

**Є.С. Венцель, Є.М. Лисіков, А.В. Євтушенко**

**ОСНОВИ ТРИБОЛОГІЇ ТА ХІМОТОЛОГІЇ**

*Навчальний посібник*

**Харків – 2007**

**Є.С. Венцель, Є.М. Лисіков, А.В. Євтушенко**

**ОСНОВИ ТРИБОЛОГІЇ ТА ХІМОТОЛОГІЇ**

*Навчальний посібник*

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів*

**Харків – 2007**

УДК 621.3.019.3

Венцель С.С., Лисіков Є.М., Євтушенко А.В. Основи трибології та хімотології: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – 241 с.

ISBN 978-966-7593-76-6

У посібнику викладено основні поняття про тертя, види зношування та змащування деталей машин. Наведено відомості щодо процесів, які супроводжують ці явища, а також дані про основні експлуатаційні матеріали – паливо, оливи, мастила, робочі, гальмівні та охолоджувальні рідини, які використовуються в будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машинах. Розглядаються шляхи економії оливо і робочих рідин, а також методи та засоби збільшення строків служби змащувальних матеріалів та підвищення експлуатаційної надійності трибовузлів машин.

Навчальний посібник призначено для студентів технічних вузів, аспірантів, наукових співробітників, інженерів, які займаються проектуванням і експлуатацією будівельних, колійних, вантажно-розвантажувальних та інших машин.

Іл. 67, табл. 47, бібліогр.: 51 назв.

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (№14/18-Г-1074 від 10.07.07 р.).*

Рецензенти:

- Гапонов В.С. д.т.н., професор, завідувач кафедри «Деталі машин» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»
- Лебедев А.Т. д.т.н., професор, завідувач кафедри «Трактори і автомобілі» Харківського національного технічного університету сільського господарства
- Нічке В.В. д.т.н., професор кафедри «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні машини та обладнання» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

©Українська державна академія залізничного транспорту, 2007  
© С.С. Венцель, Є.М. Лисіков, А.В. Євтушенко, 2007

Є.С. Венцель, Є.М. Лисіков, А.В. Євтушенко

ОСНОВИ ТРИБОЛОГІЇ ТА ХІМОТОЛОГІЇ

*Навчальний посібник*

Відповідальний за випуск Венцель Є.С.

Редактор Решетилова В.В.

---

Підписано до друку 27.03.07 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 15,0. Обл.-вид.арк. 15,25.

Замовлення № Тираж 250 Ціна

---

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.

Друкарня УкрДАЗТу,

61050, Харків - 50, пл. Фейербаха, 7

## **УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**Є.С. Венцель, Є.М. Лисіков, А.В.Євтушенко**

### **ОСНОВИ ТРИБОЛОГІЇ ТА ХІММОТОЛОГІЇ**

*Навчальний посібник*

**Харків 2007**

УДК 621.3.019.3

Венцель Є.С., Лисіков Є.М., Євтушенко А.В. Основи трибології та хімотології: Навч. посібник. - Харків: УкрДАЗТ, 2007. – 242 с.

ISBN 978-966-7593-76-6

У посібнику викладено основні поняття про тертя, види зношування та змащування деталей машин. Наведено відомості щодо процесів, які супроводжують ці явища, а також дані про основні експлуатаційні матеріали – паливо, оливи, мастила, робочі, гальмівні та охолоджувальні рідини, які використовуються в будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машинах. Розглядаються шляхи економії оливо і робочих рідин, а також методи та засоби збільшення строків служби змащувальних матеріалів та підвищення експлуатаційної надійності трибовузлів машин.

Навчальний посібник призначено для студентів технічних вузів, аспірантів, наукових співробітників, інженерів, які займаються проектуванням і експлуатацією будівельних, колійних, вантажно-розвантажувальних та інших машин.

Іл. 67, табл. 47, бібліогр.: 51 назв.

Рецензенти:

- Гапонов В.С.           завідувач кафедри «Деталі машин» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», д.т.н., професор,
- Лебедєв А.Т.           завідувач кафедри «Трактори і автомобілі» Харківського національного технічного університету сільського господарства, д.т.н., професор,
- Нічке В.В.           д.т.н., професор кафедри «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні машини та обладнання» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

©Українська державна академія залізничного транспорту, 2007

© Є.С. Венцель, Є.М. Лисіков,  
А.В. Євтушенко, 2007

## ЗМІСТ

	Вступ .....	7
1.	Основні поняття та визначення трибології і хімотології .....	12
2.	Поверхня тертя та сорбційні процеси .....	12
2.1.	Загальний закон взаємодії двох часток .....	12
2.2.	Метал і силове поле його поверхні .....	17
2.3.	Сорбційні процеси на поверхнях тертя .....	24
3.	Основні положення теорії тертя та зношування .	28
3.1.	Поняття і визначення .....	28
3.2.	Визначення сил і коефіцієнта зовнішнього тертя	33
3.3.	Основні види тертя при наявності мастильного матеріалу .....	35
4.	Види змащування .....	40
4.1.	Класифікація видів змащування .....	40
4.2.	Рідкі змащувальні матеріали в процесі експлуатації та їх компоненти .....	41
4.3.	Гідродинамічне змащення .....	48
4.4.	Гідростатичне змащення .....	50
4.5.	Гідростатодинамічне змащування .....	50
4.6.	Еластогідродинамічне змащення .....	51
4.7.	Граничне змащування .....	53
4.7.1.	Поняття та відмітні особливості граничного змащування .....	53
4.7.2.	Механізм формування, склад та будова граничних шарів .....	54
4.8.	Специфічні методи організації граничного змащення .....	61
4.8.1.	Шорсткість поверхонь тертя та її вплив на процес тертя .....	61
4.8.2.	Двошарове граничне змащення .....	63
4.8.3.	Вибірковий перенос .....	63
4.8.4.	Ефект металоплакування .....	64
4.9.	Зношування елементів машин .....	65
4.9.1.	Основні закономірності зношування .....	65
4.9.2.	Абразивне зношування .....	68

4.9.3.	Гідрогазоабразивне, гідрогазоерозійне зношування .....	71
4.9.4.	Утомне зношування .....	74
4.9.5.	Кавітаційне зношування .....	76
4.9.6.	Зношування при схоплюванні (заїданні) .....	78
4.9.7.	Корозійно-механічне зношування .....	81
4.9.8.	Зношування при фретинг-корозії .....	82
4.9.9.	Окисне зношування .....	85
4.9.10.	Водневе зношування .....	86
4.9.11.	Електростатичне зношування .....	89
4.9.12.	Самоорганізація вузлів тертя .....	90
5.	Моторні оливи .....	95
5.1.	Умови роботи моторних олив та вимоги, що пред'являються до них .....	95
5.2.	Класифікація, номенклатура та вибір моторних олив .....	96
5.3.	Присадки до моторних олив. Механізм дії присадок .....	102
5.4.	Основні експлуатаційні властивості моторних олив .....	105
5.5.	Старіння моторних олив .....	115
5.6.	Бракування олив за фізико-хімічними властивостями та за електропровідністю. Строки служби моторних олив .....	120
6.	Робочі рідини гідроприводів машин .....	123
6.1.	Умови роботи робочих рідин та вимоги, що пред'являються до них .....	123
6.2.	Класифікація та номенклатура робочих рідин ....	124
6.3.	Основні експлуатаційні властивості робочих рідин .....	127
6.4.	Старіння робочих рідин .....	136
6.5.	Бракування робочих рідин за фізико-хімічними властивостями та за електропровідністю тонких плівок. Строки служби робочих рідин .....	139
7.	Трансмійні оливи .....	141
7.1.	Умови роботи трансмісійних олив та вимоги, що пред'являються до них .....	141

7.2.	Класифікація та номенклатура трансмісійних олив та їх строки служби .....	142
8.	Компресорні та трансформаторні оливи .....	146
9.	Пластичні мастила .....	150
9.1.	Вимоги, що пред'являються до пластичних мастил .....	150
9.2.	Класифікація та номенклатура пластичних мастил .....	151
9.3.	Основні властивості пластичних мастил .....	156
10.	Палива для двигунів внутрішнього згорання .....	157
10.1.	Вимоги, що пред'являються до палив .....	157
10.2.	Класифікація та номенклатура бензинів та дизельних палив .....	158
10.3.	В'язкість та низькотемпературні властивості дизельного палива .....	160
10.4.	Особливості згорання палива в карбюраторних та дизельних двигунах .....	162
10.5.	Октанове та цетанове числа .....	166
10.6.	Смоло- та лакоутворення в двигунах .....	168
10.7.	Корозійні властивості палив .....	170
10.8.	Газоподібні палива .....	173
10.9.	Шляхи економії палив при експлуатації .....	174
11.	Гальмові, амортизаційні та пускові рідини .....	177
12.	Охолоджуючі рідини .....	182
12.1.	Вимоги, що пред'являються до охолоджуючих рідин .....	182
12.2.	Антифризи та вода .....	183
13.	Традиційні шляхи економії паливно-мастильних матеріалів при експлуатації .....	185
14.	Альтернативні методи та засоби збільшення строків служби змащувальних матеріалів та підвищення експлуатаційної надійності трибовузлів будівельних, колійних та перевантажувальних машин .....	188
14.1.	Гідродинамічне диспергування моторних олив, робочих рідин та дизельного палива .....	189



14.2.	Дозоване введення присадок у моторні оливи та робочі рідини .....	219
15.	Техніка безпеки та охорона навколишнього середовища при використанні паливно- мастильних матеріалів .....	229
	Список літератури .....	238

## ВСТУП

Технічний рівень сучасних машин визначається не тільки параметрами їх робочого процесу, але й залежить від цілого комплексу заходів, які супроводжують машини від їх проектування, виготовлення до експлуатації. При цьому великого значення набуває експлуатаційна надійність машин.

Умови експлуатації будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин (БКВРМ) в значній більшості випадків досить жорсткі (висока механічна та теплова завантаженість та їх різкі перепади, забруднення довкілля, іноді низька кваліфікація машиністів-операторів та ін.), що знижує надійність машин, в основному, за рахунок зносу їх деталей. Відновлення працездатності машин шляхом ремонту та заміни окремих вузлів або деталей приводить до значних матеріальних витрат, які пов'язані не тільки з необхідністю придбання запасних частин, але й з простоями машин, що значно знижує їх продуктивність. При цьому вартість запасних частин за 8-10 років експлуатації складає більше половини початкової вартості машин.

Для забезпечення надійної роботи машин необхідно постійно удосконалювати їх конструкцію та технологію виготовлення, розробляти та впроваджувати сучасні методи технічного діагностування та підтримки працездатності машин в експлуатації.

Для зниження зносу в машинах використовуються змащувальні матеріали різних типів та призначення. Використання їх позитивно відбивається на надійності машин, але, на жаль, значна кількість підприємств у силу скрутного матеріального стану змушена експлуатувати машини, більшість з яких вже фізично та морально застаріли. Тому, незважаючи на використання олив, мастил та ін., надійність машин все ж таки залишається недостатньою, а вимоги, які зараз пред'являються до змащувальних матеріалів, посилюються.

Слід також відмітити, що в загальних витратах на експлуатацію машин вартість необхідних для їх нормального функціонування змащувальних матеріалів, а також палива для

двигунів, перевищує 20%. Тому стає очевидною важливість разом з боротьбою зі зношуванням вузлів тертя приділяти велику увагу покращенню властивостей, а також економному та раціональному використанню палив, олив та інших змащувальних матеріалів.

Сумісне вирішення питань підвищення надійності машин за рахунок зниження зносу та покращення якості експлуатаційних матеріалів дозволить різко подовжити строки служби машин, підвищити їх продуктивність та зменшити експлуатаційні витрати. Вирішення цих питань можливо лише шляхом вивчення та подальшого розвитку сучасних наукових напрямків, до яких відносяться трибологія та хімотологія.

За визначенням основоположника терміна П.Джоста, трибологія – це наука про технології взаємодії поверхонь, які перебувають у відносному русі, а також зв'язані з цим явищем їх практичні наслідки.

За визначенням основоположника терміна К.К.Папока, хімотологія – це наука, яка розглядає проблеми теорії та практики раціонального використання палив, олив та мастил в техніці.

Основні задачі хімотології такі:

1. Розроблення оптимальних вимог до якості паливно-мастильних матеріалів (ПММ);
2. Напрацювання та впровадження нових сортів ПММ;
3. Класифікація та уніфікація ПММ;
4. Розроблення норм витрат ПММ;
5. Розроблення заходів щодо збереження якості та зниження витрат ПЗМ при зберіганні, транспортуванні та використанні;
6. Розроблення методів оцінення експлуатаційних властивостей та контролю якості ПЗМ;
7. Вирішення екологічних завдань зниження забруднення довкілля.

Розвиток цих наукових напрямків дозволив досягти значних успіхів у питаннях підвищення надійності машин.

В сучасних умовах для кожного інженера обов'язкове знання наукових основ трибології, тому що втрати на тертя й витрати, пов'язані з ними, становлять від 1 до 4 % національного продукту країн.

Навіть у найбільш розвинених країнах світу (наприклад США) річні втрати, пов'язані з роботою різних вузлів тертя машин, механізмів і технологічного устаткування, склали (наприкінці 80-х років) приблизно 46,8 млрд доларів [1].

Стосовно до залізничного транспорту України проблема триботехнічних витрат особливо актуальна і їх можна уявити у вигляді наступної схеми (рис. 1.1).

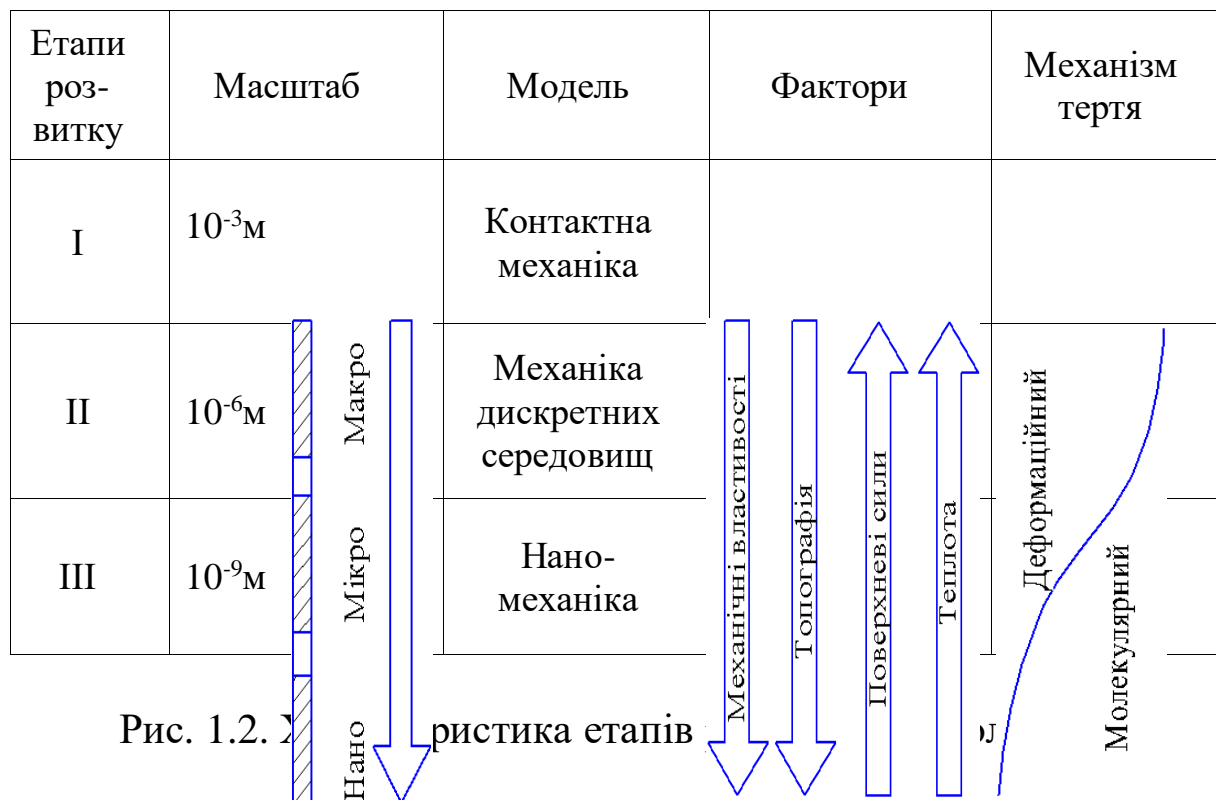


Рис. 1.1. Схема взаємозв'язку триботехнічних витрат на залізничному транспорті

Однак такого роду витрати тісно пов'язані не тільки з економічними показниками роботи залізничного транспорту, але й мають у цілому істотне значення й для інших видів транспорту, машин і устаткування. Крім економічної доцільності, витрати на тертя чинять свій вплив і на екологічні показники. Якщо враховувати сукупність всіх факторів від витрат на тертя, то можна побачити їх значний вплив у цілому на соціально-економічні рівні різних народів, держав.

У ході тертя відбуваються складні фізичні й хімічні процеси, які залежать як від природи поверхонь тертя, властивостей поверхневого шару (шару змащення), так і від режимів навантаження.

Ці процеси з урахуванням розвитку фундаментальних наук у часі відбивалися і на уявленнях про природу взаємодіючих тіл при терті. Найбільш яскраво еволюцію розвитку трибології вдалося відобразити Ю.М. Плескачевському [2]. Розроблену ним схему (рис. 1.2) еволюційного розвитку трибології можна навести у вигляді певних етапів розвитку науки (трибології).



Зупинимося на характеристиці умовно прийнятих етапів розвитку трибології.

**I етап.** Відноситься до періоду робіт Леонардо да Вінчі і до початку робіт Ш. Кулона. Контакт поверхонь, що труться, розглядався безперервним і в основі досліджень використовувалася модель контактної механіки. Погляд на механізм тертя був переважно деформаційний.

**II етап.** По мірі розвитку в галузі фундаментальних наук (фізики, хімії та ін.) контакт поверхонь, що труться, вивчається з урахуванням досліджень, у тому числі й топографії [3-5].

Процес тертя розглядається відповідно до запропонованої моделі як дискретний і відповідно його кількісний опис будується на базі механіки дискретного контакту. Безсумнівно, цей етап має істотні відмінності від першого та на більш глибокому рівні наукових досліджень описуються основні фізичні процеси в тонкому поверхневому шарі між тілами, що труться.

**III етап.** Цей етап характеризується, насамперед, масштабним фактором ( $10^{-9}$ м). Опис процесів у мастильному шарі між поверхнями тертя відбувається з використанням закономірностей взаємодії молекулярних сил, тобто сил взаємодії між структурними частками (атомами, іонами й молекулами).

В останні десятиріччя особливо успішно використовується теорія для описування закономірностей взаємодії поверхонь тертя, яка заснована на уявленнях про випромінювання й поглинання електромагнітних хвиль взаємодіючими системами атомів, тобто електромагнітна теорія сил притягання між конденсованими фазами [3, 6, 7, 8]. З рис. 1.2 виходить, що природу механізму тертя в цілому варто розглядати як двоїсту, тобто молекулярно-деформаційну.

Мета цього навчального посібника – навчити майбутніх спеціалістів та магістрів сучасних поглядів на процеси тертя та зношування трибосистем, методів активного впливу та зменшення негативних наслідків цих процесів, а також знати та уміти грамотно і економно використовувати при експлуатації ПЗМ.

# 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЇ І ХІМОТОЛОГІЇ

Як відмічалось вище, **трибологія** – це наука про тертя та процеси, які супроводжують тертя. Назва цієї наукової дисципліни складається зі слів «трибос» - тертя та «логос» - наука. Трибологія як наукова дисципліна охоплює експериментальні та теоретичні дослідження фізичних (механічних, електричних, магнітних, теплових), хімічних, біологічних та інших явищ, які пов'язані з тертям.

**Триботехніка** – це знання про практичне використання трибології. Тертю відповідають процеси трибологічного зношування і використання цих знань на практиці є важливим розділом триботехніки.

Трибологія є наукою про зовнішнє тертя твердих тіл та внутрішнє тертя твердих та рідинних тіл, а триботехніка – наука про практичне використання трибології при проектуванні, виготовленні та експлуатації трибологічних систем.

**Трибологічна система** – це комплекс елементів, який включає зв'язки, що існують між цими елементами та їх властивостями.

**Хімотологія** – це наука про теорію та практику раціонального використання ПММ в техніці. Основною її задачею є підвищення ефективності використання палив, мастил та олив.

## 2. ПОВЕРХНЯ ТЕРТЯ ТА СОРБЦІЙНІ ПРОЦЕСИ

### 2.1. Загальний закон взаємодії двох часток

Перш ніж розглянути властивості поверхонь тертя, розглянемо взаємодію двох ізольованих часток.

Оскільки фрикційні та антифрикційні матеріали складаються з окремих структурних часток, до яких можна віднести атоми, іони й молекули, то їхня взаємодія між собою визначає властивості речовини. Стосовно до процесу тертя

розгляд енергії й сил взаємодії таких часток являє собою складне завдання, тому що, крім електростатичних сил, між атомами діють електродинамічні, магнітні і валентні сили.

Атоми, іони і молекули речовин відповідно до теоретичних і експериментальних досліджень мають масу, заряди (позитивні та негативні) різної величини і у просторі взаємодіють між собою на різних відстанях. Однак встановлено загальний закон їхньої взаємодії, сутність якого методологічно базується на залежності енергії взаємодії між структурними частками від відстані між ними. Закони фізики і повсякденний досвід нас переконують, що існують завжди (і при тому одночасно) сили взаємодії двох знаків: притягання і відштовхування. Наприклад, звичайні тіла чинять опір стисканню та розтягнанню. Ці міркування можна інтерпретувати графічно на прикладі зміни сил взаємодії між ізольованими частками тіл в залежності від відстані між ними (рис. 2.1) [1, 7].

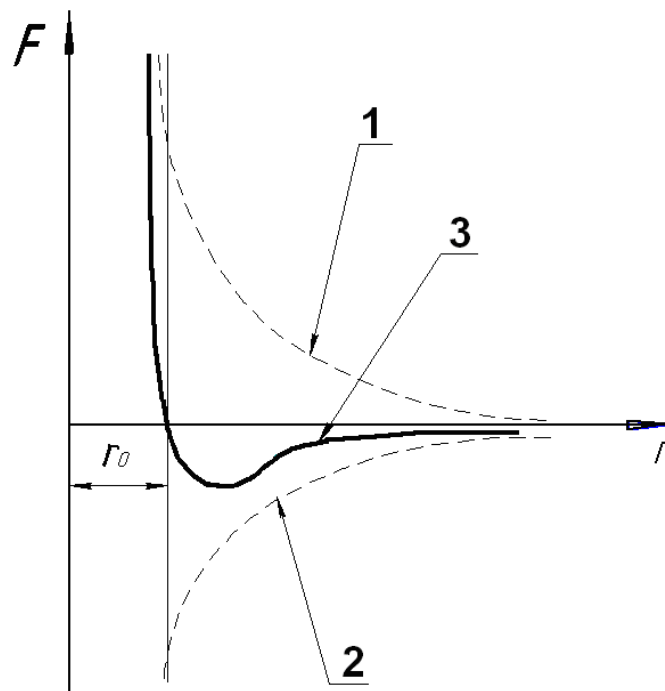


Рис. 2.1. Зміна сили взаємодії між двома ізольованими частками в залежності від відстані між ними:

1 – сила відштовхування; 2 - сила притягання; 3 – результуюча крива;  $r$  – відстань між частками;  $F$  – сила взаємодії



З рис. 2.1 видно, що зі зменшенням відстані  $r$  можна спостерігати одночасно два характерних процеси: притягання й відштовхування. Як показують дослідження, наявність сил відштовхування між частками виявляється на більш близькій відстані, порядку одного-двох їхніх діаметрів і збільшується з подальшим зменшенням відстані. Сили притягання починають спостерігатись при віддаленні часток одна від одної на відстані, що дорівнює двом-трьом їхнім діаметрам, і при подальшому зближенні продовжують збільшуватися. З цих даних видно, що сили притягання можна віднести до дальнодіючих, при цьому швидкість зміни сил притягання і відштовхування зі зміною відстані між частками різна.

