промислових комплексів із замкнутою структурою матеріальних потоків сировини та відходів.

Екологічно безпечне використання ВММ передбачає їх переробку з отриманням товарних продуктів різного призначення (палив, масел, мастильно-охолоджуючих технічних засобів (МОТЗ), пластичних мастил,



консерваційних матеріалів та інших.). Аналіз сучасного стану питання свідчить про її фактичну невирішеність як теорії, так і практично. Виняток становлять лише деякі процеси переробки та напрямки їх використання. Однак у всьому світі безперечна тенденція до маловідходної утилізації ВММ, обумовлена зростанням кількості екологічних проблем.

У сучасній технічній літературі під час розгляду питання відновлення якості ВММ використовують різні терміни – очищення, регенерація, вторинна переробка. Тому важливо чітко розмежувати призначення та сфери застосування цих процесів. Під терміном «очищення» будемо мати на увазі безперервне або періодичне очищення працюючого мастильного матеріалу в діючому обладнанні, що здійснюється за допомогою відстійників, фільтрів, центрифуг та адсорберів. Таке очищення далеко не завжди призводить до отримання продукту, що відповідає за якістю рівню свіжого мастильного матеріалу. Часто це не потрібно за умовами експлуатації. Такі заходи сприяють як раціональній утилізації ВММ, а й продовженню терміну служби мастильних матеріалів.

Термін "регенерація" відноситься до відновлення якості відпрацьованого мастильного матеріалу до рівня свіжого. Його використовують стосовно очищення мастильних матеріалів (в основному не містять присадок), попередньо злитих з обладнання. При цьому властивості відпрацьованих продуктів повністю відновлюються і їх можна використовувати за прямим призначенням. Для проведення регенерації застосовують складніші фізичні та хімічні процеси – коагуляцію, сірчаноокислотне та адсорбційне очищення. Часто регенерацію здійснюють на місці споживання мастильного матеріалу.

У разі переробки сумішей різних відпрацьованих нафтових масел (ВМ), що збираються централізовано з промислових підприємств, використовують термін «вторинна переробка». З такої сировини можливе отримання базових олій різного складу та призначення. Вторинна переробка здійснюється тільки на великих спеціалізованих підприємствах і передбачає застосування комплексу

процесів – вакуумної перегонки, екстракції, гідроочищення та деяких інших фізичних та хімічних методів.

Основне місце у вирішенні проблеми займають ОМ, МОТЗ. Починає розвиватися і галузь очищення та регенерації відпрацьованих синтетичних масел. По утилізації відпрацьованих пластичних мастил відома значна кількість експериментальних робіт, проте їхнє практичне використання ускладнено через цілий ряд факторів. Найважливішою проблемою стає утилізація відпрацьованих екологічнобезпечних мастильних матеріалів на основі синтетичних масел та природних жирів.

Провідне місце у питаннях утилізації ВММ належить країнам Західної Європи, де створено високорозвинені галузі їхнього переробки. Ряд технологічних процесів продовжує удосконалюватися, що пов'язано, головним чином, зі зростанням законодавчих вимог до екологічних властивостей товарних продуктів та охорони навколишнього природного середовища. У той самий час початку 90-х гг. у світі відзначено практичну відсутність нових розробок технологій – насамперед вторинної переробки ОМ, що, ймовірно, можна пояснити досягнутою стабілізацією техносфери у цій галузі, тобто практичної неможливістю створення принципово нових схем без радикальних переворотів чи принципово нових відкриттів у фундаментальній науці.

Певний розвиток технологій переробки відзначається переважно з метою знешкодження екологічнобезпечних компонентів ВММ.

Розрахунок вартості елементів (відповідних агрегатів/деталей/рідин) у перерахунку на вторинну сировину (для вуглеводнів спалювання).

### **5.3 Розрахунок викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу при спалюванні відпрацьованих мастильних матеріалів**

Для визначення даних про викиди забруднюючих речовин та парникових газів, як правило, застосовується комбінація двох основних методів:

- постійних вимірювань концентрацій забруднювальних речовин у димових газах енергетичних установок;
- розрахункових методів за даними про витрати та склад використаного палива і характеристики енергетичних та газоочисних установок.