М. Борн у своїх дослідженнях вперше одержав результат, що у деяких окремих випадках задовольняє експериментальні дослідження. Фундаментальну залежність  $W=f(r)$  він записав у вигляді потенціалу системи точкових електричних зарядів

$$W = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n}, \quad (2.1)$$

де  $A, B, m, n$  – константи, що характеризують структуру та властивості контактних взаємодіючих часток.

У цій формулі перший член відображує притягання (знак «-»), а другий – відштовхування (знак «+»). Графічно такий потенціал можна подати так, як це зображено на рис. 2.2.

Як видно з рис. 2.2, крива  $F(r)$  при  $r = r_m$  має максимум, а закономірність зміни  $F(r)$  можна одержати шляхом диференціювання рівняння (2.1), тоді

$$F_{\text{РЕЗ.}(r)} = \frac{dW}{dr} = -\frac{m \cdot A}{r^{m+1}} + \frac{n \cdot B}{r^{n+1}}. \quad (2.2)$$

Якщо вважати, що при деяких значеннях  $r_m$  і зовнішньої сили  $F_m$  може наступити момент, коли  $F_m$  достатня для руйнування розглянутої системи часток, то таку силу  $F_m$

визначити не викликає ніякої складності. Якщо для забезпечення стану рівноваги вважати  $r = r_0$ , а  $F = 0$ , то рівняння (2.2) можна записати у вигляді

$$n \cdot B = m \cdot A \cdot r_0^{n-m}. \quad (2.3)$$

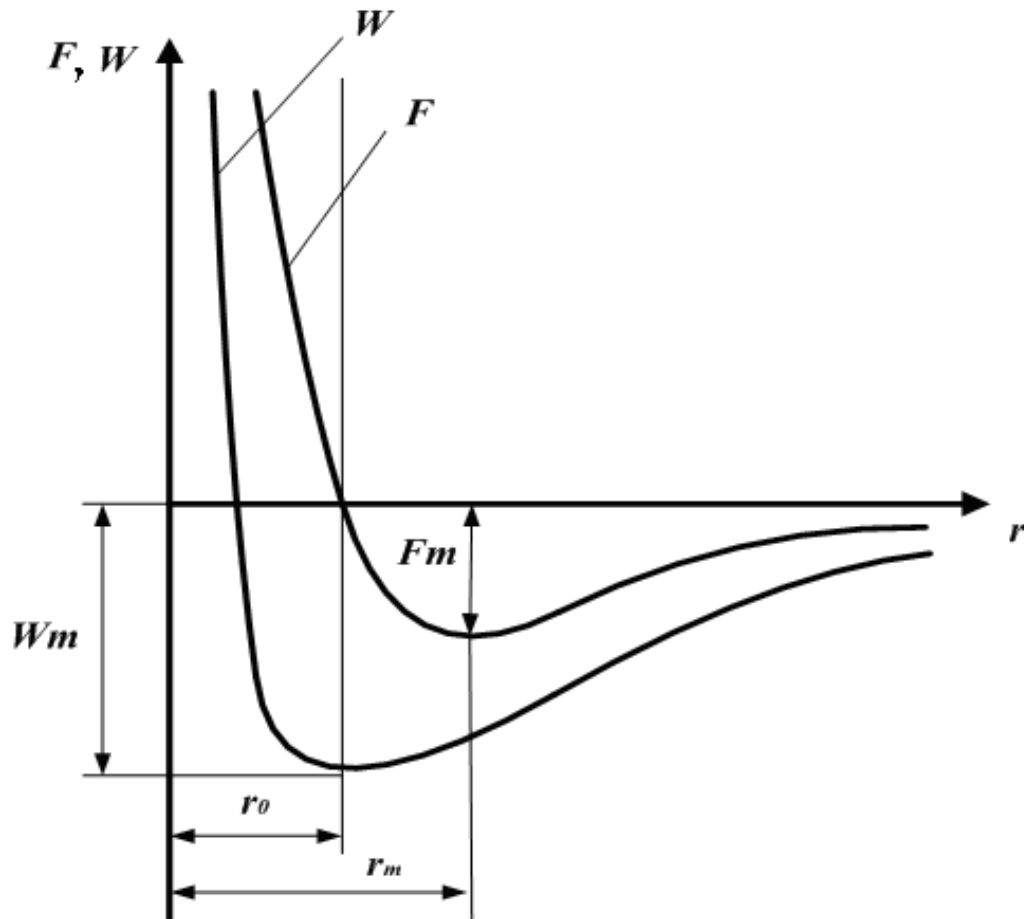


Рис. 2.2. Залежність зміни потенційної енергії та сили взаємодії двох часток від відстані між ними:

$F$  – результуюча сила взаємодії часток;  $W$  – потенційна енергія системи двох часток

З рівнянь (2.1) і (2.2) видно, що потенційна енергія, яка відповідає стану рівноваги, дорівнює

$$W_{\text{ПОТ.}} = -\frac{A}{r_m} \left[ 1 - \frac{m}{n} \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n-m} \right]. \quad (2.4)$$

Якщо прийняти умову  $r = r_0$ , то рівняння (2.4) дозволяє знайти мінімум енергії

$$W_{\text{ПОТ. MIN}} = -\frac{A}{r_0^m} \left( 1 - \frac{m}{n} \right). \quad (2.5)$$

Значення радіуса  $r_0$ , при якому потенційна енергія має мінімальне значення,

$$r_0 = \left( \frac{n \cdot B}{m \cdot A} \right)^{\frac{1}{n-m}}. \quad (2.6)$$

Як показують розрахунки,  $r_0$  має порядок декількох ангстрем. Так, наприклад, для водню  $r_0 \approx 1\text{\AA}$  ( $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{м}$ ), а для кристалічних решіток металів відповідно має такі значення: Fe( $\alpha$ ) – 2,8608 $\text{\AA}$ ; Cu – 3,608 $\text{\AA}$ ; Al – 4,0421 $\text{\AA}$ .

Як підсумок аналізу кривих на рис. 2.2, можна стверджувати, що вони відображують загальний закон взаємодії двох ізольованих часток, однак область застосування цього закону обмежується тим, що запропонована М.Борном теорія враховує лише електростатичні сили і придатна в більшій мірі для опису іонного зв'язку. Доцільно відзначити ще одну особливість цього загального закону: під дією сил взаємодії ізольованих часток при температурі абсолютного нуля градусів Кельвіна частки прагнуть зайняти в просторі місця, що відповідають мінімуму потенційної енергії, і відповідно, радіус  $r_0$  для одних часток може мати більші, а для інших – менші значення. При цьому часто в наукових виданнях загальноприйнятим вважають, що мінімум потенційної енергії вимірюють «глибиною потенційної ями».

Процеси зношування, тертя і змащення відбуваються при температурі, відмінній від абсолютного нуля за шкалою Кельвіна, і тому необхідно враховувати кінетичну енергію часток, що на один ступінь вільності має величину

$$W_{\text{кин.}} = \frac{1}{2}kT, \quad (2.7)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;  
 $T$  - абсолютна температура, К.

Якщо взяти співвідношення між мінімальною потенційною і кінетичною енергією, то можна побачити стани речовин, які визначають належні їм властивості (тверді, рідкі, газоподібні). У твердих тілах –  $W_{\text{ПОТ.мин}} \gg W_{\text{КИН.мин}}$ , у рідинах  $W_{\text{КИН.мин}}$  наближається при температурі, що нас оточує, до  $W_{\text{ПОТ.мин}}$ , у газах же при цій температурі  $W_{\text{ПОТ.мин}} \ll W_{\text{КИН.мин}}$ .

## 2.2. Метал і силове поле його поверхні

Метал, як відомо, відноситься до одного з класів твердих тіл. Його будова та властивості описувалися протягом багатьох десятиліть різними вченими, але тільки з появою квантової механіки вдалося розробити основи єдиної теорії твердого стану речовини. Відповідно до основ цієї теорії розроблені різні моделі будови металу. Зупинімося тільки на найбільш загальноприйнятій.

У процесі конденсації частки речовини прагнуть зайняти місця в просторі, у яких їхня потенційна енергія буде мати мінімальне значення. У кристалічних тілах (до них відносяться метали) частки речовини перебувають на цілком певній відстані і між ними діють сили притягання і відштовхування. У сукупності вони утворюють єдині кристалічні ґрати, що одержали назву монокристала. При цьому найменшим елементом кристала є серцевина, що відображає властивості в трьох напрямках [1]. Такі

серцевини можуть мати різне компонування і тому кристалічні грати розділяють за такими типами: кубічний гранецентрований (ГЦК); об'ємноцентрований (ОЦК); гексагональний щільнозапакований (ГПЗ). Для прикладу на рис. (2.3) наведена модель ОЦК кристалічної серцевини.

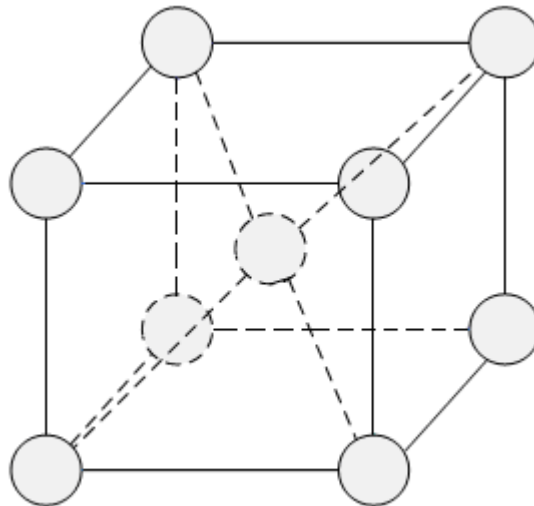


Рис. 2.3. Модель об'ємноцентрованої кристалічної серцевини

Фізичні властивості кристалів можуть змінюватися в різних напрямках і за такою ознакою їх поділяють на ізотропні та анізотропні. Якщо немає розходження в структурі фізичних та інших властивостей у різних напрямках, то такі тверді тіла називають ізотропними. У тих випадках, коли внаслідок неоднорідності фізичні та інші властивості змінюються по різних напрямках, тверді тіла називають анізотропними. Для визначення сильних і слабких напрямків головних площин використовують індекси Міллера [1]. Варто відмітити, що така будова металів не пояснює багатьох їхніх фізичних властивостей. В останні десятиріччя з розвитком квантової механіки з'явилися дослідницькі роботи, згідно з якими метал розглядається за структурою, як іонні ґрати, «що плавають» у майже однорідному електронному газі (рідині). Відповідно до електронно-іонної будови в металі є такі взаємодії: між електронами електронного газу, між іонами ґрат і між електронним газом і іонними ґратами. Уявлення про хвильовий характер руху електронів дозволили

зробити вченим якісно новий висновок: орбіта електрона перетворюється в дифузійну «хмару» величин ймовірностей, і міжіонний простір у кристалічних ґратах досить рівномірно заповнено електронами. Вивчення закономірностей поведінки електронного газу, що у сукупності представляють як вільні, так і узагальнені електрони, являє особливу значимість з позицій трибології. Схема будови міді з позицій основ загальної теорії будови наведена на рис. 2.4.

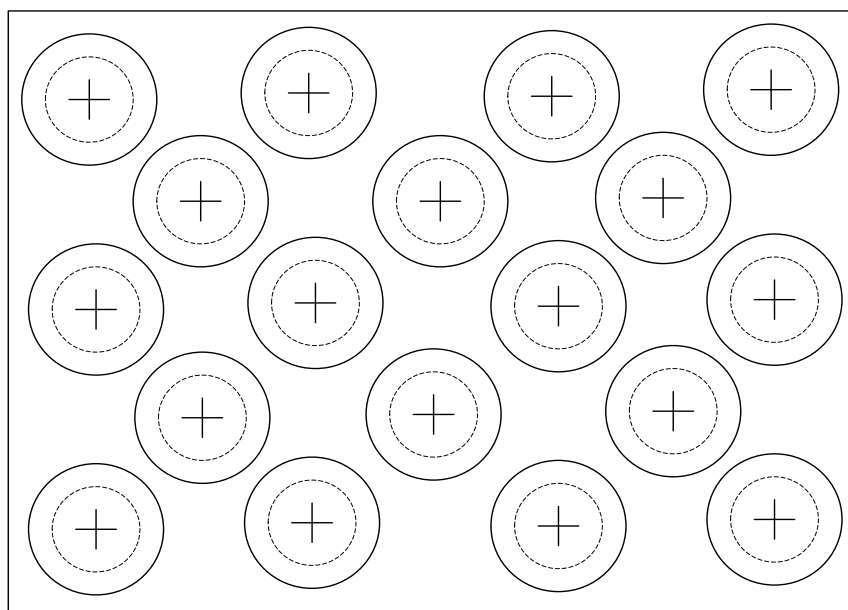


Рис. 2.4. Схема будови міді з позицій основ загальної теорії будови металів

У роботах ряду авторів вищеописана структура кристалічного тіла схематично та в більшій мірі відповідає поняттю ідеального тіла, але реальні тверді тіла далекі від ідеальної схеми. Причиною цього є безліч дефектів, серед яких найпоширенішими є: точкові, лінійні та об'ємні. Розглянемо частки твердих тіл, що перебувають на границі розподілу з іншою фазою, наприклад, вакуумом, рідиною або газом. Відмінною рисою їх є те, що вони мають некомпенсовані зв'язки в порівнянні із частками, що перебувають всередині твердого тіла (рис. 2.5).

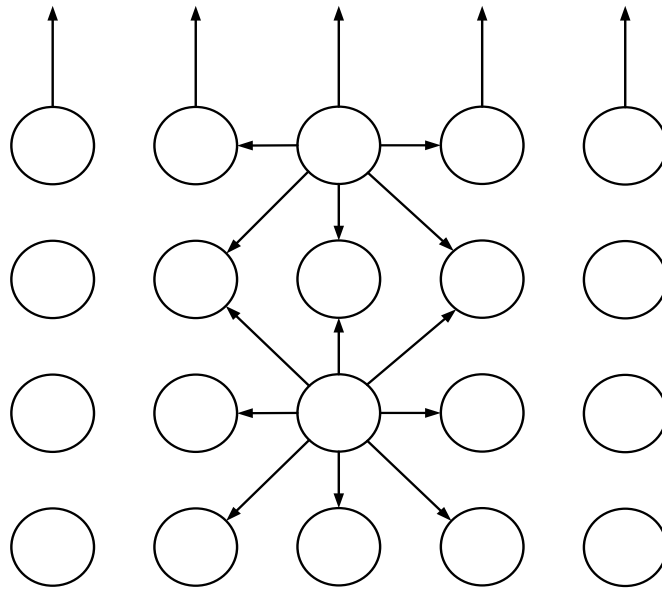


Рис. 2.5. Схема дії сил на частку всередині та на поверхні твердого тіла

Відповідно до схеми дії сил на частки, які перебувають на поверхні твердого тіла (розподілу фаз), можна побачити некомпенсованість їхніх зв'язків, що приводить до утворення надлишкової енергії. Така енергія одержала назву надлишкової вільної енергії поверхні. Оскільки реальні поверхні тертя є дискретними, то електричні поля, що формуються на них, є також дискретними і досить чутливі до будови кристалічних тіл. Про наявність електричного поля на поверхні тертя свідчать численні експериментальні дослідження, наприклад, адсорбція газів, рідин на поверхнях.

Однак експериментальне визначення вільної поверхневої енергії поверхонь тертя являє собою складне завдання і у першому наближенні вона дорівнює  $1/6$  енергії сублімації (енергії, необхідної для переходу речовини із твердого в газоподібний стан).

Силове поле твердої фази (поверхні тертя) в ідеалізованому стані досить добре можна навести у вигляді схеми, запропонованої І.С.Гершфельдом. Вона підкреслює дискретність і періодичність поля і розглядається з погляду формування мікрополів позитивних і негативних зарядів (рис. 2.6).

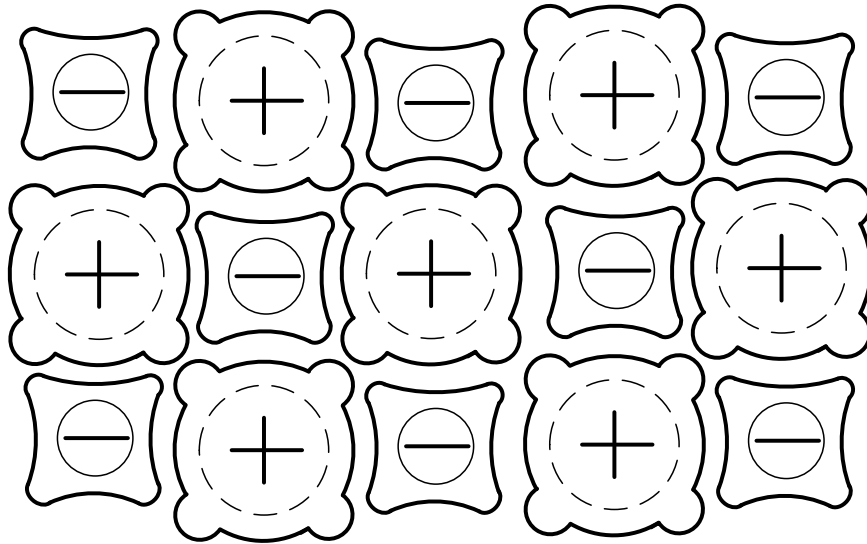


Рис. 2.6. Потенційне поле поверхні алюмінію [7]

Вивчення силових полів поверхонь тертя на сучасному етапі являє собою складне завдання в триботехніці, розв'язання якого приводить до розуміння основних закономірностей формування мастильних шарів у процесі тертя. Фізичну природу цих полів багато вчених розглядають із позицій електромагнітної теорії молекулярних сил. Основною ідеєю електромагнітної теорії сил притягання між конденсованими тілами (поверхнями тертя) є гіпотеза, яка припускає, що взаємодія між ними відбувається через флуктуаційні електромагнітні поля, що випромінюються ними. Зовнішнє молекулярне поле поверхні металу не можна уявити як просту суму елементарних полів часток, що його утворюють. Наприклад, як відзначає А.С. Ахматов, енергія електромагнітної хвилі точкового джерела при кульовій її симетрії пропорційна  $r^{-2}$ , тоді як система точкових джерел, розміщених у площині на рівних відстанях, утворює плоску хвилю (рис. 2.7) [7].



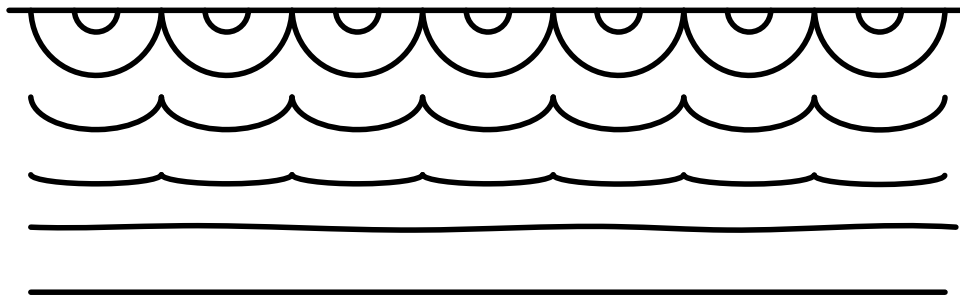


Рис. 2.7. Схема утворення плоскої хвилі системою елементарних сферичних хвиль

Варто підкреслити, що розроблена теорія молекулярних сил дозволяє визначити силу взаємодії між двома конденсованими фазами (поверхнями тертя), які розділені вузькою щілиною товщиною  $h$ .

Застосування рентгеноструктурного аналізу, електронної мікроскопії та інших методів фізичного експерименту дозволило виявити існування в кристалах мікроскопічних пор, тріщин, скупчень вакансій, заповнених пухирцями газів, та ін. Крім згаданих дефектів, у реальній структурі кристалів завжди виявляється ще один тип недосконалості ґрат, який називається дислокацією. Особливостями будови дислокацій, їхнім числом, закономірностями переміщень визначаються в значній мірі найважливіші характеристики металів: пластичність, твердість, зносостійкість. Процеси збільшення і зменшення міцності, ефективність термічної обробки, одержання тих або інших структур також визначаються особливостями дислокаційної будови. Тому являє інтерес розглянути будову дислокацій і механізм їхнього впливу на приповерхневі шари пар тертя. Розрізняють крайові й гвинтові дислокації.

На рис. 2.8,а наведена схема крайової дислокації, що утвориться в тому випадку, якщо одна з паралельних площин кристалічних ґрат коротше інших. Наявність надлишкової напівплощини вносить викривлення в розташуванні атомів прилеглих площин. Удалині від зазначеного дефекту будови атоми розташовані звичайно – без збурення. Зовні ця схема нагадує закладку, вкладену між сторінками книги. Місцеве

викривлення кристалічної решітки, викликане наявністю в ній атомної напівплощини, і називається крайовою дислокацією.

На рис. 2.8,б схематично зображена гвинтова дислокація. Кристал немовби складається з безперервної гвинтової площини, що розташована навколо деякої стрижневої лінії. Якщо крок гвинта в порівнянні із шириною площини малий, дефектною буде тільки частина кристала, що примикає до осі. Ця область і є гвинтовою дислокацією.

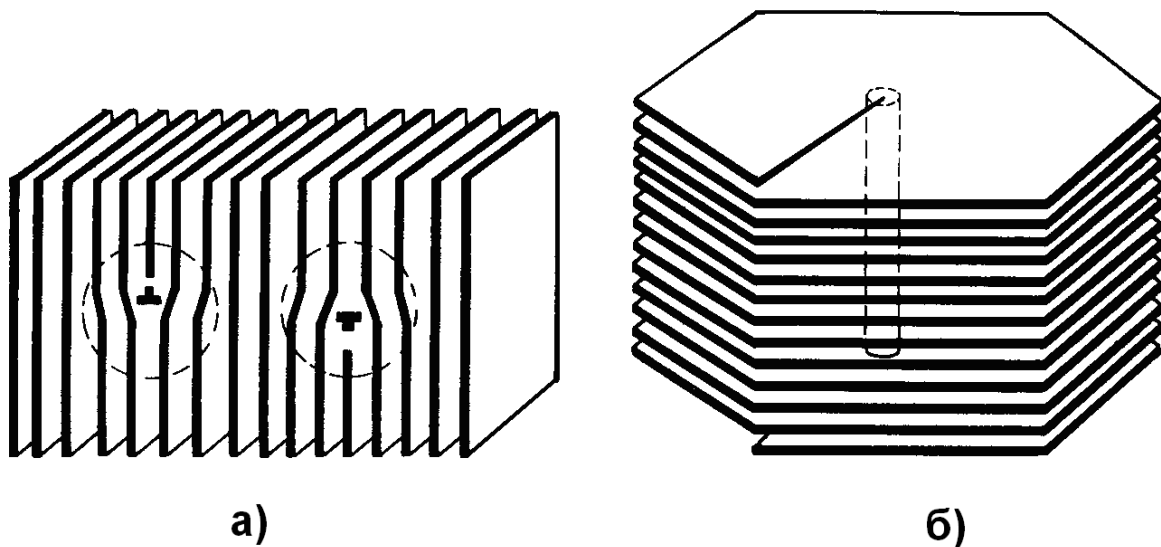


Рис. 2.8. Схеми дислокацій:

а - крайова дислокація; б - гвинтова дислокація

Дефекти в кристалах не є незалежними. Переміщаючись, вони зіштовхуються, змінюють напрямок свого руху, переходять в інші види дефектів. Так, сукупність вакансій може переходити в дислокацію, сукупність дислокацій перероджується в мікротріщину, що може перейти в макротріщину. Висока концентрація дислокацій приводить до гальмування їхнього переміщення, що безпосередньо впливає на міцність металевої поверхні. Причинами, що викликають переміщення дислокацій і деяких інших дефектів, є не тільки прикладені зовнішні сили, але й дія різних внутрішніх полів напруг. Пластичний рух кристала пов'язаний з переміщенням дислокацій у площині ковзання та виходом їх на поверхню. Дислокація є дефектом термодинамічно

нестійким, тому і прагне вийти на поверхню. Вихід дислокацій є завершенням зсуву в площині ковзання і супроводжується утворенням сходинки, ширина якої має порядок, що відповідає одній міжатомній відстані. Створення кожної нової сходинки вимагає витрати роботи. При зменшенні поверхневої енергії робота утворення сходинки зменшується і, отже, вихід дислокацій на поверхню та пластифікація приповерхніх шарів полегшується. У результаті цих процесів створюється особливий субмікрорельєф поверхонь.

Найбільш істотним проявом взаємодії оливи із твердою поверхнею є ефект П.А.Ребіндера, який полягає у полегшенні виходу дислокацій на поверхню тіла, обумовленому взаємодією зразка із середовищем. Ця взаємодія виражається у зниженні вільної енергії поверхні зразка під впливом оборотної адсорбції полярно-активних компонентів з навколишнього середовища. Олива залежно від вмісту в ній полярних молекул не тільки утворює граничні плівки, але й безпосередньо впливає на стан приповерхневих шарів металу.

Під впливом полярних компонентів оливи найбільшою мірою виходять на поверхню гвинтові дислокації. У випадку температурної десорбції полярно-активних молекул оливи поверхнева енергія їхньої металеві підкладки збільшується і вихід дислокацій на поверхню ускладнюється. Отже, пластифікація приповерхніх шарів при їхньому змащенні ПАР є процесом оборотним.

Ефект П.А.Ребіндера грає надзвичайно важливу роль у процесі тертя, тому що пластифікування поверхневого шару сприяє різкому зниженню опору зсуву, локалізації зовнішнього тертя у тонкому поверхневому шарі, зниженню сили тертя та зношування.

### **2.3. Сорбційні процеси на поверхнях тертя**

Поверхні тертя металевого походження, як ми побачили, є носіями невичерпного запасу вільної енергії і тому на межі розподілу фаз відбувається поглинання цими поверхнями

молекул і часток із прилягаючих до них середовищ (газів і рідин). У загальному розумінні процес поглинання сторонніх атомів і молекул твердими речовинами одержав назву сорбції. Сорбція включає процес адсорбції - процес, що відбувається на межі розподілу фаз (наприклад: тверде тіло – рідина, тверде тіло - газ і рідина - газ). Речовину, на поверхні якої відбувається адсорбція, називають адсорбентом, а поглинену із прилягаючого об'єму речовину - адсорбатом. Розрізняють два види адсорбції: фізичну та хемосорбцію. Фізичну адсорбцію відносять до оборотного процесу, тому що вона зумовлена дією відносно слабких вандерваальсових сил. Таким чином, молекули адсорбату, наближуючись із об'єму мастильного матеріалу до поверхні тертя, зазнають притягання з її боку. В процесі зіткнення з поверхнею молекули врівноважуються силами відштовхування, що виникають між молекулами і частками, які утворюють розподіл фаз. Як результат, поверхні пар тертя покриваються адсорбованим шаром з молекул мастильного матеріалу. У процесі фізичної адсорбції відбувається зменшення вільної поверхневої енергії і тому виділяється теплота адсорбції. Вона залежить від природи, будови молекул адсорбату і їхньої орієнтації біля поверхні, а також від природи і структури поверхні.

Поверхні пар тертя мають різну питому поверхневу енергію (гетерогенну), тому що не всі ділянки їх мають однакові адсорбційні властивості. Крім того, різні мікроефекти поверхні, які називають активними центрами, мають значно більшу здатність до адсорбції, аніж гладкі ділянки.

Хемосорбція відноситься до необоротних процесів і обумовлюється проявом досить великих за значенням хімічних зв'язків (валентних сил).

Протікання адсорбційних процесів на поверхні відбувається за частки секунди, а хемосорбція визначається як швидкістю протікання хімічної реакції, так і дифузією речовини через окислений шар. Тому швидкість протікання хемосорбції коливається в дуже широких межах.

В залежності від інтенсивності силового поля поверхонь тертя на них можуть утворюватися адсорбційні шари в одну або

навіть кілька десятків молекул адсорбату. В реальних умовах поверхні тертя несуть на собі складну систему адсорбційних шарів. Якщо на поверхні тертя повністю відсутні адсорбційні шари, то така поверхня може бути визнана «фізично чистою» і її часто в літературі називають «ювенільною». Ювенільні властивості таких поверхонь можуть зберігатися лише в умовах високого вакууму або виникають в процесі зношування металеві поверхні. При різанні металу ювенільна поверхня існує короткочасно. Будь-яке ж зіткнення поверхні із зовнішнім середовищем призводить до адсорбції атомів і молекул середовища як на зовнішній, так і на внутрішніх поверхнях. Умовна схема будови основних видів адсорбційних шарів на поверхні металу наведена на рис. 2.9 [7].

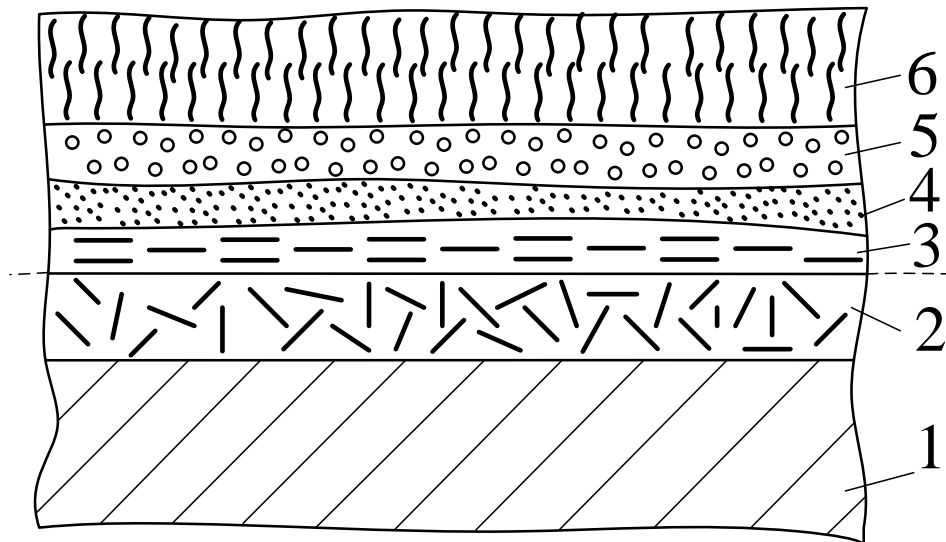


Рис. 2.9. Схема будови основних видів адсорбційних шарів на поверхні металу:

- 1 - первинна об'ємна структура металу; 2 - зона деформованого металу; 3 - шар окислів металу; 4 - адсорбційний шар води; 5 - адсорбційний шар полярних молекул (змащення)

Безпосередньо над ювенільною поверхнею металу (над зоною деформованого металу) створюються умови для виникнення хімічних процесів, які приводять до утворення шарів

оксидів. Такі оксидні плівки досить міцно пов'язані із зоною деформованого металу, мають різну товщину, яка досягає декількох десятків ангстрем і проникають через устя мікротріщин на внутрішню поверхню.

Над шаром оксиду металу залежно від умов, у яких він перебуває, можуть бути наявні адсорбційні шари газів. Варто помітити, що гази наявні не тільки у вигляді адсорбційного шару на поверхні оксидної плівки, але й можуть розчинятися в кристалічних ґратах і заповнювати внутрішні мікропорожнини на поверхні тертя. В процесі експлуатації пар тертя температура підвищується, і відбувається процес віддачі газів металом у змащувальну плівку. Якщо метал зіткнеться із середовищем, що містить водяні пари, то утворяться плівки води різної товщини. Таке явище треба вважати звичайним для пар тертя, і вони (плівки) можуть впливати на процес тертя і, особливо, на несучу здатність адсорбційного шару в цілому.

Ключову роль у процесі роботи пар тертя відіграє адсорбційний шар, що сформований зі змащувального матеріалу. Останній, як правило, являє собою з початку експлуатації двокомпонентне середовище, що складається з неполярних молекул (базова олива) і полярних молекул, що володіють постійним дипольним моментом. Адсорбційні шари неполярних і полярних молекул можуть мати різну товщину. Якщо є адсорбційний шар товщиною в одну молекулу, то його називають мономолекулярним. Однак, як показують експериментальні дослідження, адсорбційний шар з полярних молекул майже завжди є полімолекулярним. Таким чином, на поверхні тертя залежно від умов експлуатації трибовузла утворюється складна система адсорбційних шарів, які в динаміці процесу тертя можуть змінюватися.

Розглянута схема будови шарів (рис. 2.8) умовна і подана як статична система. В реальних умовах товщина таких шарів змінюється в залежності від топографічної гетерогенності поверхонь тертя. Крім цього, з моменту початку роботи пар тертя відбувається руйнування гребенів профілю поверхні й заповнення її заглиблень продуктами зношування, пластично деформованого матеріалу поверхні та ін.

### 3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

#### 3.1. Поняття і визначення

**Тертя спокою** – тертя, при якому відносна швидкість тіл, які контактують, дорівнює нулю.

За кінематичною ознакою зовнішнє тертя розподіляють так: ковзання, кочення та вертіння.

**Тертя ковзання** – тертя, при якому швидкості тіл у точках дотику різні за величиною і за напрямком або тільки за величиною, або тільки за напрямком (рис. 3.1,а).

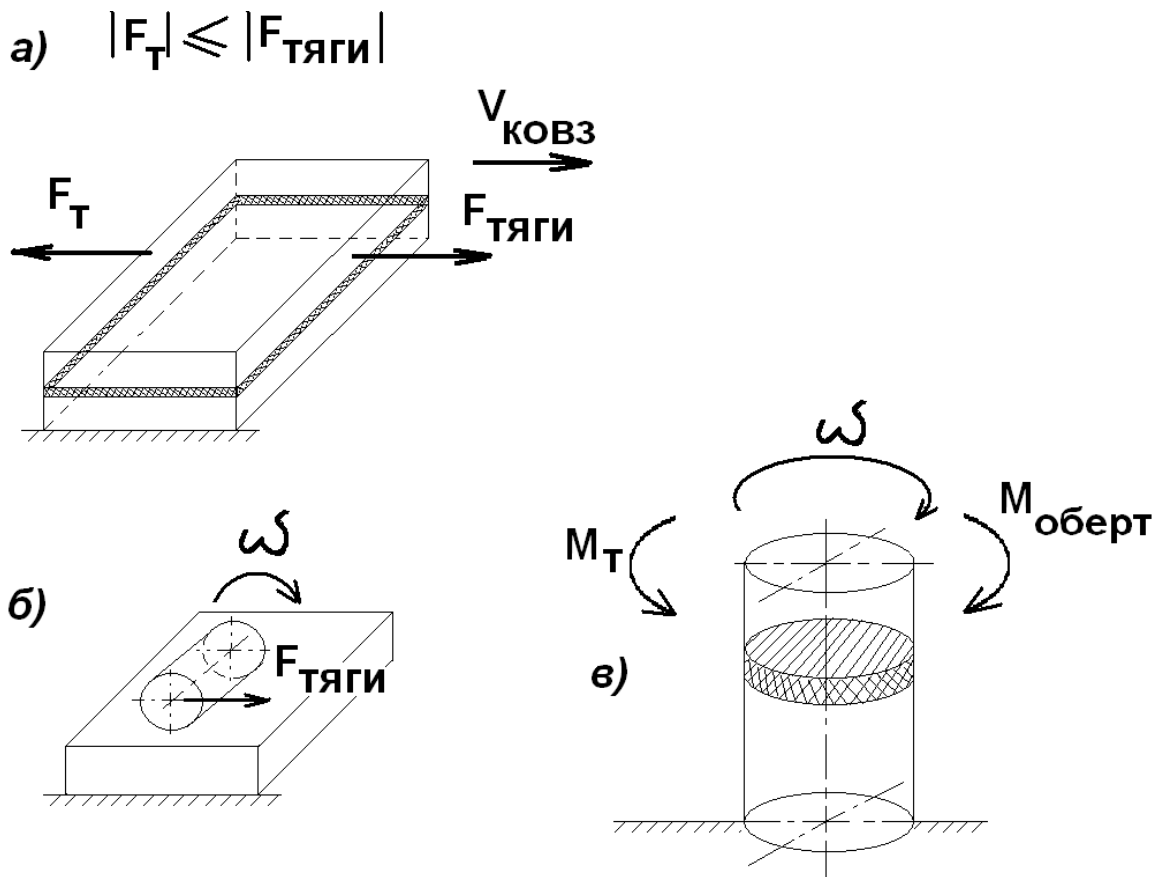


Рис. 3.1. Кінематика взаємодії твердих тіл при терті:

а) чисте ковзання; б) кочення; в) вертіння

**Тертя кочення** – тертя, при якому можна вказати одну точку в зоні контакту, у якій відносна швидкість ковзання тіл, які взаємодіють, буде дорівнювати нулю (рис. 3.1,б).

**Тертя вертіння** – окремий випадок тертя ковзання, що має місце при обертovому русі одного з тіл, які контактують, (рис. 3.1,в).

Основними кількісними показниками процесу тертя є сила і коефіцієнт тертя.

**Сила тертя (сила зовнішнього тертя)** – сила опору відносному ковзанню контактуючих твердих тіл, що лежать у площині їхнього дотику (рис. 3.2).

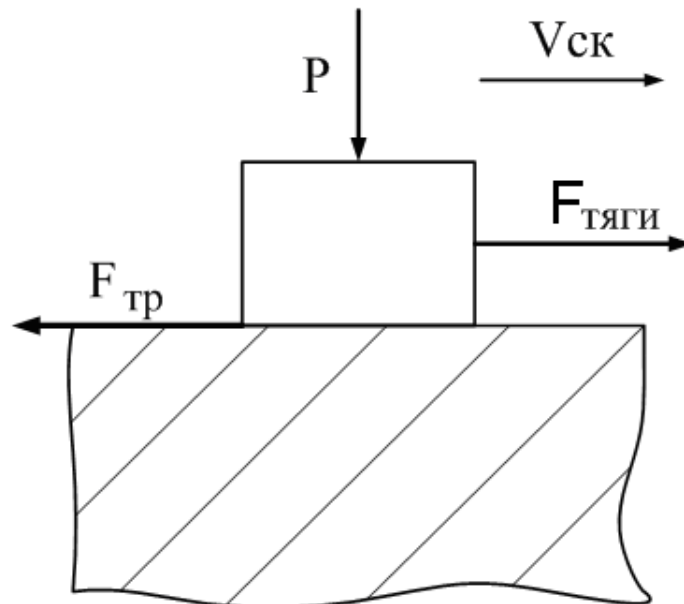


Рис. 3.2. Схема до визначення сили тертя при ковзанні

Сила зовнішнього тертя, згідно з основними положеннями молекулярно-механічної теорії тертя, при відносному переміщенні робочих поверхонь, за І.В.Крагельським, визначається, як

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{ТМОЛ}} + F_{\text{ТМЕХ}}, \quad (3.1)$$



де  $F_{\text{ТМОЛ}}$  - складова сили тертя, яка зумовлена міжатомною та міжмолекулярною взаємодією;

$F_{\text{ТМЕХ}}$  - механічна складова сили тертя, яка зумовлена деформуванням мікровиступів та поверхневих шарів менш жорсткого твердого тіла, в яке проникло мікронерівностями більш тверде тіло.

Механічна взаємодія поверхонь відбувається при ковзанні однієї поверхні відносно іншої шорсткуватої поверхні. Мікронерівності вступають у контакт, і відбувається механічне зчеплення протилежних виступів поверхонь тертя. В результаті механічної взаємодії нерівностей спостерігається пружна та пластична деформація виступів, а також «проорювання» твердими нерівностями протилежної, менш твердої, поверхні.

Сукупність сил опору відносному переміщенню поверхонь, що зумовлена механічною взаємодією окремих мікровиступів, являє собою механічну складову сили тертя

$$F_{\text{Тмех}} = \sum_1^m F_g, \quad (3.2)$$

де  $m$  - число мікроплощадок контактування поверхонь тертя.

Опір ковзанню зумовлений в основному процесами деформування нерівностей, тому механічну складову сили тертя часто в літературі називають деформаційною.

Молекулярна складова сили тертя характеризує атомну і молекулярну взаємодію при зближенні поверхонь і їхньому переміщенні. Зазвичай цю складову сили тертя називають адгезійною. Під терміном «адгезія» мають на увазі притягання поверхонь, зумовлене атомно-молекулярною взаємодією. Розрахувати молекулярну складову сили тертя стало можливим завдяки ряду робіт [7, 11, 12, 14] з електромагнітної теорії сил притягання між конденсованими фазами (електромагнітної теорії міжфазового граничного поля). Розрахунок деформаційної складової сили тертя також можливий за окремих випадків деформації і для цього доцільно скористатися рядом робіт з

механізму пружних і пластичних деформацій у зоні контакту мікронерівностей з поверхнею, що деформується [2, 9, 10, 13]. Необхідно відзначити, що поряд із силами молекулярно-механічного походження в реальних парах тертя мають місце теплові, електричні магнітні та інші явища, які до цього часу в повній мірі не досліджені.

Тертя може бути зовнішнім та внутрішнім.

**Зовнішнє тертя** – це явище опору відносному переміщенню, який виникає між двома твердими тілами в зонах контактування поверхонь.

**Внутрішнє тертя** – це явище опору відносному переміщенню часток одного й того ж тіла.

**Зношування** – процес відділення матеріалу з поверхні твердого тіла при терті або накопичення його залишкової деформації, що виявляється в поступовому змінненні розмірів або форми тіла.

**Знос** - результат зношування, який визначається в одиницях довжини, об'єму або маси.

**Швидкість зношування** – відношення значення зносу до інтервалу часу, за який він виник.

**Інтенсивність зношування** - відношення значення зносу до обумовленого шляху, на якому зношування здійснювалось (безрозмірна величина).

**Зносостійкість** - властивість матеріалу здійснювати опір зношуванню в певних умовах тертя, який оцінюється величиною, зворотною швидкості або інтенсивності зношування.

Для того щоб ефективно керувати процесами зміннення технічного стану машини та обґрунтовано вибирати заходи, які направлені на зменшення зношування, слід визначати в кожному конкретному випадку вид зношування трибоповерхонь. Тому необхідно знати такі характеристики: вид відносного переміщення, характер проміжного середовища та основний механізм зношування.

В трибосполученнях існують чотири види відносного переміщення: ковзання, кочення, удар та осциляція (переміщення, яке має характер відносних коливань з малою амплітудою – в середньому 0,02...0,05 мм).

За характером проміжного середовища розрізняють зношування при терті без змащувального матеріалу та при терті зі змащувальним матеріалом.

У залежності від властивостей матеріалів деталей, змащувального або абразивного матеріалу, а також від їх співвідношення, в трибосполученнях в процесі тертя виникають руйнування поверхонь різних видів, тобто здійснюється зношування, яке відповідно міжнародним стандартам ІСО 43678/2-83, ІСО 4378/3-83 та ГОСТ27674-88 розділяють на такі види:

1) механічне – зношування матеріалу в результаті механічних впливів;

2) абразивне – механічне зношування матеріалу в результаті ріжучої або дряпучої дії твердих тіл або твердих частинок;

3) гідрогазоабразивне - зношування в результаті впливу твердих тіл або твердих частинок, що захоплюються потоком рідини або газу;

4) гідрогазоерозійне – зношування поверхонь в результаті впливу потоку рідини або газу;

5) утомне – механічне зношування в результаті утомного руйнування при повторній деформації мікрооб'ємів матеріалу поверхонь тертя;

6) кавітаційне – механічне зношування при русі твердого тіла відносно рідини, при якому пухирці газу вибухають біля поверхні, що утворює місцевий високий тиск та температуру;

7) зношування при фретингу – механічне зношування тіл, що торкаються, при малих коливальних відносних переміщеннях;

8) зношування при заїданні – зношування в результаті схоплювання, глибинного виривання матеріалу, переносу його з однієї поверхні тертя на другу та впливу виниклих нерівностей на сполучену поверхню;

9) корозійно-механічне – зношування в результаті механічного впливу, яке супроводжується хімічним взаємодією матеріалу з середовищем;

10) окислювальне - корозійно-механічне зношування, при якому переважає хімічна реакція матеріалу з киснем повітря або навколишнього середовища.

В реальних умовах роботи трибосполучень будівельних, колійних, перевантажувальних та інших машин спостерігаються одночасно майже всі види зношування, але провідним видом зношування, який лімітує довговічність деталей, є абразивний.

Експлуатаційні матеріали, що використовуються у БКВРМ, поділяються на наступні.

**Паливо** – це речовина, як правило, нафтового походження, яка здатна до виділення значної кількості тепла та високої температури. До основних видів палива відносяться бензин, дизельне паливо та зріджений газ.

**Оливи** – це речовини, як правило, нафтового походження, призначені для зниження тертя та зношування, а також для передачі енергії (робочі рідини гідроприводів), охолодження деталей, ущільнення зазорів, видалення з зони тертя забруднень і т. п.

**Пластичні мастила** – речовини нафтового походження, які призначені для зниження тертя та зношування деталей, що працюють в умовах жорстких навантажень, задирків та заїдань, а також тоді, коли використання рідинних олив неможливо у зв'язку з конструктивними особливостями трибовузла.

**Охолоджуючі рідини** – речовини, які забезпечують нормальний тепловий стан двигуна внутрішнього згоряння у процесі його експлуатації.

**Гальмові рідини** – речовини, які служать робочими рідинами гідравлічного привода гальм.

### 3.2. Визначення сил і коефіцієнта зовнішнього тертя

Розглянемо визначення другого кількісного показника – коефіцієнта тертя.

Основний закон у вигляді залежності сили тертя  $F_T$  від нормального навантаження  $P$ , що притискає тіло до похилої грані площини, був виявлений у 1508 р. Леонардо да Вінчі:

$$F_T = P \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.3)$$

де  $\alpha$  - кут нахилу площини до горизонту.