Коефіцієнти викидів визначаються респондентом на підставі нормативно-правових документів, визначених Міністерством екології та природних ресурсів, яке відповідно до Положення про Міністерство екології та природних ресурсів України, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 21 січня 2015р. № 32, веде державний кадастр викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, забезпечує нормативно-правове регулювання у сфері охорони атмосферного повітря, зокрема з питань визначення показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин, методик розрахунку антропогенних викидів джерелами.

З метою підготовки до складання податкових декларацій з екологічного податку за викиди в атмосферне повітря суб'єктам господарювання, які не отримали дозволу на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря або не перебувають на державному обліку за обсягами потенційних викидів забруднюючих речовин та парникових газів у атмосферу та використовують непромислові установки для спалювання органічного палива з метою обігрівання приміщень, пропонуємо використовувати таку спрощену формулу розрахунку валового викиду  $j$ -ї забруднюючої речовини  $M_j$  (т), що надходить в атмосферу з димовими газами енергетичної установки в середньому за рік:

$$M_j = 10^{-6} k_j B_i Q_i^r;$$

де  $M_j$  – зведений викид  $j$ -ї забруднюючої речовини під час спалювання  $i$ -го палива за звітний період, т;

$k_j$  – показник емісії  $j$ -ї забруднюючої речовини для  $i$ -го палива (г/ГДж);

$B_i$  – витрата  $i$ -го палива за період (т);

$Q_i^r$  – нижча робоча теплота згоряння  $i$ -го палива (МДж/кг).

Для обчислення обсягів викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу при спалюванні ВММ пропонується використовувати показники емісії забруднюючих речовин та нижчу.

Вихідні дані для проведення розрахунку обсягів та складу викидів забруднюючих речовин та парникових газів в атмосферу при спалюванні ВММ:

- Кількість ВММ, що спалюється,  $V$  (т) при роботі печей становлять:  
 $V = 12$  т;
- нижча робоча теплота згорання палива —  $Q_{\text{ВММ}} = 39,48$  МДж/кг.

Показники емісії забруднюючих речовин наведені в таблиці 5.1.:

Таблиця 5.1. – Показники емісії забруднюючих речовин

Назва показника емісії	Умовне позначення	Значення показника, г/ГДж
Оксиди азоту	$k_{\text{NO}_x}$	64,311
Оксид вуглецю	$k_{\text{CO}}$	318,4
Діоксид вуглецю	$k_{\text{CO}_2}$	76 66,26
Оксид азоту	$k_{\text{N}_2\text{O}}$	0,6
Метан	$k_{\text{CH}_4}$	3,0
Неметанові леткі органічні речовини (НМЛОР)	$k_{\text{НМЛОР}}$	10,0
Суспендовані тверді частинки (сажа)	$k_{\text{саж}}і$	405,81
Сірчистий ангідрид	$k_{\text{SO}_2}$	500,26

Зведений викид оксидів азоту:

$$M_{\text{NO}_x} = 10^{-6} k_{\text{NO}_x} Q_{\text{ВММ}} V = 10^{-6} \times 64,311 \times 39,48 \times 12 = 0,0305 \text{ т.}$$

Зведений викид оксиду вуглецю:

$$M_{\text{CO}} = 10^{-6} k_{\text{CO}} Q_{\text{ВММ}} V = 10^{-6} \times 318,4 \times 39,48 \times 12 = 0,1508 \text{ т.}$$

Зведений викид діоксиду вуглецю:

$$M_{\text{CO}_2} = 10^{-6} k_{\text{CO}_2} Q_{\text{ВММ}} V = 10^{-6} \times 76662,63 \times 39,48 \times 12 = 3,6320 \text{ т.}$$

Зведений викид оксиду азоту:

$$M_{N_2O} = 10^{-6} k_{N_2O} Q_{BMM} V = 10^{-6} \times 0,6 \times 39,48 \times 12 = 0,0003 \text{ т.}$$

Зведений викид метану:

$$M_{CH_4} = 10^{-6} k_{CH_4} Q_{BMM} V = 10^{-6} \times 3,0 \times 39,48 \times 12 = 0,0014 \text{ т.}$$

Зведений викид неметанових летких органічних речовин (НМЛОР):

$$M_{НМЛОР} = 10^{-6} k_{НМЛОР} Q_{BMM} V = 10^{-6} \times 10 \times 39,48 \times 12 = 0,0047 \text{ т.}$$