Залежність (3.3) показує пропорційність опору тертя навантаженню, що діє на поверхні тертя.

З рівняння (3.3) можна визначити, що

$$\operatorname{tg}\alpha = f = \frac{F_T}{P}, \quad (3.4)$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя.

Ш.Кулон та Г.Амонтон у 1785 р. підтвердили залежність (3.3) і розширили її, увівши ще один доданок  $A$ . Зовнішня сила тертя, згідно з Ш. Кулоном, дорівнює

$$F_T = A + f \cdot P, \quad (3.5)$$

де  $A$  - характеристика зчеплення між взаємодіючими твердими тілами при терті, що не залежить від навантаження;

$f$ - одна зі складових коефіцієнта тертя;

$P$  - навантаження.

Можна стверджувати, що Ш.Кулон вперше інтуїтивно сформулював двочленний закон тертя.

Фундаментальні залежності (3.3) - (3.5), що зберігають своє значення й нині, послужили основою для розроблення вчення про тертя в механіці. У створенні вчення про тертя надалі взяли участь багато видатних вчених: Паран, Лейбніц, Ейлер, Котельников, Вишнеградський та ін.

Варто відмітити, що по мірі розвитку молекулярної фізики і хімії вуглеводнів вчення про тертя зазнало істотних змін щодо вивчення закономірностей фізико-хімічних процесів у парах тертя. Приблизно в 40-х роках ХХ сторіччя практично одночасно вченими різних країн (Ф.П.Боуден, А.Дж.Мур, Д.Тейбор, І.В. Крагельський та ін.) теорію зовнішнього тертя твердих тіл було запропоновано розглядати з позиції двоїстої природи (адгезійна та деформаційна складові сили тертя). Як відзначають ряд авторів науково-дослідницьких робіт, у галузі тертя найбільш

повно механізм тертя розкритий завдяки роботам І.В. Крагельського та Б.В. Дерягіна. У лабораторії Б.В. Дерягіна тертя розглядається як адгезійний процес, а граничні шари – як особливі термодинамічні фази з особливою структурою і властивостями. Його теорія призводить так само до двочленного закону тертя, а коефіцієнт тертя рекомендується визначати за залежністю

$$f_T = f_0 \left( 1 + \frac{S \cdot P_0}{P} \right), \quad (3.6)$$

де  $P_0$  – питома сила молекулярного притягання ;  
 $S$  – площа фактичного дотику поверхонь тертя;  
 $f_0$  – значення коефіцієнта тертя при  $P_0=0$ ;  
 $P$  – навантаження.

### 3.3. Основні види тертя при наявності мастильного матеріалу

У попередніх розділах наведені основні поняття й визначення, у тому числі, і по видах тертя без мастильного матеріалу. В реальних парах таке тертя зустрічається досить рідко. Тому розглянемо більш розповсюджений випадок, коли між поверхнями є змащувальна олива. У зв'язку з цим розглянемо основні види тертя при наявності її між поверхнями. Така необхідність зумовлена тим, що експериментальні дослідження показують, що зовнішнє тертя твердих тіл при наявності змащення супроводжується іншими явищами та процесами, які багато в чому не властиві зовнішньому тертю твердих тіл без мастильного матеріалу. Механізм процесу зовнішнього тертя в умовах наявності мастильного матеріалу показує, що поверхні тертя можуть перебувати в широкому діапазоні від варіанта відсутності змащення (сухого тертя) до гідродинамічного тертя.

Масильний матеріал є найважливішим конструктивним елементом вузлів тертя, завдяки якому підвищується їх надійність і знижуються втрати енергії при їхній експлуатації. Це явище спостерігається завдяки тому, що внутрішнє тертя в масильних матеріалах істотно менше, ніж сухе зовнішнє тертя твердих тіл.

Відповідно до схем контакту (рис. 3.3) видно, що зовнішнє тертя може змінюватися в межах від сухого тертя до повного поділу їх масильним матеріалом, тобто до внутрішнього тертя в масильному матеріалі.

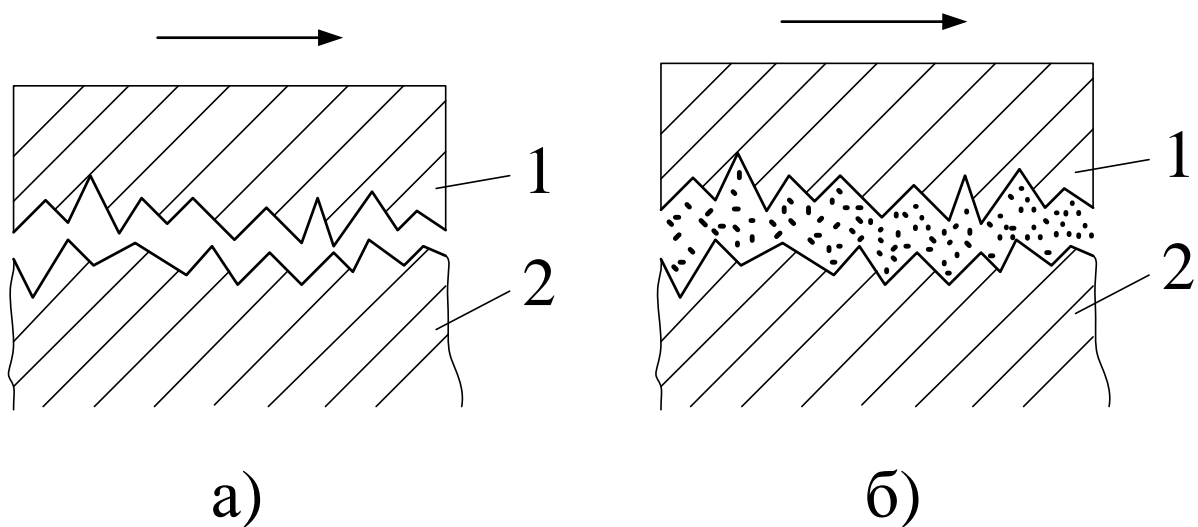


Рис. 3.3. Схеми контакту поверхонь тертя:

а) при відсутності масильного матеріалу; б) при наявності масильного матеріалу; 1,2 – поверхні тертя

Такий діапазон контакту твердих тіл спричиняється поділом зовнішнього тертя на три основних види:

1. Тертя «ювенільних» поверхонь - тертя поверхонь при повній відсутності між ними третьої фази, тобто масильного матеріалу.

2. Гідродинамічне тертя - тертя при наявності проміжного шару змащення, що підкоряється законам гідродинаміки ламінарного потоку рідини (рівняння Ньютона). Такий процес

характеризується в'язкістю мастильного матеріалу як його зовнішньою властивістю.

3. Граничне тертя – тертя між «сухим» і «рідинним» або між ювенільним і гідродинамічним. Граничне тертя протікає у тих випадках, коли досить тонкий шар третьої фази (змащення), що розділяє тверді поверхні, перебуває в границях їхнього впливу на мастильну речовину [7]. Термін «граничне тертя» і поняття «граничний стан» речовини були вперше уведені В.Гарді в 1922 р.

Однак у вузлах тертя при їх експлуатації не завжди виконується умова згідно з прийнятим розподілом. Оскільки систему процесів, що відбуваються у вузлах тертя, відносять до гетерогенних, то можливі різні сполучення, наприклад: ювенільне та граничне, граничне та гідродинамічне та ін. Тому в літературних джерелах з трибології часто вживають термін «змішане тертя». Однак його не можна розуміти, як просту суму сил тертя. Ряд авторів виділяють рубіжні режими граничного тертя, що в більшій мірі відповідає сучасному стану науки про тертя. Таких рубіжних режимів можна виділити два: 1 – тертя при відсутності мастильного матеріалу («сухе тертя»); 2 – граничне тертя.

Розглянуту класифікацію видів тертя стосовно до підшипників ковзання і кочення можна відобразити залежністю коефіцієнта тертя від коефіцієнта динамічної в'язкості  $\mu$ , кутової швидкості  $V$  і тиску  $P$ . Ця залежність була запропонована Герсі-Штрібеком (рис. 3.4).

За своїм фізичним змістом параметр відображує товщину мастильного шару. Тому криву залежності  $f$  від  $\frac{\mu \cdot V}{P}$  можна трактувати, як залежність  $f$  від  $h$ . На цій узагальненій кривій  $f$  від  $h$  можна виділити три зони, які відображують основні фізичні процеси, що відбуваються в парах тертя, тобто відображають види тертя.



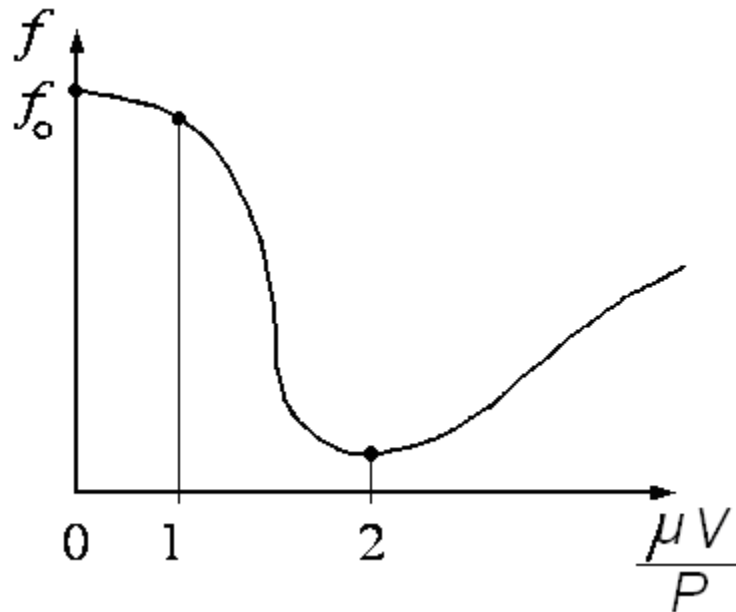


Рис. 3.4. Залежність коефіцієнта тертя від  $\frac{\mu \cdot V}{P}$   
(діаграма Герсі-Штрібека)

Точка  $f_0$  відповідає тертю спокою, а ділянка кривої 0-1 належить до періоду, коли пара перебуває в області граничного тертя. Воно характеризується високими питомими навантаженнями, низькими швидкостями ковзання та підвищеним коефіцієнтом тертя. У цій області в ті або інші моменти експлуатації працюють вузли тертя (наприклад, при пуску та зупинці, в мертвих точках поршнів двигуна внутрішнього згорання і т.п.). Цю зону характеризують безліч факторів, до числа яких відносяться [7]:

- фізична природа, стан і властивості поверхонь тертя;
- структура і фізико-хімічні властивості мастильного матеріалу;
- тиск, товщина граничного шару, швидкість ковзання, температура;
- явища термічного розпаду молекул, каталітичні процеси та хімічні реакції;
- кінетика адсорбційних процесів і т.д.

Таким чином, граничне тертя являє собою досить складне явище, яке визначається чисельністю та мінливістю перерахованих факторів.

По мірі збільшення швидкості величина коефіцієнта тертя зменшується до точки 1.

Ділянка кривої 1-2 належить до «змішаного тертя». Його характеризує, головним чином, ділянка площини фактичного контакту поверхонь тертя, тому що в цьому періоді одні ділянки контактуючих поверхонь тертя розділені шаром змащення (гідродинамічне тертя), а інші перебувають у граничному терті.

Ділянка кривої Герсі-Штрібека, що розташована правіше точки 2, відповідає гідродинамічному тертю (рідинному режиму змащення). Ця ділянка головним чином характеризується тим, що втрати на зовнішнє тертя зводяться до мінімуму, а зношування поверхонь практично відсутнє (якщо мастильний матеріал не має різних забруднень, розміри яких більше зазору в парах тертя), тому що поверхні повністю розділені одна від одної змащувальною оливою.

Мастильний шар у цьому випадку підкоряється законам гідродинаміки.

Наведену класифікацію основних видів тертя приблизно оцінюють величиною  $\lambda$ , що являє собою відношення мінімальної товщини  $h_{\min}$  мастильного шару в зоні мінімального зазора між поверхнями тертя до характеристики висоти їхніх нерівностей.

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{a1}^2 - R_{a2}^2}}, \quad (3.7)$$

де  $R_{a1}^2$ ,  $R_{a2}^2$  – шорсткості поверхонь першої та другої контактуючих деталей відповідно. При  $\lambda > 3$  має місце рідинне змащення (гідродинамічне тертя), при  $\lambda < 1$  – граничне тертя;  $1 < \lambda < 3$  – змішане тертя.

У цілому, з позицій «життєвого циклу» шару змащення можна виділити характерні періоди: 1– початковий період взаємодії граничних шарів; 2 – стаціонарний режим; 3 – період руйнування граничного шару (дегенерація шару).

## **4. ВИДИ ЗМАЩУВАННЯ**

### **4.1. Класифікація видів змащування**

В основу розподілу видів змащення покладені такі ознаки:

- фізичний стан мастильного матеріалу;
- спосіб організації мастильного шару;
- вид зовнішнього тертя.

За фізичним станом мастильного матеріалу розрізняють такі види змащень: рідке, тверде змащення, газове.

За основним видом зовнішнього тертя розрізняють такі види змащень: гідродинамічне, граничне, змішане.

У свою чергу, за способом організації мастильного шару прийнято розрізняти такі види:

- рідке змащення – гідродинамічне, гідростатичне, еластогідродинамічне.

Крім того, згідно з сучасними дослідженнями в галузі трибології, з'явилися специфічні методи організації змащення (двошаровий, виборчий перенос, змащення, засноване на ефектах металоплакування, трибopolімеризації і т.д.).

Розглянемо основні характеристики видів змащень та їхні відмінні риси.

## 4.2. Рідкі змащувальні матеріали в процесі експлуатації та їх компоненти

Стан і структуру змащувального матеріалу в процесі експлуатації трибосистем схематично можна уявити як багатокомпонентне середовище, в якому містяться базова олива (середовище), поверхнево-активні речовини (ПАР), продукти зносу від пар тертя і частки забруднень органічного і неорганічного походження (рис. 4.1).

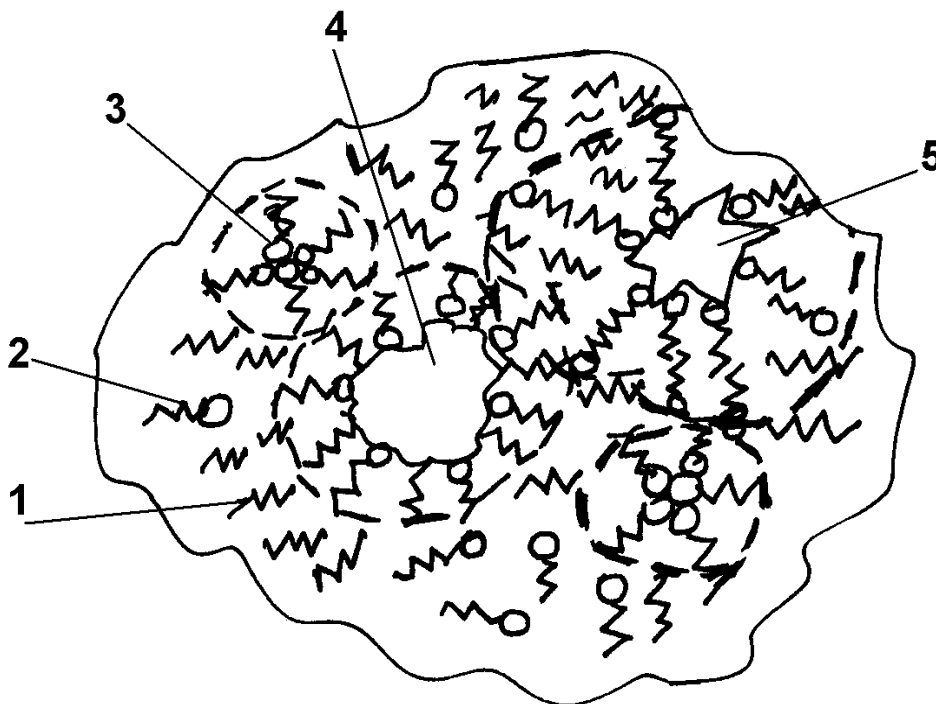


Рис. 4.1. Структура змащувального матеріалу:

1 – молекула базової оливи; 2 – молекула ПАР (мономер);  
3 – асоціати ПАР (міцели); 4 – частина забруднення твердого неметалевого походження; 5 – продукт зношування, вкритий оболонкою ПАР

Ці компоненти завдяки взаємодії між собою за рахунок кінетичних процесів можуть утворювати нові структури і комбінації. Змащувальні матеріали являють собою колоїдні системи.

Базові оливи за своїм складом теоретично відносяться до неполярних діелектриків, в яких молекули займають у просторі хаотичний стан, тобто постійно коливаються в залежності від температури.

Оливи отримують у результаті переробки нафти первісною перегонкою на фракції з наступним очищенням мастильних дистилатів. Вуглеводні, що входять до складу базової оливи, мають приблизно однакову молекулярну масу та підрозділяються на три основні групи:

**1. Парафіни (алкани)** - граничні вуглеводні, які можуть мати як нормальну будову, так й ізобудову у вигляді розгалужених ланцюжків. При низьких температурах парафіни кристалізуються, тому у малов'язких базових оливах наявні тільки легкі парафінові фракції, які забезпечують пологоу в'язкісно-температурну характеристику.

**2. Нафтени (циклопарафіни).** Молекули цих вуглеводнів являють собою кільця (цикли), які утворені п'ятьма або шістьма метиленовими групами, або мають змішану будову. Нафтеніві вуглеводні є бажаними компонентами тому, що їх підвищений вміст приводить до поліпшення в'язкісно-температурних властивостей і термічної стабільності олив, особливо робочих рідин.

**3. Ароматичні вуглеводні (арени).** Вони також характеризуються циклічною будовою. Кожний цикл складається з шести груп  $-CH-$ , тому зв'язки молекул вуглеводнів виявляються насиченими. Це визначає їх меншу стабільність та кращі змащувальні властивості у порівнянні з парафінами і нафтенами.

Крім того, до складу олив входять вуглеводні змішаної будови, які являють собою комбінації розглянутих вище типів вуглеводню. До складу базових мастил можуть входити поверхнево-активні компоненти, тобто продукти перетворень вуглеводнів змащувального матеріалу під час його експлуатації або зберігання.

Молекули базової оливи є тим середовищем, до якого додають різного роду присадки з метою поліпшення

властивостей у залежності від призначення змащувального матеріалу. Кількість присадок складає 2...15% (від маси) і вони виконують такі функції:

- поліпшення в'язкісно-температурних характеристик - в'язкісні присадки (до 10%);
- підвищення термоокисної стабільності – антиокисні присадки (0,3...0,5%);
- зниження температури застигання мастила – депресорні присадки (0,1...1,0%);
- запобігання корозії – антикорозійні (до 0,5%);
- зниження спінення – протипінні присадки (0,002...0,005%);
- зниження зносу пар тертя – протизносні присадки (до 1%), протизадирні – (0,1...0,3%).

Молекули ПАР, що входять до складу різних присадок, мають подібну будову, де головним є радикал виду  $C_nH_{n+1}$ , активна група  $-COOH$ ,  $-NH_2$ ,  $-COOM_e$  та ін. (рис. 4.2).

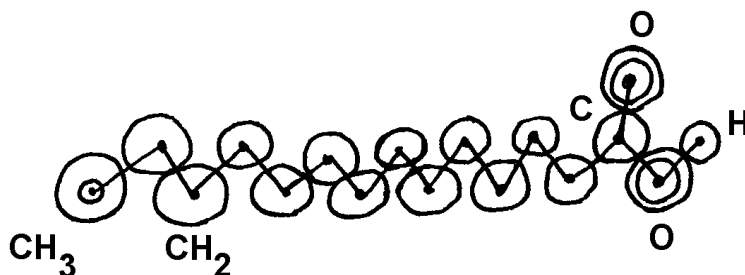


Рис. 4.2. Схема будови молекули ПАР

В окремих ПАР молекула може містити декілька активних груп (наприклад, алкеніляторні кислоти мають у своїй будові дві групи  $-COOH$ ). Активна група володіє постійним дипольним моментом, завдяки розбіжності центрів позитивних і негативних зарядів. У спеціальній літературі активну групу вважають полярною часткою молекули, а радикал – неполярною часткою.

Хімічна будова, полярність, поляризованість молекул ПАР та їх молекулярні взаємодії визначають всі об'ємні і поверхневі властивості присадок.

Полярність – це стаціонарний зсув електронних хмарок атомів або груп атомів, що приводить до появи дипольного моменту. Його величина визначається як добуток вектора, проведеного від негативного заряду до позитивного, і величини заряду. Величини дипольних моментів для різних полярних груп ПАР різні. Поляризованість – здатність збільшувати поверхню під впливом зовнішніх факторів.

Поведінка таких молекул у базовій оливі (середовищі) з точки зору взаємодії між собою та з іншими компонентами рідких змащувальних середовищ може бути різною. Визначна роль належить головному критерію – концентрації ПАР у мастильному матеріалі (базовій оливі). З її збільшенням зростає імовірність взаємодії молекул ПАР між собою тому, що вони володіють власним електричним полем (мають постійний дипольний момент). Така взаємодія приводить до зростання частки агрегованої речовини. Структура агрегатів зображена на рис. 4.3.

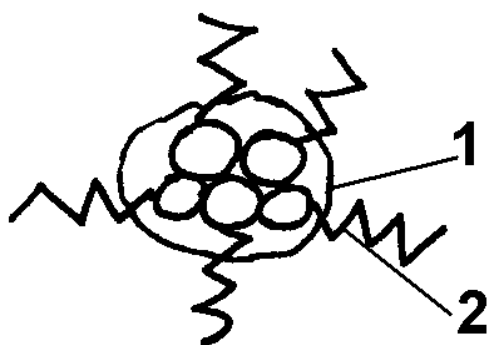


Рис. 4.3. Схема структури агрегатів ПАР у базовій оливі

У спеціальній літературі ці агрегати називають міцелами. Особливістю таких структур є те, що у них полярна група розміщена у центрі, а вуглеводневі хвости знаходяться зовні, тобто взаємодіють з середовищем (оливою). При досяганні деякої концентрації, яка називається критичною концентрацією міцелоутворення (ККМ) (нижче якої стійкі міцели не виникають, а вище – знаходяться у рівновазі з неасоційованими молекулами), всі ПАР знаходяться в міцелярному стані. Крім того, розрізняють  $ККМ_1$ ,  $ККМ_2$ . Перша відповідає вказаному вище визначенню, а

друга – концентрація ПАР, вище якої всі молекули знаходяться у асоційованому стані. Діапазон між  $ККМ_1$  і  $ККМ_2$  відповідає рівноважній відстані між мономерами (поодинокі молекули) і міцелами розчиненої речовини.

Таким чином, молекули ПАР можуть знаходитися як у вигляді мономерів, так і в агрегатному стані. Структура змащувального матеріалу у стані поставки зображена на рис. 4.4.

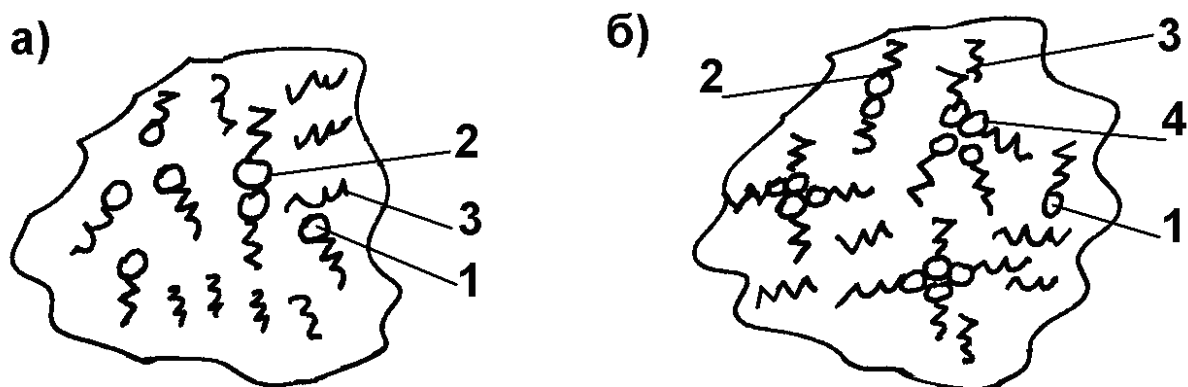


Рис. 4.4. Схема структури рідкого змащувального матеріалу у стані поставки:

- а) концентрація ПАР нижче критичної; б) концентрація ПАР вище критичної; 1 – мономерна форма ПАР; 2 – димерна структура ПАР (дві молекули, що з'єднані між собою); 3 – молекули базової оливи; 4 – агрегати ПАР (міцели)

Слід відзначити, що присадки, які покращують змащувальну властивість, можуть бути двох видів: поверхнево-активні та хімічно активні. Змащувальна дія поверхнево-активних присадок заснована на екрануванні силового поля поверхні тертя і утворенні за рахунок адсорбції на поверхні металу адсорбційних шарів. Хімічно активні присадки також володіють деякою поверхневою активністю, за рахунок якої вони адсорбуються на поверхнях тертя (перший етап взаємодії). Далі присадки вступають у хімічну реакцію з металом, при цьому виділяються активні елементи: сірка, фосфор, хлор, азот, кисень та ін. В результаті утворюються модифіковані шари на поверхнях тертя, і саме вони перешкоджають їх безпосередньому контакту (поверхонь тертя). Такого роду присадки поліпшують



протизадирні властивості змащувальних матеріалів і можуть покращити протизношувальні властивості, наприклад типова м'яка протизношувальна присадка – діалкілдітіофосфат цинку).

У процесі граничного змащування присадки грають вирішальну роль в зношуванні поверхонь тертя. Внаслідок цього утворюються частинки зносу, які відносяться до механічних домішок неорганічного походження.

Ці частки відносяться до вторинних продуктів у трибосистемах. Теоретичні та експериментальні дослідження часток зношування показують, що їх структура практично повторює структуру поверхневих шарів металу. Форма часток зношування залежить від умов роботи вузла та властивостей поверхонь тертя, але більшість їх мають форму стружкоподібну, пластинчасту, сферичну і у вигляді осколків. Розміри часток зношування знаходяться у широких границях, але основна доля має розмір до 5 мкм. Продукти зношування таких розмірів є сильними адсорбентами і, знаходячись у змащувальному матеріалі, адсорбують на своїх поверхнях молекули поверхнево-активних речовин у полімолекулярному виконанні (вкриваються оболонкою ПАР) (рис. 4.5).

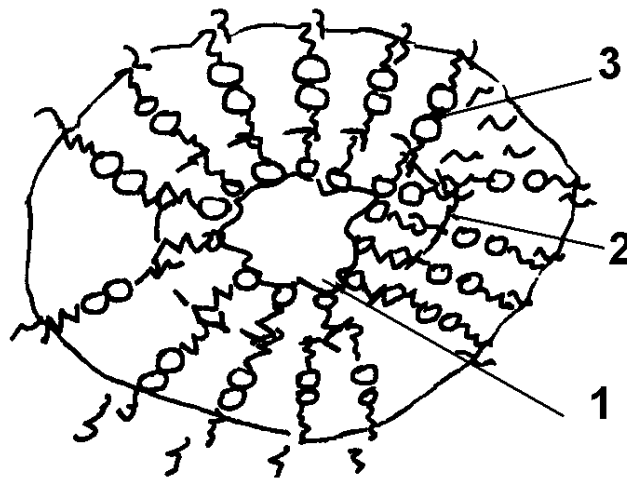


Рис. 4.5. Схема частки зношування, яка вкрита оболонкою ПАР:

- 1 – частка зношування; 2 – мономолекулярний шар;
- 3 – димерні ряди (димери) ПАР

Ураховуючи кількість активних центрів на їх поверхнях, можна припустити, що значна частка ПАР знаходиться на продуктах зношування. В такому вигляді вони знаходяться у змащувальному середовищі і їх можна вважати дисперсними частками, а отже, вони при зближенні під дією сили Ван-дер-Ваальса або кінетичних процесів можуть утворювати коагулянти.

Як показують дослідження у галузі дисперсних систем, частки дисперсної фази під дією кінетичної енергії молекул середовища (базового мастила) здійснюють інтенсивний хаотичний молекулярно-тепловий (броунівський) рух. Частки розміром до 4 мкм здійснюють коливання біля якогось свого центра. Деякі дрібні частки коливаються сильніше, а найбільш дрібні - хаотично рухаються. Кожна з них володіє деякою кінетичною енергією і внаслідок цього дрібні частки зношування (частки домішок колоїдної системи) прагнуть рівномірно розподілятися у дисперсному середовищі (базовій оливі) [1].

На частки зношування діють сили гравітаційного поля, які урівноважуються дифузійними процесами. Згідно з аналізом дифузійних процесів, швидкість дифузії у колоїдних системах (базових оливах) у сотні тисяч разів менше, ніж швидкість молекул у рідинах.

Кількість механічних домішок змінюється у широкому діапазоні і в залежності від фільтруючих елементів системи складає від 0,1 до 0,2% за масою. Частка продуктів зношування з них складає від 30 до 41%. Аналіз мінералогічного складу неорганічних забруднень показує, що у робочих рідинах (змащувальних матеріалах гідроприводів) міститься біля 70...85%  $\text{SiO}_2$  (кварц), 10...15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (корунд) і до 20% оксидів заліза ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ), заліза (Fe), а також невелика кількість інших оксидів і металів. Майже всі механічні домішки також адсорбують на своїх поверхнях молекули ПАР. При цьому інтенсивність адсорбції молекул ПАР поступається адсорбції на поверхнях металевих часток. Таким чином, змащувальні матеріали під час експлуатації необхідно уявляти як гетерогенну систему, у якій відбувається багато взаємозв'язків між її компонентами.

В учбовій літературі дуже рідко можна зустріти описування закономірностей, які відбуваються при експлуатації вузлів тертя у граничному шарі з урахуванням його складу і структури. Ці явища обумовлені складністю процесів, що відбуваються у трибосистемі.

Існуючі фільтруючі системи змащувальних матеріалів поглинають разом з механічними домішками і велику кількість ПАР, що приводить до зниження їх концентрації.

### 4.3. Гідродинамічне змащення

**Гідродинамічне змащення** – вид мастильної дії, при якому здійснюється повний поділ поверхонь тертя мастильним матеріалом у результаті самозбудливого тиску в шарі рідини при відносному русі поверхонь, що обмежують мастильний шар [14, 15].

Розглянемо рух поверхонь тертя, з яких одна – нерухома (рис. 4.6) і між ними зазор, заповнений рідким мастильним матеріалом.

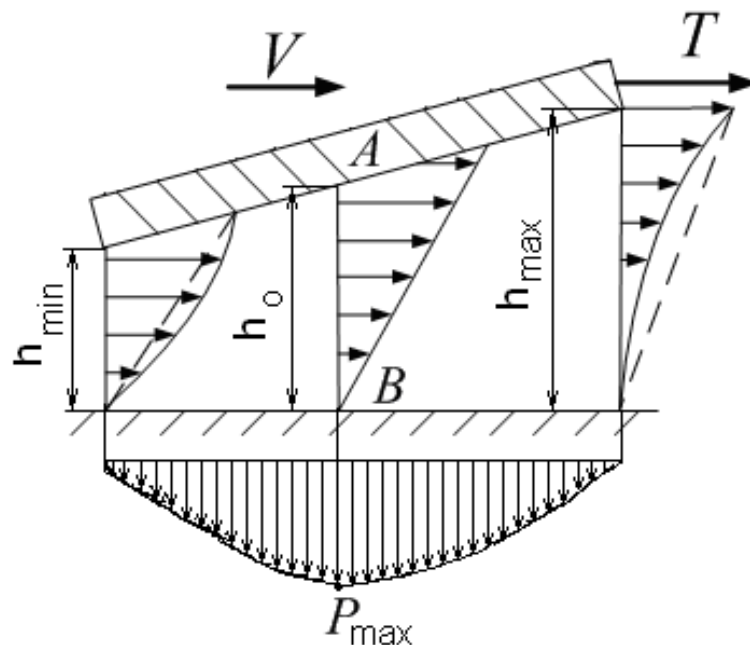


Рис. 4.6. Схема розподілу швидкостей ( $V$ ) і тиску ( $P$ ) у мастильному шарі при гідродинамічному змащенні

Умови, необхідні для забезпечення гідродинамічного змащення, такі:

- змінний перетин мастильного зазора (мастильний шар повинен мати клиноподібну форму);
- у мастильному шарі при відносному ковзанні повинні виникати і підтримуватися внутрішній тиск;
- мастильний шар повинен повністю розділяти ковзні поверхні, а його товщина повинна бути не менше суми висот мікроступів робочих поверхонь.

Якщо значення вхідного та вихідного зазора між поверхнями різні, то в шарі мастильного матеріалу відбудеться перерозподіл тиску і, згідно зі схемою (рис. 4.6), швидкості ковзання шарів мастильного матеріалу на вході, у центрі і на виході будуть різними. Площа під кожною кривою розподілу швидкостей по товщині мастильного матеріалу залишається постійною для будь-якої точки відповідно до умови нерозривності потоку.

В аналітичній формі зв'язок між гідродинамічним тиском  $p$ , що виникає в шарі змащувального матеріалу, і швидкістю відносного переміщення поверхонь описується таким рівнянням:

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu V_{\Sigma} \cdot \frac{h_0 - h}{h^3}, \quad (4.1)$$

де  $h$  – величина зазора з координатою  $x$ ;

$\mu$  – динамічна в'язкість оливи;

$V_{\Sigma}$  – підсумкова швидкість поверхонь, що труться;

$h_0$  – величина зазора, де тиск найбільший.

В умовах гідродинамічного змащення працюють радіальні та упорні підшипники ковзання і інші вузли тертя. Течія мастильних матеріалів при гідродинамічному змащенні підкоряється закону грузлої течії, сформульованому І. Ньютоном. Опір відносного переміщення поверхонь тертя зумовлюється внутрішнім тертям мастильного матеріалу. При цьому коефіцієнт тертя має значення в діапазоні 0,001...0,01, а визначальною характеристикою мастильного матеріалу є його в'язкість.

#### 4.4. Гідростатичне змащення

Гідростатичне відноситься до рідинного змащення, при якому поверхні тертя розділені мастильним шаром, що подається під розрахунковим тиском у зазор між нерухомими поверхнями [1].

Головна відмінність цього виду рідинного змащення полягає у витраті додаткової енергії, необхідної для забезпечення роботи гідростатичних насосів, які забезпечують подачу мастильного матеріалу в зазор між поверхнями тертя під необхідним тиском. Крім цього, конструкція поверхонь тертя повинна передбачати для створення гідростатичного підйому відповідні «кишені» у них, що трохи ускладнює конструкцію трибосистеми.

Розрахунок підшипників, що працюють у цьому режимі змащення, повинен включати етапи:

- на підставі розрахункових зовнішніх навантажень визначення товщини мастильного шару, що повинна за несучою здатністю витримати розрахункове навантаження;
- розрахунок гідравлічної системи, що забезпечує подачу мастильного матеріалу в зазор сполучень з урахуванням гідравлічних витрат.

#### 4.5. Гідростатодинамічне змащування

Гідростатодинамічне змащування має місце у великогабаритних підшипниках, де пуск до роботи трибосполучення забезпечується за рахунок гідростатичного змащення, а робочий режим – гідродинамічного змащення. Таким чином, це змащення є комбінованим варіантом гідростатичного і гідродинамічного змащень. Розподіл тиску в мастильному шарі між поверхнями тертя являє собою суму тисків.

$$P = P_{ГД} + P_{ГС} \quad , \quad (4.2)$$

де  $P_{ГД}$  – тиск, що виникає внаслідок гідродинамічного ефекту;

$P_{ГС}$  – тиск, що виникає внаслідок гідростатичного ефекту.

Особливе значення має раціональний вибір форми і розташування кишень для забезпечення гідростатичного тиску. Схематично такий вид змащення зображений на рис. 4.7 [1].

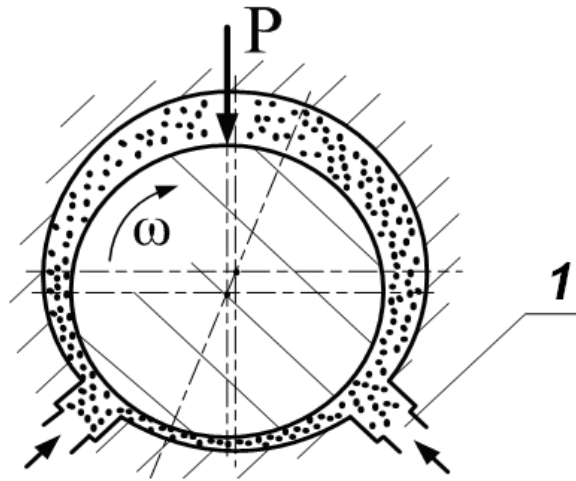


Рис. 4.7. Схема роботи трибосполучення в режимі гідродинамічного змащення: 1 – кишень

#### 4.6. Еластогідродинамічне змащення

Режим навантаження сполучень характеризується широкими інтервалами зміни швидкості, тиску, перепадами температур, в'язкості мастильних матеріалів.

Фізичний механізм взаємодії поверхонь тертя змінюється в порівнянні з описаними в гідродинамічному та гідростатичному змащеннях. Відмінною рисою еластогідродинамічного змащення від гідродинамічного є пружна деформація поверхні тертя в зоні контакту. При цьому товщина мастильної плівки в зазорі є величиною змінною.

Припустимо, що високий тиск у зоні контакту викликає збільшення в'язкості мастильного матеріалу і у центральній частині зазора, заповненого мастильним матеріалом. Внаслідок пружної деформації ділянки контактуючих поверхонь майже паралельні. На виході із зазора, де припиняється пружна деформація поверхонь, його величина різко зменшується, отже, і товщина мастильного шару теж (рис. 4.8).

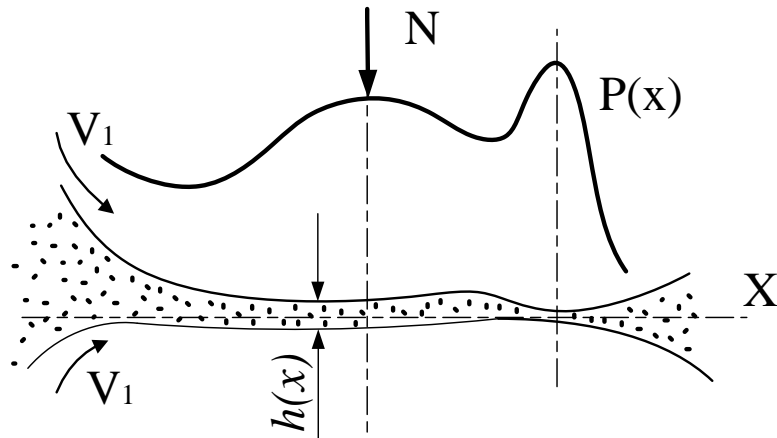


Рис. 4.8. Розподіл тиску в зоні контакту при гідродинамічному змащенні

Гідродинамічний тиск в цьому випадку на виході різко зростає, тому що властивість нерозривності потоку спричиняє збільшення швидкості руху мастильного матеріалу. Такого роду фактори приводять до складного поведження мастильного матеріалу в зоні контактів і за своїм характером явище, що відбувається, можна віднести до динамічного. Товщина плівки при такому змащенні може перебувати в широких межах: від 0,1 до 10 мкм. Важлива роль в такому процесі належить топографії поверхні тертя й в'язкісно-температурній характеристиці мастильного матеріалу.

В умовах еластогідродинамічного змащення перебувають неприроблені поверхні важконавантажених вузлів тертя, а також робота зубчастих, ланцюгових передач, полімерних підшипників ковзання і т.п.

При такому виді змащення необхідно користуватися основами еластогідродинамічної теорії, що досить глибоко розглянута в роботах [14, 16-18].

## 4.7. Граничне змащування

### 4.7.1. *Поняття та відмітні особливості граничного змащування*

Наведена раніш класифікація основних видів зовнішнього тертя достатньо обґрунтовано показує, що трибосистеми машин та механізмів у процесі експлуатації можуть знаходитися у різному стані. Ці стани характеризуються закономірностями фізичних і хімічних процесів, які відбуваються як у змащувальному, так і в приповерхневих шарах поверхонь тертя. Найбільший технічний інтерес викликає граничне змащування тому, що практично всі вузли тертя, якщо розглядати їх роботу у часі, знаходяться значний час у режимі граничного змащування.

**Граничне змащування** – вид змащувальної дії, коли на поверхнях тертя утворилась адсорбційна плівка будь-якої природи. Товщина плівки може коливатися від одного молекулярного шару (моношару) до радіуса дії силового поля твердої фази (поверхні тертя). Граничне змащування має свої відмітні особливості від інших видів змащування. До них відносяться:

- змащувальний матеріал, розподілений тонким шаром на поверхні тертя, за своїми властивостями (електричними, механічними, оптичними) відрізняється від його властивостей в об'ємі;
- граничний шар являє собою продукти взаємодії активних компонентів змащувального матеріалу з поверхневим шаром твердого тіла;
- граничні шари володіють анізотропією електричних, механічних, оптичних властивостей, тобто властивості вздовж осі, що перпендикулярна до поверхні поділу фаз, відрізняються від властивостей по двох інших осях;
- тертя при граничному змащуванні супроводжується зношуванням сполучених поверхонь.

Механізм граничного змащування дуже складний внаслідок різних за своєю фізичною природою процесів, що відбуваються,



адсорбційної, фізико-хімічної і механічної взаємодії. Граничні шари, що утворюються, на поверхнях поділу твердих фаз здатні зменшувати витрати на тертя. Це явище пояснюється такими основними причинами [3, 7, 14, 19]:

- зниження адгезійної складової сили тертя. Таке явище обумовлено тим, що існуючі електромагнітні поля твердої фази (поверхні тертя) екранізуються за рахунок адсорбційних процесів зі змащувального середовища молекул ПАР. З фізичної точки зору граничний шар сприяє переходу пари тертя з «сухого» режиму у змішаний режим;

- граничні шари внаслідок анізотропічних властивостей здатні витримувати великі нормальні навантаження і при цьому поздовжній зсув в їх шарах відбувається при невеликих тангенціальних умовах (наприклад, модуль стиснення граничного шару на багато порядків вище, ніж модуль зсуву);

- збільшується фактична площа контакту поверхонь тертя за рахунок адсорбційного пластифікування їх поверхневих шарів. Таке явище обумовлено за рахунок взаємодії активних компонентів змащувального матеріалу з поверхневим шаром твердої фази.

#### ***4.7.2. Механізм формування, склад та будова граничних шарів***

Граничні шари можуть мати різну та дуже складну будову. Вони містять всі форми структуризації від твердого кристалічного до рідкого стану, включаючи мезоморфні види молекулярної колективізації.

Автори багатьох робіт пропонують різні за будовою і складом граничні змащувальні шари, але незважаючи на їх значну цінність, вони, в основному, відображають тільки початковий період роботи трибосистем. Крім того, у моделях граничного шару, що пропонуються, а також у послідовності його формування не враховуються реальні змащувальні середовища, з яких і відбувається їх утворення.

Доцільно розглядати механізм формування граничних шарів з позиції змінювання параметрів трибосистеми і будови змащувальних матеріалів у процесі роботи. Основну закономірність зношування трибосполучень можна прийняти у вигляді моделі, яка була запропонована В.Ф.Лоренцом з урахуванням основних фізичних процесів, що відбуваються на початковому періоді роботи пар тертя.

Склад і будову граничних шарів на поверхнях тертя в умовах експлуатації трибосистем доцільно пояснити з урахуванням закономірностей зношування.

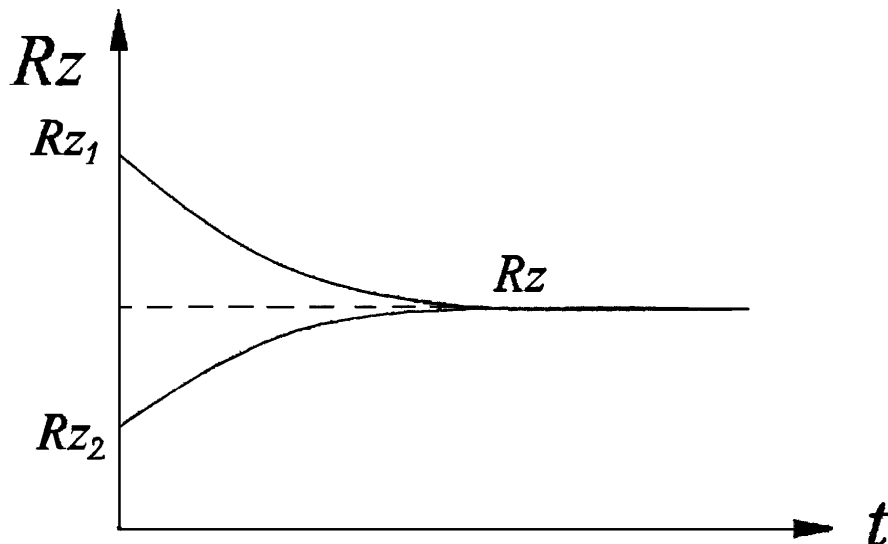
Початковий період супроводжується інтенсивним зносом і формуванням вторинних структур. Цей період можна віднести до несталого режиму, в якому мають місце основні фізичні явища:

1. Під дією зовнішніх навантажень відбувається інтенсивне відділення з поверхонь частинок у вигляді продуктів зносу. Поверхні тертя на окремих ділянках набувають властивостей ювенільної поверхні, що приводить до інтенсифікації адсорбційних процесів молекул ПАР і молекул базового мастила. Проте, внаслідок своєї будови молекули ПАР володіють жорстким дипольним моментом. Вони витісняють з адсорбційного шару неполярні молекули базової оливи і при достатній кількості їх в стані мономерів і димерів ювенільні ділянки поверхні тертя покриваються адсорбційним шаром ПАР.

2. Оскільки продукти зносу з моменту їх появи володіють, як і поверхні тертя, властивостями активних центрів адсорбції, то вони покриваються полімолекулярним шаром ПАР і в такому вигляді разом з потоком рідких мастильних матеріалів рухаються по зазорах пар тертя в гідродинамічному режимі.