Зведений викид речовин у вигляді суспендованих твердих частинок (сажа):  $v_{сажі} = 10^{-6} k_{сажі} Q_{BMM} V = 10^{-6} \times 405,81 \times 39,48 \times 12 = 0,1923 \text{ т.}$

Зведений викид оксиду сірки:

$$M_{SO_2} = 10^{-6} k_{SO_2} Q_{BMM} V = 10^{-6} \times 500,26 \times 39,48 \times 12 = 0,2370 \text{ т.}$$

#### **5.4 Визначення еколого-економічного збитку від спалювання відпрацьованих мастильних матеріалів**

Підприємство займається утилізацією відпрацьованих мастильних матеріалів шляхом спалювання. За рік підприємство спалює близько 12 т мастильних матеріалів. Визначити збитки від спалювання даних матеріалів.

Оцінка збитку  $Z$  (грн/р) для будь-якого джерела визначають за формулою

$$Z = \gamma \sigma f M,$$

де  $\gamma$  – константа, кількісне значення якої за 2021 рік, для оксиду азоту становить 2451,84 грн/ум.т, оксиду вуглецю – 92,37 грн/ум.т;  $\sigma$  – показник відносної небезпеки забруднення атмосферного повітря;  $f=10$  – похибка, яка враховує розсіювання сумішей в атмосфері (безрозмірна);  $M$  – зведена маса річного викиду забруднень із джерела.

Значення  $\sigma$  обчислюємо за табл. 6.13 [6] з урахуванням того, що ми розглядаємо промислове підприємство,  $\sigma = 4$ .

Висота гирла викидів знаходиться на висоті  $h = 23$  м, то радіус кола зони активного забруднення (ЗАЗ) визначається як:  $r_{заз} = 20\varphi h$ , де  $\varphi$  – безрозмірна похибка на підйом факела викидів у атмосфері і визначається за формулою

$$\varphi = 1 + \frac{\Delta T}{75^\circ\text{C}},$$

де  $\Delta T = 400$  °С – середньорічне значення різниці температур у гирлі джерела та в навколишній атмосфері на рівні гирла.

Враховуючи вищезазначені значення, отримуємо:

$$\varphi = 1 + \frac{400}{75} = 7;$$

$$r_{\text{зав}} = 20 \times 7 \times 23 = 3220 \text{ м};$$

$$Z_{\text{NOx}} = 2451,84 \times 4 \times 10 \times 0,0305 = 2991,24 \text{ (грн)};$$

$$Z_{\text{CO}} = 92,37 \times 4 \times 10 \times 0,1508 = 557,16 \text{ (грн)}.$$

## Висновки до розділу 5

В даний час особливу важливість набуває раціональне та економне витрачання нафтопродуктів. Це стосується не тільки моторних масел, але й індустриальних, компресорних, трансформаторних, турбінних та інших масел. Відпрацьовані масла, що потрапляють у навколишнє природне середовище, лише частково видаляються або знешкоджуються внаслідок природних процесів. Основна ж їх частина є джерелом забруднення ґрунту, водойм та атмосфери. Нагромаджуючись вони призводять до порушення відтворення птахів, риб та ссавців, надають шкідливий вплив на людину. Таким чином, на думку учасників «круглого столу», проблема збирання та утилізації відпрацьованих нафтопродуктів є актуальною, більш того, рентабельною та наукомісткою областю.

Виконано розрахунок еколого-економічного збитку від спалювання відпрацьованих мастильних матеріалів і отримано, що збитки від викидів оксидів азоту і вулицю для умовного підприємства за один рік становлять 3478,4 грн.

1. Екологічна безпека України: Навчальний посібник / М. І. Хилько. – К., 2017. – арк.

2. Закон України “Про охорону навколишнього середовища”

3. Закону України “Про основи національної безпеки України”

4. Безопасная Европа в мире, который должен стать лучше. Европейская стратегия безопасности [Электронный ресурс] // Совет Европейского союза. – Режим  
 доступа:

<https://www.consilium.europa.eu/en/uedocs/cmsupload/031208essiiru.pdf/>.

5. Постанова КМ № 1221 від 17.12.2012 Деякі питання збирання, перевезення, зберігання, оброблення (перероблення), утилізації та/або знешкодження відпрацьованих мастил (олив).