3. Якщо розглядати трибосистему з позицій динамічних процесів у часі, то одночасно відбувається процес зміни мікрогеометрії поверхонь тертя, який володіє властивістю загальної закономірності зношування поверхонь тертя. Цей факт підтверджений широким спектром експериментальних досліджень [1].

В різних режимах навантаження і у відмінностях матеріалів пар тертя, а також у відмінностях мікрогеометрії поверхонь тертя період адаптації трибосистеми завершується «рівноважною шорсткістю», яка відтворюється в процесі зношування і залишається в середньому постійною величиною (рис. 4.9).



$Rz$  – рівновагова

Рис. 4.9. Зміна мікрогеометрії робочих поверхонь тертя в період адаптації трибосистеми

4. Період прироблення поверхонь тертя супроводжується інтенсивним тепловиділенням. Як відзначають ряд авторів [1, 20, 21], тепла частина потоку ентропії приводить до збільшення ентропії тіла і теплота передається від зони тертя з підвищеною температурою в тіло з меншою температурою.

5. Енергія поверхневих шарів (поверхні) тіла з моменту початку формування вторинних структур з'являється у вигляді перетворень механічної енергії зовнішньої дії в інші види енергії. Ряд авторів [1, 22-24] стверджують і доводять теоретичними і експериментальними дослідженнями, що при руйнуванні змащувальної плівки механічна енергія переходить, в основному, в теплову. На наш погляд, ця гіпотеза має місце тільки в одному критичному епізоді розподілу енергії. Головним чином, енергія

витрачається на формування вторинних структур (полімеризація, формування дисперсних фаз і в структурі модифікованого шару оливи і приповерхневого шару поверхні тертя та ін.).

На основі загальних закономірностей зношування і фізичних процесів, що відбуваються в трибосистемі в період прироблення, можна припустити таку послідовність формування граничних шарів:

1. В період початку роботи трибосистеми молекули ПАР найбільш інтенсивно адсорбуються на їх поверхнях. Так, згідно з законами фізики, відбувається конкурентна адсорбція: ПАР витісняють з цих ділянок молекули базового мастила і цей процес відбувається до моменту насичення. В першу чергу йде формування мономолекулярних шарів на поверхнях тертя і продуктах зносу. ПАР витрачаються на ці ділянки і згодом - на поверхні тертя в цілому. Ці фізичні процеси достатньо глибоко вивчені на сучасному етапі і існуюча теорія, заснована на головному параметрі - роботі виходу електрона з поверхні тертя, - кількісно описує цей процес. В цей період на поверхнях тертя і продуктах зносу формуються моно- і полімолекулярні шари ПАР.

Таким чином, якщо розглядати тільки фізичну адсорбцію при достатній концентрації ПАР поверхні тертя, то продукти зносу покриваються моно- і полімолекулярними шарами ПАР. Такий процес має місце до того моменту, коли полімолекулярний граничний шар до деякої граничної його товщини відтворює рівноважний мікрогеометричний профіль поверхні тертя (ефект Толанського). На поверхнях тертя і продуктах зносу формуються адсорбційні шари, що складаються з трьох фаз: твердої (кристалічної), рідкокристалічної і рідкої. Товщина таких полімолекулярних шарів обумовлена, головним чином, величиною радіусу дії силового поля поверхні тертя. Схематично такий процес в завершальній стадії можна подати згідно з роботою [7] (рис. 4.10).

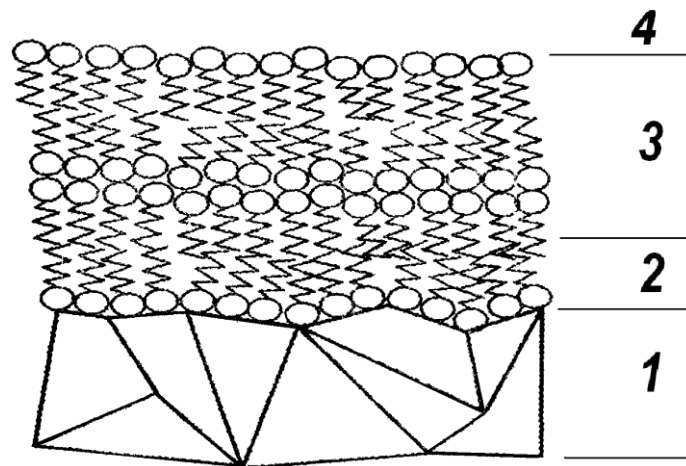


Рис. 4.10. Схема структури граничного шару на поверхні тертя на початковому етапі роботи трибосистеми:

- 1 – дрібнодисперсна рідка фаза; 2 – насичений ряд димерів;
- 3 – перший насичений мономолекулярний шар;
- 4 – полікристалічна поверхня металу

Головним несучим елементом в такій структурі є рідкокристалічна зона граничного шару, бо якщо внаслідок дії зовнішніх навантажень перейти в область полікристалічної зони, то зношування поверхонь тертя може знаходитися в прискореному режимі. Тому зовнішнє навантаження в цей період повинно врівноважуватися здатністю рідкокристалічного шару. На цьому етапі відбуваються різного роду трибохімічні процеси.

2. Наступний етап можна віднести до початку формування модифікованих шарів оливи. Трибосистема породжує вторинні продукти, що супроводжується подальшою самоорганізацією. Цей етап можна вважати завершальним з позицій формування вторинних продуктів, в першу чергу, продуктів зносу, покритих оболонкою ПАР. Змащувальне середовище зазнає істотних змін: в його складі з'являється абсолютно новий компонент - продукти зносу. Вони пересуваються разом з потоком і знаходяться в зваженому стані, як і молекули ПАР. Цей факт в описанні фізичних процесів на сьогоднішній день недостатньо вивчений і більшість авторів упускає його з уваги при розробленні схем складу і структури граничних шарів оливи.

3. На третьому етапі відбувається формування модифікованих шарів оливи, оскільки з'явився новий компонент змащувального середовища. На попередніх етапах сформувався граничний шар, який копіював мікронерівності поверхні тертя згідно з ефектом Толанського [7]. Ефект дії силового поля поверхонь тертя завершений і система зазнає якісних змін. Окрім вторинних структур, в ній з'являється ще один компонент - повітря. Його вміст, згідно з раніше проведеними дослідженнями, перевищує в процентному співвідношенні за об'ємом в оливах навіть протизношувальні присадки, що додаються, і складає від 6 до 18%. Змащувальне середовище змінюється і в більшій мірі є частково повітряно-дрібнодисперсним середовищем і в цей процес включаються нові компоненти. Шар, сформований, головним чином, за рахунок молекул ПАР, вже стає умовною «підкладкою» для подальшого його формування залежно від режимів навантаження. Пара тертя надалі розділяється завдяки, головним чином, продуктам зносу, покритим оболонкою ПАР, і різним міцелярним структурам, які властиві змащувальному середовищу. Такий несталый процес продовжується до тих пір, доки всі «шорсткості» її не покриваються другим шаром, тобто до моменту вирівнювання похибок регулярності його будови, викликаних першим граничним шаром. Формування таких вторинних шарів обумовлено як кінематичними процесами, пов'язаними з рухом потоку змащувального середовища в гідродинамічному режимі, так і виходом трибосистеми з енергетичних позицій на сталий режим. Таким чином, в процесі тертя при сталому режимі (рис. 4.11) беруть участь три головні шари: перший - підповерхневий; другий - активний поверхневий шар, що утворений, головним чином, з молекул ПАР; третій - модифікований шар, компонентами якого є як продукти зносу, так і міцелярні і агрегатовані структури базової оливи, між якими є повітря. Схема такої структури наведена на рис. 4.11.

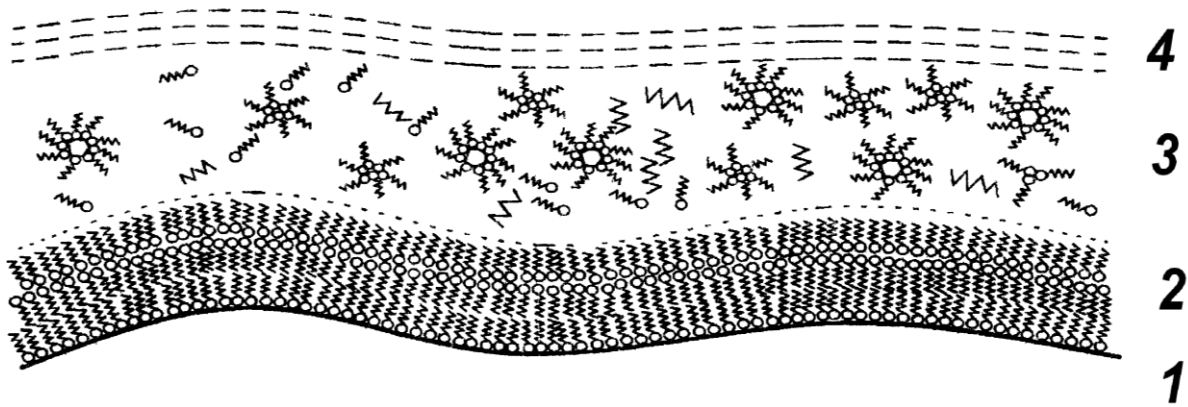


Рис. 4.11. Структура поверхні тертя:

1 - підповерхневий шар; 2 - активний поверхневий шар, що складається з молекул ПАВ; 3 - модифікований шар, компонентами якого є продукти зносу, молекули ПАВ, повітря та ін.; 4 - змащувальний матеріал в об'ємі

Потрібно відзначити, що наведені етапи в описанні фізичних процесів прироблення розділені умовно, бо в часі вони можуть протікати одночасно, а отже, в цілому структура змащувальних шарів може включати компоненти кожного шару.

Фундаментальним в процесі тертя є не тільки силове поле поверхні тертя, а і структурно-енергетичні властивості змащувального шару, який за своїм складом і будовою є багатоконпонентним середовищем, властивості якого досліджені частково. Згідно з наведеною структурою він може володіти особливими властивостями (механічними, електричними та ін.), які мають великий практичний інтерес з позицій підвищення ресурсу вузлів, в яких є трибосполучення з використанням рідких змащувальних середовищ. Продукти зносу належать до вторинних структур, входять до складу змащувального середовища і грають важливу роль у формуванні змащувального шару між поверхнями тертя.

## 4.8. Специфічні методи організації граничного змащення

### 4.8.1. Шорсткість поверхонь тертя та її вплив на процес тертя

У процесі тертя і зношування мікрогеометрія поверхонь тертя зазнає значних змін. При цьому найбільші зміни стосуються більш м'якої з поверхонь, що сполучаються. Її шорсткість наближається до шорсткості більш твердого контртіла доти, поки не досягне рівноважної величини, характерної для даного режиму тертя. Оскільки шорсткість поверхні впливає на всі процеси, що протікають в області контакту взаємодіючих поверхонь, включаючи їхнє деформування, тертя і зношування, то в трибології їй приділяється велика увага. Для прироблених поверхонь тертя значення параметрів шорсткості ( $R_a$ ) становить [1, 9]: гільза циліндра – 0,04 мкм, поршневе кільце – 0,02 мкм, шатунні вкладиші – 0,24 мкм. Від величини шорсткості залежить коефіцієнт тертя [1] (рис. 4.12).

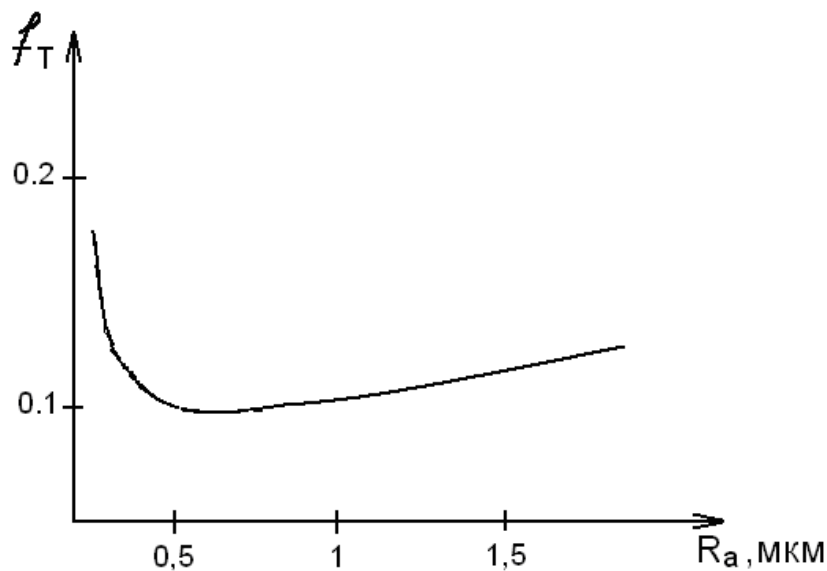


Рис. 4.12. Залежність коефіцієнта тертя від параметра  $R_a$  шорсткості поверхні при товщині шару касторової оливи



Ця залежність приграничного змащення характеризується спадною кривою  $i$  (при  $R_a = 0,15 \dots 0,25$  мкм) значення коефіцієнта тертя знижується, а при подальшому збільшенні параметра  $R_a$  спостерігається його зростання. З цих експериментальних даних виходить, що шляхом створення раціональної шорсткості можна домогтися істотного зниження енерговитрат на тертя. Таке завдання вирішується шляхом створення на поверхнях тертя найтонкішого шару матеріалу, що відрізняється від основного металу меншою міцністю на зрушення, більшою активністю у взаємодії з мастильним матеріалом і до утворення на цьому шарі міцної граничної плівки. Якщо розглядати підшар матеріалу на поверхні тертя, як проміжне тіло (крім адсорбційної плівки), то його функції в процесі тертя сприяють такому:

- зменшенню шорсткості поверхонь тертя за рахунок заповнення між виступаючими гребенями поверхні тертя проміжним шаром;
- завдяки деформації матеріалу підшару забезпеченню збільшення фактичної площі контакту, а отже, зниженню питомих тисків у сполученні;
- мінімізації адгезії пар тертя, а у випадку прориву адсорбційної плівки з полярних компонентів змащення реалізації тільки взаємодії підшарів, що захищають поверхні тертя;
- інтенсифікації процесу адсорбції молекул ПАР на підшарі за рахунок збільшення його силового поля;
- збільшенню товщини проміжного шару між поверхнями тертя як за рахунок підшару, так і за рахунок товщини адсорбованої плівки ПАР, що сприяє зниженню інтенсивності зношування поверхонь тертя;
- зменшенню роботи виходу електронів (енергії, необхідної для видалення електрона із середовища дії атомів і іонів твердого тіла).

У цей час специфічні методи організації граничного змащення знаходять широке застосування, тому що їхнє використання, як підтверджують численні експериментальні дослідження, приводить до збільшення ресурсу пар тертя та зниження енерговитрат на їхню експлуатацію.

#### 4.8.2. Двошарове граничне змащення

На поверхню тертя наноситься шар м'якого металу або полімеру, що має такі головні властивості:

- має більшу поверхневу активність в адсорбційному ефекті у порівнянні з поверхнею тертя до ПАР мастильного матеріалу;
- за рахунок реалізації зрушення при терті заповнює шорсткості поверхні тертя і тим самим сприяє формуванню полімолекулярного граничного шару.

У якості шару м'якого металу, наприклад, Т.І.Фукс запропонувала використати «кадмієвий підшар» [25].

#### 4.8.3. Вибірковий перенос

Вибірковий перенос найбільш яскраво відбиває ефект двошарового змащення. Принципова схема такого контакту поверхонь тертя має такий вигляд (рис. 4.13).

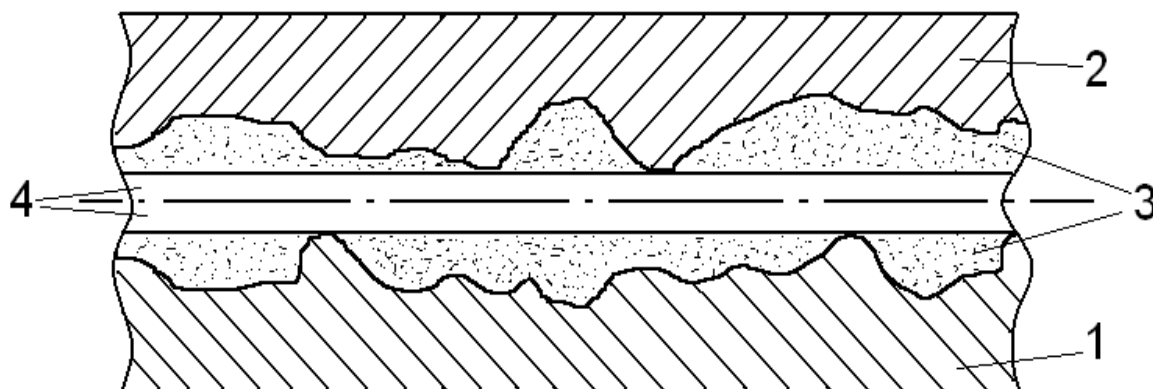


Рис. 4.13. Схема контакту поверхонь тертя при вибіркому переносі:

- 1,2 - поверхні тертя; 3 – сервовітна плівка;
- 4 – змащувальна олива

Вибірковий перенос був відкритий Д.Н. Гаркуновим і І.В. Крагельським. Відповідно до проведених досліджень такий режим дозволяє одержати коефіцієнти тертя в межах 0,01...0,005, а інтенсивність зношування -  $10^{-10}$ ... $10^{-12}$ , тобто має місце ефект «беззношування».

Розглянемо фізичні основи вибіркового переносу. Варто помітити, що таке явище реалізується за певних умов, наприклад, при терті сталі по мідних сплавах у ряді середовищ (у гліцерині, спиртогліцеринових середовищах та ін.) і у відповідних режимах пар тертя. Під дією гліцерину в процесі тертя відбувається вибіркоче анодне розчинення елементів, які легують бронзу. Атоми цих елементів переходять в мастильне середовище, а поверхня бронзи збагачується міддю. У відбудовному середовищі, яким є гліцерин, ця мідь не окислюється і тому дуже активна. Вона легко взаємодіє зі сталеву поверхнею, покриваючи її тонким шаром. У результаті утворюється сервоитна плівка (рис. 4.13) товщиною 1...2 мкм. Її відмінна риса полягає у тому, що вона має низьку міцність на зрушення, не наклепується при терті, є добрим адсорбентом для активних компонентів середовища, а крім того, має високу теплопровідність, знижуючи температуру поверхні тертя за рахунок відведення тепла, що є причиною зниження зносу в обмеженому діапазоні навантажень та температур.

#### ***4.8.4. Ефект металоплакування***

Ефект металоплакування досягається шляхом уведення порошків м'яких металів, їхніх оксидів і солей у рідкі та пластичні змащення. У цьому випадку частки таких наповнювачів, потрапляючи у фрикційний контакт, намазуються на поверхні тертя на ділянках фактичної площі контакту і надалі навіть заповнюють западини між мікронерівностями, покриваючи поверхні тертя тонким шаром м'якого металу. При уведенні в мастильний матеріал оксидів металу мастильне середовище відновлює їх і тому ділянки ювенільних поверхонь тертя схоплюються зі свіжеутвореним металом (тобто утворюється підшар більш міцно пов'язаний з основним металом,

ніж при простому намазуванні). Такими м'якими металами є порошки міді, олова, свинцю, їхніх сплавів. Інтенсивність зношування пари тертя при цьому знижується в 8...10 разів.

У рідких мастильних середовищах уводять у мастила маслорозчинні присадки, а також присадки, що містять метали, які під дією температури в зоні тертя і силового поля поверхні тертя розкладаються і «висаджують» метал, що покриває ділянки фактичної площі контакту. Потім на цих ділянках інтенсифікується процес адсорбції ПАР. У такому процесі можливе проходження вторинних реакцій, які утворюють з'єднання, що забезпечують додаткову мастильну дію.

У висновку слід зазначити, що в останні десятиліття виникла галузь науки і техніки, що стрімко розвивається, - нанотехнологія. Вона згідно з авторитетними прогнозами, може дати такий прогрес у трибології, як результати «комп'ютерної» революції в ХХ столітті. Одним з перспективних наукових напрямків у галузі зниження зношування поверхонь є використання нанокристалічних матеріалів для поліпшення трибологічних характеристик поверхонь тертя. Варто помітити, за матеріалами міжнародних конференцій, нанокристалічні матеріали можуть бути використані і як модифікатори, що поліпшують експлуатаційні властивості традиційно мастильних матеріалів, що випускаються. Тому в ряді літературних джерел уведено поняття – нанотрибологія.

## **4.9. Зношування елементів машин**

### ***4.9.1. Основні закономірності зношування***

Відповідно до ГОСТ 27674 **зношуванням** називають процес руйнування й відділення матеріалу з поверхні твердого тіла або накопичення його залишкової деформації при терті, що виявляється в поступовій зміні розмірів і форми тіла.

**Граничним** називають знос, що відповідає граничному стану виробу, що зношується, або його складовій частині. **Припустимим** називають знос, при якому виріб зберігає

працездатність. Припустимий знос завжди за абсолютною величиною менше граничного.

Кількісно знос, як відмічалось вище, характеризується **швидкістю зношування**  $-V$  (м/год, м<sup>3</sup>/год, г/год) – відношенням значення зношування до інтервалу часу  $t$ , протягом якого він виник, або **інтенсивністю зношування** –  $I$ . Інтенсивність зношування – відношення зносу до обумовленого шляху, на якому відбувалось зношування, або до обсягу виконаної роботи:

$$I = \frac{I}{L}. \quad (4.3)$$

Крім того, варто розрізнити **миттєву** (у певний момент часу) і **середню швидкість зношування** (за певний інтервал часу). При лінійному зносі інтенсивність зношування є безрозмірною величиною, а при ваговому - вимірюється в одиницях маси, віднесеної до одиниці шляху тертя.

Властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя характеризується зносостійкістю – величиною зворотної швидкості або інтенсивності зношування. Значення зносостійкості на практиці коливаються в широких межах ( $10^3 \dots 10^{13}$ ). Встановлено десять класів зносостійкості виробів від 3 до 12 відповідно до показника ступеня (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

#### Класи зносостійкості

<i>Клас</i>	<i>Зносостійкість</i>	<i>Клас</i>	<i>Зносостійкість</i>
3	$10^3 \dots 10^4$	8	$10^8 \dots 10^9$
4	$10^4 \dots 10^5$	9	$10^9 \dots 10^{10}$
5	$10^5 \dots 10^6$	10	$10^{10} \dots 10^{11}$
6	$10^6 \dots 10^7$	11	$10^{11} \dots 10^{12}$
7	$10^7 \dots 10^8$	12	$10^{12} \dots 10^{13}$

У процесі роботи машин показники зношування деталей і сполучень не зберігають постійних значень. Зміна зносу в часі спрощено характеризується моделлю, яка запропонована В.Ф. Лоренцом (рис. 4.14) [26].

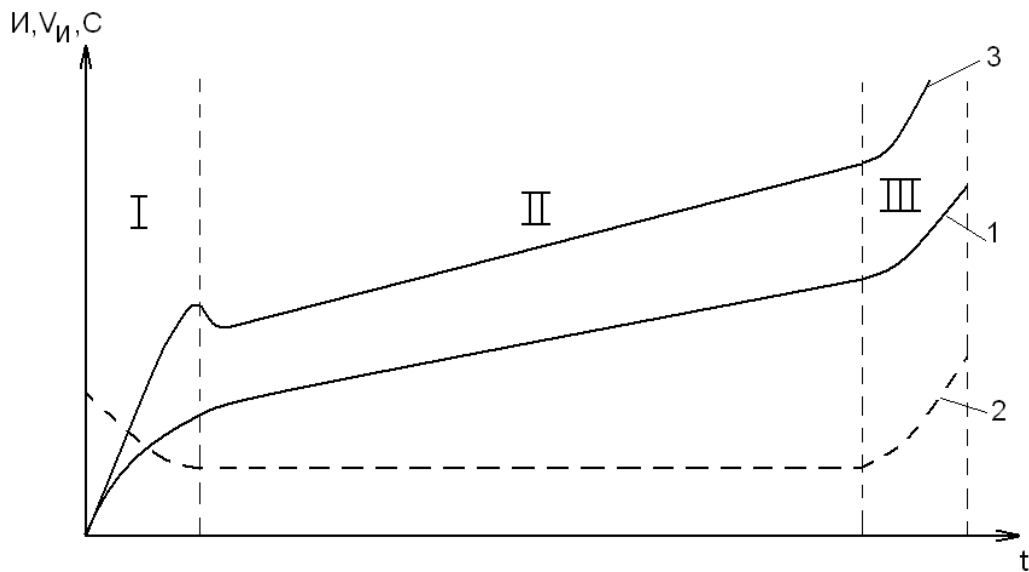


Рис. 4.14. Зміна параметрів сполучення у процесі роботи:

1 - зношування, 2 - швидкості зношування, 3 - витрати на підтримку працездатності

Швидкість зношування в кожен момент часу оцінюється кутом нахилу кривої зношування, на якій можна виділити ділянки: припрацювання - I, зношування з постійною швидкістю - II до граничного стану, і катастрофічного зношування - III (рис. 4.14).

Кожна з цих ділянок характеризується деякими властивостями, які притаманні тільки їй. Тривалість ділянки I (припрацювання) становить 1,5...2 % від ресурсу вузла тертя і у цей період відбувається процес зміни геометрії поверхонь тертя (її вигладжування) та фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів.

Такий процес характеризується інтенсивним відділенням з поверхонь тертя продуктів зношування, підвищеним тепловиділенням та інтенсивним руйнуванням виступів на поверхнях тертя. Експериментально встановлено, що при різних режимах навантаження і різних парах тертя в процесі припрацювання встановлюється однакова, так звана «рівноважна» шорсткість. У процесі припрацювання висоти нерівностей зменшуються внаслідок механічної взаємодії

поверхонь (деформаційна складова сили тертя) і при цьому спостерігаються мікрорізання, пластична деформація матеріалу на робочих поверхнях деталей сполучень в машинах.

II - ділянка характеризується невеликою, приблизно постійною швидкістю зношування і триває порівняно довго. Їй відповідає найбільша частина ресурсу вузла тертя.

III - ділянка характеризується катастрофічним зношуванням, тобто зношуванням з високою швидкістю, яке супроводжується зростанням витрат на підтримку працездатності. Початок ділянки III можна вважати кінцем ресурсу трибосполучення.

Варто помітити, що зношування вузлів тертя носить яскраво виражений випадковий характер, обумовлений імовірнісною природою контакту шорсткуватих поверхонь, зміною властивостей поверхневих шарів і мастильних матеріалів, широким спектром експлуатаційних навантажень, умов роботи та ін. Отже, описана закономірність є умовною, тому що можливі інші види кривих зношування.

Розглянемо докладніше основні види зношування, які найчастіше зустрічаються в трибовузлах БКВРМ.

#### ***4.9.2. Абразивне зношування***

Абразивне зношування відноситься за класифікацією до механічного зношування, при якому зношування матеріалу відбувається в результаті ріжучої або подряпуючої дії твердих часток. При цьому тверді частки можуть перебувати в закріпленому або вільному стані. До них відносяться: тверді частки ґрунту, мікровиступи більш твердої сполученої поверхні, металеві стружки та ін. Абразивне зношування є одним з найпоширеніших видів зношування і зустрічається при роботі вузлів тертя більшості машин і устаткування: транспорт, дорожньо-будівельна і колійна техніка, гірничорудна промисловість, сільське господарство, робочі органи та ін.

Відмітними ознаками абразивного зношування є [1]:

- участь у процесі твердих часток, що володіють різною структурою, формою, розмірами, твердістю, міцністю, незначною адгезією до тертьових поверхонь;

- тертя в присутності таких часток характеризується нестационарністю їх контактів з поверхнею, що зношується, широким спектром і високою концентрацією напруг, фізико-хімічною активацією поверхонь твердих тіл.

Основним джерелом потрапляння абразивних часток у вузли тертя машин є навколишнє середовище. Наприклад, в  $1\text{ м}^3$  повітря міститься від 0,04 до 5г пилу, який складається на 60-80% із завислих часток мінералів. Основними складовими пилу є: двоокис кремнію  $\text{Si}_2$ , окис заліза  $\text{Fe}_3$ , з'єднання  $\text{Al}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Na}$  та інших елементів. Ці частки мають високу твердість, що перевищує твердість робочих поверхонь більшості деталей машин.

Дослідження, які проведені Хрущовим М.М. [27], показали, що відносна зносостійкість чистих металів у ненаклепаному стані й сталей у відпаленому стані прямо пропорційна твердості матеріалу (рис. 4.15).

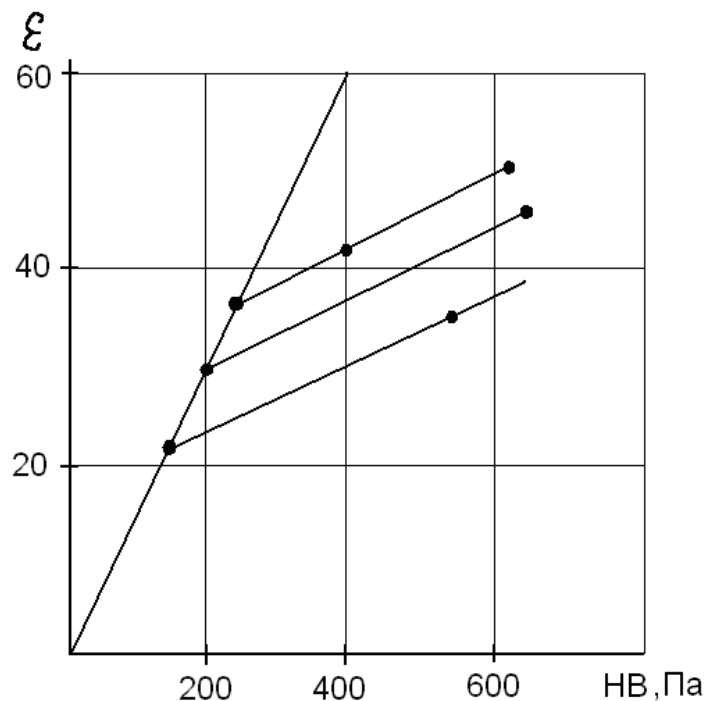


Рис. 4.15. Залежність відносної зносостійкості  $\varepsilon$  від мікротвердості  $НВ$  металів



Для термооброблених сталей характерна залежність

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha(\text{HB} - \text{HB}_0), \quad (4.4)$$

де  $\varepsilon_0$  - відносна зносостійкість сталі у відпаленому стані;

$\alpha$  - коефіцієнт пропорційності;

$\text{HB}_0$  - твердість сталі у відпаленому стані.

процес абразивного зношування залежить від форми й розмірів абразивних часток, можливості їхнього закріплення в матеріалі (шаржування поверхні), співвідношення твердості матеріалу  $H_m$  й абразиву  $H_a$ . При  $K_T = \frac{H_m}{H_a} < 0,5$  можливо пряме руйнування матеріалу, а при  $K_T > 0,7$  - пряме одноактне руйнування матеріалу малоімовірно і процес переходить у багатоцикловий [28]. У цілому, умовно процес абразивного зношування робочої поверхні деталей можна уявити таким чином. При взаємодії поверхонь із твердою, закріпленою нерухомо абразивною часткою на металевій поверхні утворюється подряпина. Якщо відношення  $h$  глибини проникнення абразивної частки в метал до радіуса  $r$  закріплення досягає певного критичного значення, тоді дряпання супроводжується відділенням продуктів зношування, тобто пластичне відтискування переходить у мікрорізання [26, 29]. Критичне значення дорівнює

$$\frac{h}{r} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{2\tau}{\sigma_T} \right), \quad (4.5)$$

де  $\tau$  - дотичне напруження;

$\sigma_T$  - границя текучості матеріалу.

Доцільно буде помітити особливість внесення абразивних часток в область контакту деталей з мастильним матеріалом.

У цьому випадку знос зростає зі збільшенням концентрації абразиву та його твердості і залежить від форми й розмірів

часток. Отже, матеріалознавські методи боротьби з таким зносом, пов'язані з вибором і створенням нових матеріалів та їх технологічним зміцненням, помітно вичерпали себе [1]. Від попадання абразиву в контакт набагато більший ефект дають інші методи захисту: ущільнення, фільтри, відстійники та ін.

### ***4.9.3. Гідрогазоабразивне, гідрогазоерозійне зношування***

Гідроабразивним (газоабразивним) зношуванням називають абразивне зношування в результаті дії твердих часток, що захоплюються потоком рідини (газу).

Гідроерозійне (газоерозійне) зношування - зношування поверхні тіла під впливом потоку рідини або газового середовища.

Гідроабразивне зношування характерно для елементів паливних апаратів, двигунів внутрішнього згоряння, об'ємного гідропривода, трубопроводів для транспортування будівельних розчинів, сипучих матеріалів тощо. У ролі рідини, тобто носія часток, як правило, виступають мастильні матеріали, палива, гальмові або робочі рідини. Газоабразивне зношування спостерігається у роботі компресорів, пневматичного інструмента та ін.

Інтенсивність зношування залежить від таких основних факторів: кута атаки, швидкості потоку, концентрації, розміру, твердості абразивних часток, співвідношення твердості поверхні металу і абразивних часток. Кут атаки – кут між профілем поверхні деталі, що утворюється, і вектором швидкості потоку рідини (газу), який несе абразивні частки. Зі зменшенням кута атаки знижується величина ударного імпульсу, збільшується ймовірність проорювання та мікрорізання поверхні. Якщо кут атаки  $\alpha = 90^\circ$ , тоді зносостійкість матеріалу визначається опором його мікрообсягів утомному, деформаційному і крихкому руйнуванню, а також здатністю матеріалу поглинати кінетичну енергію удару часток внаслідок пружної деформації (рис. 4.16).

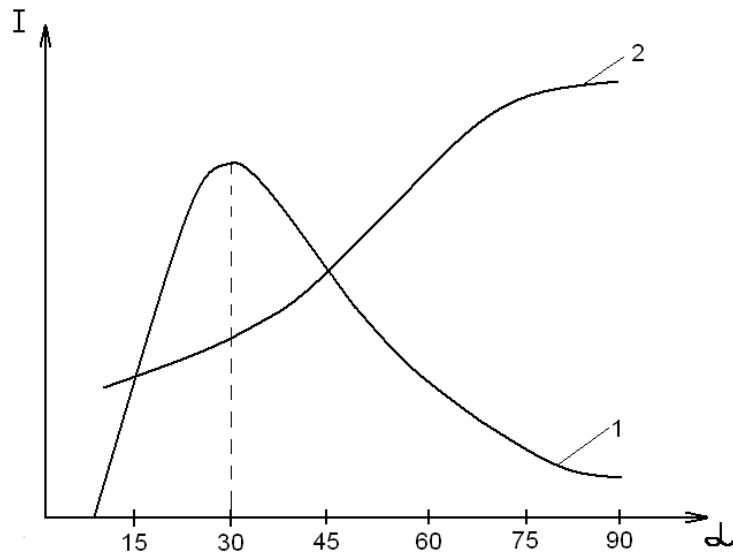


Рис. 4.16. Залежність інтенсивності гідрогазоабразивного зношування від кута атаки абразивних часток:

1 - для пластичних; 2 - для крихких матеріалів

У цілому енергія, що витрачена на утворення продуктів зношування обсягом  $V_{\text{ИЗН}}$ , являє собою суму енергій, які витрачені на пластичне деформування  $E_{\text{ДЕФ}}$ , теплову енергію  $E_{\text{Т}}$  та енергію диспергування  $E_{\text{ДИС}}$ , котра необхідна для утворення нових фазових поверхонь  $E_{\text{ДИС}}$  [1].

$$E = E_{\text{ДЕФ}} + E_{\text{Т}} + E_{\text{ДИС}}. \quad (4.6)$$

Об'ємний знос за час  $t$  при гідроабразивному зношуванні

$$V = \frac{E_{\text{СР}} \cdot V_{\text{СК}} \cdot t \cdot \omega}{(W_{\text{КР}})_{\text{ДЕФ}} \cdot \xi}, \quad (4.7)$$

де  $E_{\text{СР}}$  - середнє значення енергії удару однієї абразивної частки;

$\omega$  - частота впливу часток на поверхню, що зношується;

$V_{\text{СК}}$  - швидкість потоку;

- $\xi$  - коефіцієнт, що враховує характер руйнування (крихке, пластичне, мікрорізання);
- $W_{\text{кр}}$  - щільність потоку потужності деформації після критичного числа ударів, що приводять до руйнування (може бути розрахована за термодинамічними константами матеріалу).

Величина накопиченої внутрішньої енергії в результаті деформування й зміцнення поверхневого шару матеріалу може служити критерієм його зносостійкості.

Відносна зносостійкість [30]

$$\varepsilon = \left( \frac{E_S}{E_{SЭ}} \right)^{0,5}, \quad (4.8)$$

де за еталон прийнята сталь 25Л;

$$E_S = (H_{\mu 0} + H_{\mu}^{\max}) \cdot \Delta H_{\mu}^{\max}, \quad (4.9)$$

де  $H_{\mu 0}$  - мікротвердість вихідної поверхні;

$$\Delta H_{\mu}^{\max} = H_{\mu}^{\max} - H_{\mu 0}, \quad (4.10)$$

де  $H_{\mu}^{\max}$  - максимальна мікротвердість зміцнених підповерхневих шарів [42].

Залежність зносостійкості різних матеріалів при гідроабразивному зношуванні при кутах атаки  $10^0$  і  $70^0$  наведена у літературі [1].

Гідроерозійне (газоерозійне) зношування зустрічається в елементах трубопроводів та у колекторах при відсутності абразивних часток, а для підйомно-транспортних, будівельних і дорожніх машин ці види зношування не характерні.

#### 4.9.4. Утомне зношування

Утомним називається механічне зношування в результаті утомного руйнування при повторному деформуванні мікрообсягів матеріалу поверхневого шару. Такий вид зношування спостерігається в більшості трибосполучень (як супутній вид зношування) і має прихований латентний період. Представниками утомного зношування є кулькові, роликові підшипники, опорно-поворотні пристрої та ін. Цей процес супроводжується багаторазово повторюваними циклами напруг у контактні кочення або ковзання. Внаслідок цього на робочих поверхнях деталей виникають максимальні напруги (як правило стиску), які поширюються по глибині матеріалу. Їх максимум знаходиться на деякій відстані від точки контакту. При локальному контактні напруги розподіляються по його площі. Максимальні напруги розраховують за формулою Герца

$$P_{\max} = 0.418 \sqrt{P \cdot E \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}}, \quad (4.11)$$

де  $P$  – питоме навантаження;

$E$  - наведений модуль пружності;

$R_1, R_2$  – відповідно радіуси кривизни дотичних тіл. Вони перебувають на глибині від поверхні  $z=0,8b$ .

Напівширина площі контакту

$$b = 1.52 \sqrt{\frac{P}{E} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}}. \quad (4.12)$$

Характер розподілу напруг у поверхневому шарі залежить від співвідношення дотичних  $T$  і нормальних  $P$  навантажень. При наявності дотичного навантаження  $T$  у кінці площадки контакту з'являється зона розтягування, максимальні напруги в якій ростуть зі збільшенням дотичного навантаження.

Руйнування пластичних і крихких тіл різні, при цьому, для пластичних тіл - на глибині під поверхнею, для крихких - на поверхні [1].

Загальний процес утомного зношування містить у собі таку послідовність. Спочатку на поверхні утворюються мікротріщини і мастильний матеріал надходить у них і сприяє їхньому розклиненню (ефект П.О. Ребіндера), а надалі і викришуванню часток металу (рис. 4.17).

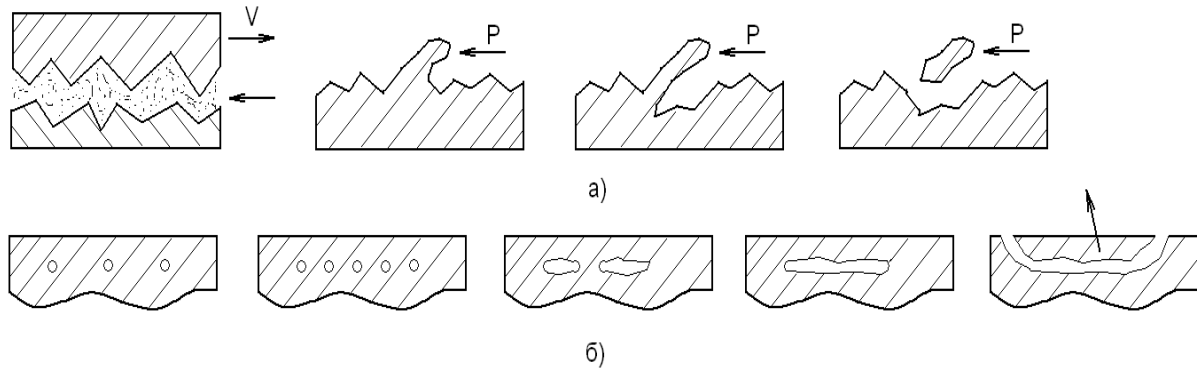


Рис. 4.17. Схема утомного зношування при  $P < P_{кр}$ :

- а - первинні мікротріщини на поверхні;
- б - мікротріщини у підповерхневому шарі

Товщина зруйнованого шару металу приблизно відповідає глибині поширення під поверхнею дотичних напружень. Відповідно до теорії Губера-Мизеса-Генки пластичні деформації при складному напруженому стані виникають тоді, коли питома потенційна енергія деформування досягає деякого граничного значення, визначеного для кожного матеріалу. Граничне питома навантаження при утомному багаторазовому деформуванні визначають за виразом [1]

$$P_{кр} = 2,9 \frac{d_{ГП}}{E_{ГП}} \frac{\sigma^2}{(\sigma_{ГП}/P_{max})} \cdot \xi^2, \quad (4.13)$$

- де  $d_{ГП}$  - наведений діаметр;
- $\sigma$  - межа утоми матеріалу;
- $\xi$  - коефіцієнт зміцнення, що пов'язаний з неоднорідністю напруженого стану;
- $\sigma_{ГП}$  - максимальна наведена напруга.

Зношування може відбуватися внаслідок втоми мікрообсягів матеріалу, що виникає під дією багаторазових стискальних і розтягувальних зусиль, які не перевищують критичних  $R_{кр}$ .

Інтенсивність утомного зношування залежить від таких основних факторів: наявності залишкових напруг і поверхневих концентраторів напруг (оксидів та інших великих включень, дислокацій); якості поверхні тертя, розподілу навантаження у сполученні, виду тертя, наявності і типу мастильного матеріалу. При цьому мастильні матеріали зменшують напругу, що діє в контакті, і в результаті процес утворення мікротріщин сповільнюється.

Звичайно утомне зношування робочих поверхонь деталей супроводжується підвищенням рівня шуму і вібрації в процесі роботи, однак слід зазначити, що утомне зношування може бути як помірним, так і прогресуючим. Перша його форма не є небезпечною і деталь може працювати тривалий час, а прогресуюче утомне руйнування виникає при високих контактних напругах і приводить до поломки деталей.

#### ***4.9.5. Кавітаційне зношування***

**Кавітаційне зношування** виникає при переміщенні потоку рідини щодо поверхні твердого тіла у випадку розриву суцільності цієї рідини, утворення каверн, заповнених газом (паром), і наступного захлопування каверн поблизу поверхні з великою швидкістю. При цьому ударні хвилі багаторазово впливають на ділянку поверхні і приводять до утомного руйнування останньої.

Цей вид зношування характерний для лопатей турбін, гребних валів, насосів та інших гідротехнічних пристроїв. Основні фізичні процеси, що притаманні цьому виду зношування, можна описати так:

- кавітаційні порожнини (пухирці) утворюються в гідродинамічному потоці внаслідок появи в ньому областей з тиском нижче тиску насиченого пару цієї рідини;

- захоплення кавітаційної порожнини відбувається при різкому збільшенні зовнішнього тиску зі швидкістю, яка приблизно дорівнює швидкості звуку;

- енергія, що утворюється (вивільняється) при закритті кавітаційної порожнини, акумулюється у поверхневих шарах. За рахунок ударних хвиль відбувається деформування, зміна структури і подальший розвиток мікротріщин матеріалу [31].

Як критерій кавітаційної зносостійкості приймають енергетичний параметр і інтенсивність зношування визначають за формулою [1]

$$I = \frac{W_{ak}}{W_{кр}^x} = \frac{(P \cdot V) \cdot V_{\Pi}^x}{W_{кр}^x} \cdot n_p \cdot f(z), \quad (4.14)$$

де  $W_{ak}$  - щільність потоку акумульованої енергії;

$W_{кр}^x$  - критична щільність потоку енергії;

$P \cdot V$  - добуток тиску й швидкості рідини при мікроударах по поверхні;

$V_{\Pi}^x$  - швидкість переносу зовнішньої енергії в обсягах матеріалу, що деформується;

$n_p$  - кількість раковин на поверхні;

$f(z)$  - функція, що враховує розмір продуктів зношування.

$$f(z) = a_1 \cdot R_e \cdot z \cdot \exp \frac{-a_2 \cdot z^2}{V_c}, \quad (4.15)$$

де  $R_e$  - число Рейнольдса;

$V_c$  - швидкість рідини (середовища) поблизу поверхні при пульсації тиску;

$a_1, a_2$  - константи.



#### 4.9.6. Зношування при схоплюванні (заїданні)

Такий вид зношування є найбільш руйнівним. Він виникає в результаті локального з'єднання двох твердих тіл внаслідок дії молекулярних сил, подальшого глибинного виривання матеріалу з однієї поверхні і переносу його на іншу. Таке явище спостерігається при сухому терті, при розриві мастильної плівки, оголенні і взаємодії ювенільних поверхонь матеріалів. Зношування при схоплюванні також властиво поверхням тертя, які переміщуються одна відносно іншої в режимі граничного змащення. Схоплювання відбувається при локальному розриві мастильної плівки, коли поверхні тертя перебувають на відстані, при якій виникає адгезійний зв'язок (тобто поверхні тертя розташовані в області дії їх силових полів). Це можливо не тільки при припиненні подачі мастильного матеріалу, але й внаслідок перевищення зовнішнього навантаження несучої здатності мономолекулярного адсорбційного шару мастильного матеріалу, а також при різкому підвищенні температури мастила у поверхневих шарах матеріалу. Схема формування вузлів схоплювання наведена на рис. 4.18.