6. Екологія та охорона навколишнього середовища: Дипломне проектування: Навч. посібник для студ. вищих навч. закл. / Національний авіаційний ун-т. — К. : Книжкове вид-во НАУ, 2005. — 192с.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сьогодні широко використовуються різні рухомі механізми, де є пари тертя, необхідно щоб вони задовольняли технічним характеристикам і зберігали працездатність досить тривалий час, тому необхідно постійно удосконалювати існуючі види пар тертя, методи їх виготовлення та матеріали, з яких вони виготовлялися.

Великий асортимент існуючих мастильних матеріалів дозволяє розподілити їх на види та типи і використовувати в різних машинах та механізмах, що значно спрощує процес виробництва як самого мастильного матеріалу, так і механізму, в якому вони працюють. Однак в сучасних умовах в період розвитку нових технологій не завжди економічно використовувати вже давно прийняті, в окремих випадках, для застосування типу змащувального матеріалу у вузькому асортименті механізмів, тому необхідно виходити на рівень підбору нових матеріалів для розширення і покращення умов роботи машин і механізмів шляхом додавання присадок до мастильних матеріалів, таким чином створюючи персональну композицію для найкращої роботи пари тертя залежно від умов роботи.

Всі трибологічні дослідження в сучасних умовах виконуються з використанням лабораторної випробувальної техніки. Простота конструкції машин тертя забезпечує її надійність і зручність в обслуговуванні, використання необхідних експериментальних параметрів. Все вище перелічене сприяє отриманню правдоподібних досліджуваних результатів дослідження і можливість проведення якісного експерименту.

Методика досліджень основних триботехнічних властивостей пластичних мастил з використанням присадок на основі міді та визначення їх впливу на зносостійкість вузлів тертя, експериментально підтвердила, що покращення антифрикційних і протизносних характеристик обумовлено можливістю солей міді створювати на поверхнях тертя мастильний шар з особливою структурою, що визначається переходом рідкокристалічних сполук у мезофазу.



Визначено оптимальну концентрацію присадок на основі міді для додавання пластичні мастильні матеріали типу Циатим 201. Під час дослідження було встановлено, що оптимальною є концентрація присадок у матеріалах на базі літієвих мастил (Циатим 201) від 1 до 20 масових часток залежно від конкретного типу радикала присадки та навантаження на зразки.

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ

### ДЖЕРЕЛ

1. На основі проведеного аналізу, запропоновано спосіб припрацювання шляхом ступінчастого навантаження зубчастих редукторів, і встановлено, що такий спосіб припрацювання є неоптимальним.

2. Конструктивно-технологічні рішення забезпечення статичної міцності та ресурсу регіональних пасажирських літаків [Текст] / О. Д. Донець, О. І. Семенець, Є. Т. Василевський и др. – Киев: Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, № 82, 2018

3. Конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности элементов конструкции планера самолета в зоне функциональных отверстий [Текст] / Д.С. Кива, Г.А. Кривов, А.Г. Гребеников и др. – Киев: КВИЦ, 2015. – 188 с.

4. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография // Т.Н. Замота, В.В. Аулин.- Кировоград: издатель Лысенко В.Ф.; 2015.- 302 с.

5. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О. Триботехніка та основи надійності машин. Київ: Інформавтодор, 2006. 216 с.

6. Мнацаканов Р. Г. Моделювання інтенсивності зношування / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов; М. С. Хімко // Problems of Friction & Wear. – 2015, Vol. 1. Issue 66. – P. 140–145.

7. Технология ремонта машин : учебник / В.М. Корнеев, В.С. Новиков, И.Н. Кравченко [и др.] ; под ред. В.М. Корнеева. – М. : ИНФРА-М, 2018. – 314 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – [www.dx.doi.org/10.12737/textbook\\_59d25702b797a5.36101100](http://www.dx.doi.org/10.12737/textbook_59d25702b797a5.36101100). – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/905842>.

8. Волченков А.В. Исследование и разработка триботехнически обоснованных режимов обкатки двигателей после капитального ремонта // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1.; URL:

<http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18092> (дата обращения: 27.10.2020).

9. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография // Т.Н. Замота, В.В. Аулин.- Кировоград: издатель Лысенко В.Ф.; 2015.- 302 с.

10. Кузьменко А.Г. Дослідження взаємодії змащених поверхонь тертя. Монографія. / А.Г.Кузьменко, О.В. Диха. – Хмельницький: ХНУ, 2005. – 183 с.