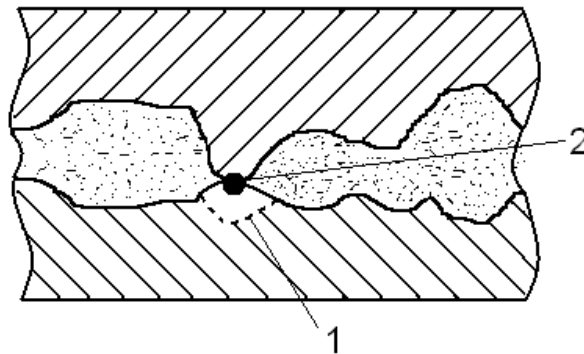


Рис. 4.18. Схема формування вузлів схоплювання:

1 - лінія розриву матеріалу; 2 - вузол схоплювання

Вузли схоплювання, що утворилися, руйнуються внаслідок переміщення поверхонь тертя. При цьому сили, що діють у місцях вузлів схоплювання, викликають напруги, що

перевищують границю текучості металу і спостерігається процес пластичних деформацій поверхневих шарів деталей. Частки металу, вилучені з вузла схоплювання, можуть надалі перебувати в різних станах. Частина з них внаслідок переміщення поверхонь тертя перетворюються в «котки». Такі «котки» називають молями. Під дією сил при коченні вони набувають сферичної форми і перекочуючись, розпушують підповерхневі шари матеріалу.

Крім того, у залежності від співвідношення сил, радіуса часток, властивостей матеріалу моль може, як перекочуватися, так і закріплюватися на одній з поверхонь і «ковзати» по іншій або пластично деформуватися і «намазуватися» на більш тверду поверхню. Описаний механізм наявний у парах тертя, особливо в період приробляння поверхонь тертя (рис. 4.19) [1].

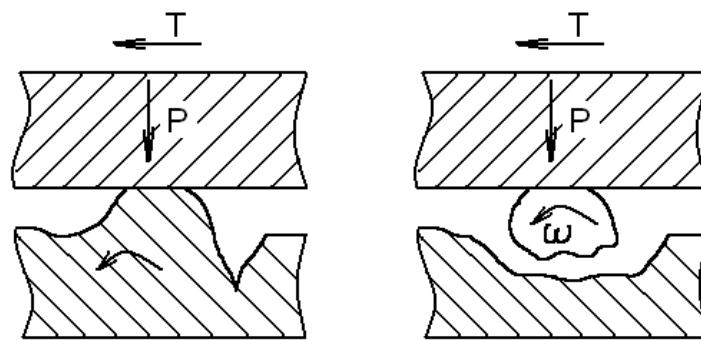


Рис. 4.19. Схема ротації матеріалу в мікроконтакті і утворення моля

Другий стан часток металу, що утворилися з вузлів схоплювання, набуває форми продуктів зношування поверхонь тертя, які в режимі гідродинамічного змащення можуть видалятися із зазора разом з потоком мастильного матеріалу. Варто помітити, що продукти зносу є сильними адсорбентами молекул ПАР, тому що вони в момент утворення мають ювенільні поверхні.

Відповідно до досліджень встановлено, що лінія ковзання (максимальних дотичних напруг) відповідає кривим 1, що не збігаються з адгезійним швом 4 (рис. 4.20) [1].

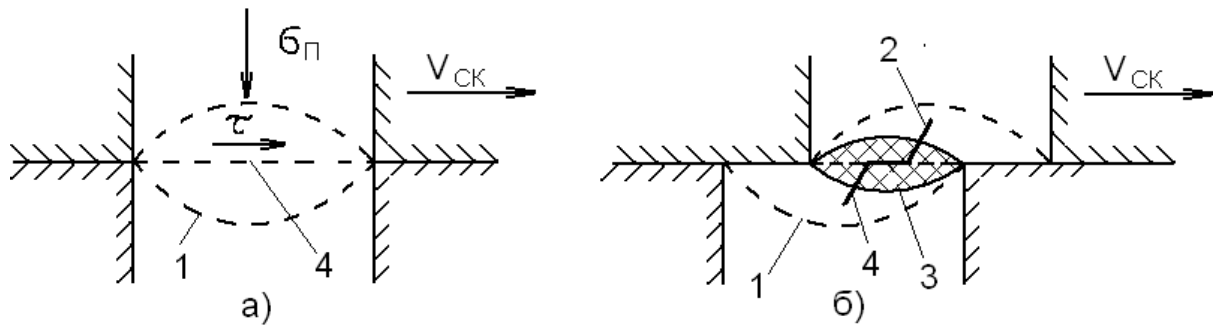


Рис. 4.20. Схема локалізації зрушення на плямі адгезійної взаємодії тіл:

а - початок руху; б - у процесі зрушення; 1 - лінія ковзання; 2 - напрямок волокон; 3 - загальмована область матеріалу; 4 - адгезійний шов

При зрушенні зона матеріалу, що пластично деформується та локалізується в лінзоподібній області (заштрихована зона на рисунку 4.20,б) з характерним кутом нахилу.

Інтенсивність зношування при схоплюванні залежить від режимів навантаження, області дії силових полів поверхонь тертя, швидкості відносного переміщення поверхонь, температурних умов, властивостей мастильних матеріалів та ін.

Процес схоплювання умовно підрозділяють на 2 роди: перший рід – виникає і розвивається при малих швидкостях ковзання поверхонь тертя ( $0,005 \dots 0,2 \text{ м/с}$ ) і тисках ( $5 \dots 10 \dots 10$ )  $\cdot 10^5 \text{ Па}$ , які перевищують границю текучості металу на ділянках фактичного контакту. Такий процес супроводжується інтенсивним пластичним деформуванням і руйнуванням поверхонь деталей.

Другий рід схоплювання розвивається при більших швидкостях ковзання та при підвищеному тиску. При цьому температура збільшується в поверхневих шарах. Як наслідок, мастильна плівка по поверхні тертя зменшується, а фактична площа контакту в режимі адгезійного зв'язку збільшується.

Зношування при схоплюванні в режимі сталого процесу тертя характеризує початок аварійного стану сполучення і у

процесі експлуатації трибовузлів машин повинне бути виключене, що можливо декількома шляхами:

- підбором матеріалу зі зниженою здатністю до схоплювання;
- нанесенням плівок на поверхні тертя з м'яких матеріалів (олова, свинцю);
- застосуванням мастильних матеріалів, завдяки яким збільшується товщина адсорбційної плівки на поверхні тертя, тобто матеріалам з антизадирними присадками;
- застосуванням антифрикційних полімерних покриттів.

#### ***4.9.7. Корозійно-механічне зношування***

Цей вид зношування характеризується процесом тертя матеріалу, що вступив у хімічну взаємодію із середовищем. До корозійно–механічного зношування відносять окисне зношування і зношування при фретинг–корозії.

Кислоти, луги, сольові розчини, ґрунт, біологічно активні середовища та інші можуть виступати корозійними середовищами.

При тертях у корозійних середовищах істотно змінюється характер та інтенсивність руйнування поверхні і процеси зношування протікають при активній взаємодії із зовнішнім середовищем.

Корозійно-механічне зношування обумовлене, головним чином, електрохімічним корозійним процесом, що прискорюється при деформації поверхневих шарів. Корозійна стійкість технічних металів і сплавів в електролітах визначається швидкістю двох сполучених процесів: анодного і катодного. Анодний процес - перехід іонів металу із кристалічних ґрат у розчин, катодний - асиміляція електронів, що звільнилися при анодній реакції. При терті корозійні процеси прискорюються в тисячі разів [27, 32, 33].

Слід зазначити, що корозійно-механічне зношування являє собою складний процес, у якому корозійний і механічний фактори взаємозв'язані.

#### 4.9.8. Зношування при фретинг-корозії

Фретинг-корозія - це процес руйнування поверхонь «метал-метал» або «метал-неметал», які щільно контактують, у результаті малих коливальних відносних переміщень. Для утворення фретинг-корозії достатні переміщення поверхонь із амплітудою 0,025 мкм. Руйнування полягає в утворенні на дотичних поверхнях дрібних язв і продуктів корозії у вигляді нальоту, плям і порошку. Цьому виду зношування піддаються не тільки вуглецеві, але й корозійностійкі сталі в парах тертя «сталь-сталь» (можуть бути як однойменні, так і різнойменні), «сталь-олово» або алюміній, сурма, а також «чавун-бакеліт» або хром та інші пари тертя.

Внаслідок малої амплітуди переміщення дотичних поверхонь ушкодження зосереджують на невеликих площадках дійсного контакту. Продукти зношування не можуть вийти із зони контакту, в результаті виникає високий тиск і збільшується їхня абразивна дія на основний метал.

При фретинг-корозії відносна швидкість руху дотичних поверхонь невелика. Так у випадку гармонійних коливань із амплітудою 0,025 мм і частотою  $50 \text{ с}^{-1}$  максимальна швидкість 7,5, а середня 2,5 мм/с. В одному з дослідів Г.А. Томлінсон спостерігав зношування при фретинг-корозії при середній відносній швидкості поверхонь 0,02 мм/год. [29].

Якщо амплітуда коливального руху велика (близько 2,5 мм), то площа ураження фретинг-корозією збільшується, і картина зношування нагадує ту, котра відбувається при односпрямованому ковзанні. Тому можна вважати, що амплітуда переміщення поверхонь близько 2,5 мм є верхньою межею амплітуди для утворення фретинг-корозії.

Інтенсивність такого виду зношування залежить одночасно від механічної складової (процес деформування) і електрохімічних процесів взаємодії з навколишнім середовищем. Прикладами такого виду зношування є посадки із запресовуванням кілець підшипників кочення, поршневі кільця, болтові, клинові та штифтові з'єднання.

Інтенсивність руйнування поверхонь при фретинг-корозії збільшується зі зростанням навантаження, амплітуди і частоти коливань, зі зростанням відносного проковзування.

При фретинг-корозії протікають наступні процеси. Під дією сил тертя кристалічні ґрати поверхневих шарів при циклічних тангенціальних зсувах розхитуються і руйнуються. При цьому відбувається відрив часток металу, розміри яких порівнянні з атомними. Процес руйнування являє собою диспергування поверхні без видалення продуктів зношування. Частки металу, що відірвалися, піддаються швидкому окислюванню. Додатковим джерелом ушкодження поверхонь може бути захоплювання сполучених металів, що виникає місцями. Ланцюги атомів, що зчепилися, спочатку спотворюються при ковзанні, а потім розриваються, що приводить до відриву окремих атомів від кристалічних ґрат і може служити джерелом зародження утомних тріщин.

Залежно від умови фретинг-корозії безпосередньому руйнуванню поверхні може передувати її окислювання і утворення на ній хімічних сполук у результаті підвищеної активності атомів кристалічних ґрат, які пластично деформуються. Руйнування окисних плівок супроводжується захоплюванням металів. За іншим варіантом спрощена схема процесу в початковій фазі така: переміщення і деформація поверхонь під дією змінних дотичних напружень - корозія - руйнування окисних та інших плівок - оголення чистого металу і місцями захоплювання - руйнування ділянок захоплювання та адсорбція кисню на оголених ділянках.

Утворення окисних плівок на металевій поверхні або продуктів зношування у вигляді окислів змінює характер протікання процесу, що починає визначатися не тільки фізико-хімічними властивостями матеріалів пари тертя у початковому стані, але й природою окислів та інших хімічних з'єднань, що утворилися. Окислювання металу супроводжується збільшенням об'єму. При наявності в сполученні замкнутих контурів (наприклад, у циліндричних сполученнях) це приводить до місцевого підвищення тиску, що сприяє підвищенню інтенсивності зношування і виникненню пітингів. Окисли

здійснюють абразивну дію, що залежить від міцності зчеплення окисних плівок з основним металом, твердості окислів і розмірів їхніх часток у продуктах зношування. Твердість окислів металів, як правило, більше твердості чистих металів.

Механізм зношування при фретинг-корозії в спрощеному вигляді наведений на рис. 4.21.

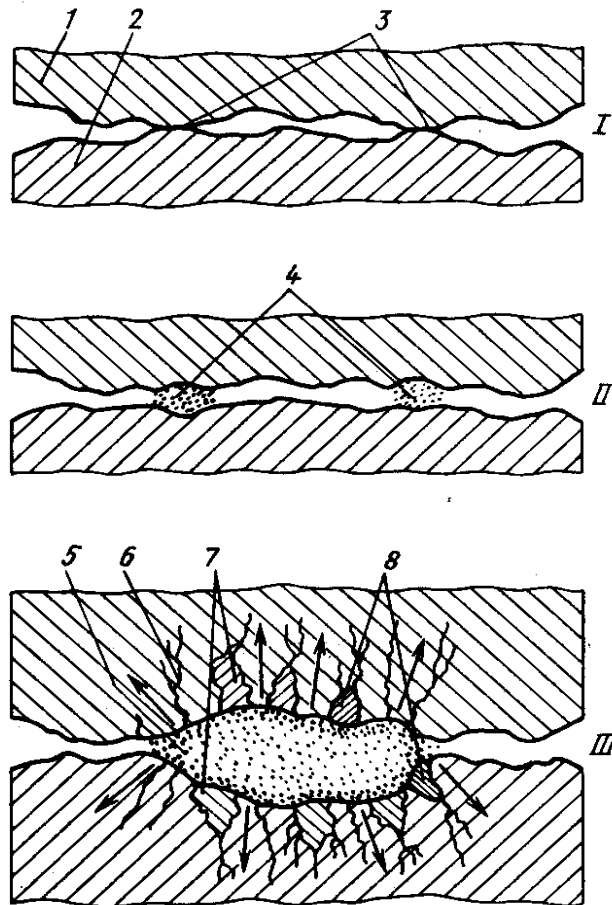


Рис. 4.21. Механізм зношування металевих поверхонь при фретинг-корозії:

1,2 – деталі, що контактують, 3 – точки контакту поверхонь, 4 – дрібні каверни, що утворюються, 5 – загальна велика каверна, 6 – тріщини, 7 – об'єми металу, що відкололися, 8 – частки, що відкололися, з твердою структурою

Первісне контактування деталей відбувається в окремих точках поверхні I (рис. 4.21) При вібрації окисні плівки в зоні

фактичного контакту руйнуються, утворюються невеликі каверни, які заповнені окисними плівками (II), що поступово збільшуються в розмірах і зливаються в одну велику каверну (III). У ній підвищується тиск окислених часток металу, утворюються тріщини. Деякі тріщини зливаються і відбувається відколювання окремих об'ємів металу.

В результаті дії підвищеного тиску й сил тертя часток окислів підвищується температура і відбувається утворення твердих структур у частках, що відпали, і на поверхні каверн.

#### ***4.9.9. Окисне зношування***

Окисне зношування відбувається в тому випадку, коли на дотичних поверхнях утворюються плівки окислів, які в процесі тертя руйнуються і знову утворюються. Продукти зношування складаються з окислів. Від інших видів корозійно-механічного зношування воно відрізняється відсутністю агресивного середовища, протікає при нормальних і підвищених температурах при терті без мастильного матеріалу або при недостатній його кількості.

Інтенсивність зношування може бути досить значною, але поверхні тертя зберігають малу шорсткість; це пояснюється тим, що окисли перешкоджають схоплюванню поверхонь.

При звичайних температурах окислювання поверхонь активізується пластичною деформацією. Тому одним з методів боротьби з окисним зношуванням є створення поверхонь тертя з високою твердістю.

Для окисного зношування необхідно, щоб проміжок часу між послідовними руйнуваннями плівки був достатній для утворення плівки відносно великої товщини.

Природно, що у випадку циклічного руйнування окислів високої твердості зношування буде мати характер абразивного.

Окисному зношуванню піддаються калібри, деталі шарнірно-болтових з'єднань тяг і важелів механізмів керування; шарнірно-болтові з'єднання підвісних пристроїв машин, що працюють без мастильного матеріалу, металеві колеса



фрикційних передач і чашки варіаторів, а також деякі деталі в парах тертя катання. Підвищення температури сприяє зростанню окисних плівок, а вібрація - їхньому руйнуванню. З інтенсивним окисним зношуванням у подібних умовах доводиться зустрічатися, наприклад, у деталях кріплення вихлопних колекторів двигунів внутрішнього згорання. У ряді випадків інтенсивність окисного зношування можна зменшити, перемінивши мастильний матеріал, понизивши температуру вузла. Здавалося б, що застосування корозійно-стійкої сталі повинне дати додатковий ефект, однак аустенітні сталі, не говорячи про схильності їх до схоплювання, швидко окисляються в процесі тертя.

#### ***4.9.10. Водневе зношування***

Водневе зношування, як один із процесів руйнування поверхонь при терті ковзання, установлене всього майже 40 років тому А.А. Поляковим і Д.М. Гаркуновим. За кордоном явище водневого зношування при терті ковзання перебуває в початковій стадії вивчення.

Із всіх видів руйнування поверхонь при терті ковзання водневе зношування найважче піддається вивченню, незважаючи на те, що воно виявляється у вузлах тертя машин різних галузей техніки та за частотою прояву може бути порівнянне з абразивним зношуванням. Процеси, що відбуваються при водневому зношуванні, перебувають на стику таких галузей науки, як електрохімія, органічна хімія, каталіз, хімія полімерів і мастильних матеріалів, механохімія та ін.

Водневе зношування залежить від концентрації водню в поверхневих шарах тертьових деталей. Він виділяється з матеріалів пари тертя або з навколишнього середовища (мастильного матеріалу, палива, води та ін.) і прискорює зношування. Водневе зношування обумовлене такими процесами, що відбуваються в зоні тертя:

- інтенсивним виділенням водню при терті в результаті трибодеструкції водневмісних матеріалів, що створює джерело безперервного надходження водню в поверхневий шар сталі або чавуну;
- адсорбцією водню на поверхнях тертя;
- дифузією водню в шар сталі, що деформується, швидкість якої визначається градієнтами температур і напруг, що створює ефект нагромадження водню в процесі тертя;
- особливим видом руйнування поверхні, пов'язаного з одночасним розвитком великої кількості зародків тріщин по всій зоні деформування й ефектом нагромадження водню, характерним для руйнування є миттєве утворення дрібнодисперсного порошку матеріалу.

У технічній літературі протягом багатьох років публікуються результати численних досліджень по впливу водню на зниження об'ємної міцності матеріалів, особливо при впливі циклічних навантажень.

Однак явище водневого зношування встановлено недавно внаслідок наступних причин [15].

1. Неймовірно було припустити, що при терті може виділятися дифузійно-вільний водень із мастильного матеріалу, пластмаси або води. При нормальних тисках і температурі водень із цих речовин не виділяється. При підвищених температурах у процесі трибодеструкції пластмаси або мастильного матеріалу водень також не виділяється при первинних процесах. Він виділяється при вторинних процесах.

2. До останнього часу вважали, що при терті максимальна температура виникає на поверхні тертьової деталі. Відомо, що водень дуже легко дифундує під дією температурного градієнта в нагріті ділянки тіла. Цю властивість використовують для видалення водню з деталей після насичення їх воднем, наприклад, при гальванічному хромуванні. Тому вважали, що при терті у випадку підвищених температур процес насичення воднем неможливий. Більше того, вважали, що водень, який міститься у деталі, буде виходити із зони тертя.

Спочатку теоретично А.В. Кудінов, а потім експериментально В.Я. Матюшенко й Г.П. Шпеньков установили, що при важких режимах тертя максимальна температура утвориться не на поверхні, а на деякій глибині.

Це створює умови, при яких водень, якщо він буде адсорбований на поверхні деталі, під дією температурного градієнта дифундує вглиб поверхні, там концентрується та викликає окрихчування поверхневих шарів, а отже, підсилює зношування.

Область прояву водневого зношування досить велика. Практично всі тертьові поверхні сталевих і чавунних деталей містять підвищену кількість водню і, отже, піддані підвищеному зношуванню. Наявність у повітрі пару води створює сприятливі умови для водневого зношування, не говорячи вже про розкладання в зоні контакту мастильного матеріалу, палива або пластмаси.

Водневе зношування може бути викликано не тільки воднем, що утвориться при терті, але й воднем, що може утворитися при різних технологічних процесах. При виплавці чавуну в доменному процесі з вологи дуття утворюється водень, що і попадає в метал (такий водень називають біографічним). При термічній обробці, наприклад, у результаті азотування (при дисоціації аміаку), водень, що виділяється, дифундує в сталь.

Одним зі способів усунення водню при гальванічних покриттях є термообробка виробів при температурі 200 °С. Для видалення окалини, продуктів корозії сталеві вироби піддають травленню в кислоті. Занурення сталі в розчин кислоти приводить до розчинення заліза на анодних ділянках і виділенню водня на катодних ділянках з одночасним проникненням водню в сталь. У результаті нагромадження газоподібного водню на поверхні деталі можуть бути навіть спучування. Ступінь насичення воднем при травленні залежить від багатьох факторів: стану сталі і особливо наявності в розчині навіть незначних кількостей (слідів) сірки, фосфору, миш'яку, селену, які здатні сповільнювати реакції хімічної десорбції та, таким чином, збільшувати площу покриття воднем. Тому на практиці вибір інгібітору повинен бути ретельно продуманий, інакше можливе

підвищення абсорбції водню. При фосфатуванні водень проникає в сталь. Необхідно регулювати у ванні вміст вільної кислоти та певних окисних агентів і тим самим знижувати кількість абсорбованого водню. Атмосферна корозія металу може викликати абсорбцію водню в тому випадку, якщо вона протікає в промисловій атмосфері, що містить сірчистий ангідрид і кислоту сірчаної кислоти.

Водень, що проникнув у сталь, при терті буде поступово дифундувати в поверхню й викликати її зношування.

#### ***4.9.11. Електростатичне зношування***

Останнім часом одержали розвиток дослідження впливу електричного поля на процеси тертя і зношування. Виникнення потенціалу на тертьових поверхнях і подальше протікання струму при замиканні ланцюга викликано гальванічними та електричними явищами, контактною поляризацією і термоелектричними процесами.

Механізм виникнення електростатичного поля при терті досить складний і повною мірою ще не вивчений. Однак проведені дослідження дозволили глибше проникнути у фізичний механізм цього явища. У роботах Г.І. Шора зі співробітниками [7 та ін.] показано, що потенціали електризації змащення значні і досягають декількох десятків вольтів. При цьому здатність металів електризувати рідину залежить від роботи виходу електронів.

Заряди трибоелектрики, що накопичуються на поверхнях тертя, при якійсь критичній різниці потенціалів пробивають мастильну оливну плівку. Це супроводжується локальним збільшенням температури і як наслідок, вигорянням прилягаючого мікрооб'єму оливи, безпосереднім контактуванням поверхонь з послідуною адгезією, а також погіршенням механічних властивостей поверхонь, що приводить до зношування, названого електростатичним.

Інтенсивність цього виду зношування багато в чому визначається провідністю оливної плівки, що у свою чергу,

залежить від її товщини, якісного і кількісного складу часток зношування, що входять до оливи.

Пробій плівки оливи з відносно більш високими ізоляційними властивостями відбувається при більш значній різниці потенціалів, ніж плівки масла з великою провідністю. В останньому випадку розрядні струми невеликі, вигоряння оливної плівки не відбувається, а якість самої оливи під впливом «тихих» розрядів поліпшується.

Відведення зарядів трибоелектрики від поверхонь тертя або коротке замикання відповідних ланцюгів забезпечує значне зниження інтенсивності електростатичного зношування.

#### ***4.9.12. Самоорганізація вузлів тертя***

Під самоорганізацією будемо розуміти самостійну (без втручання зовнішніх впливів) пристосовність трибовузлів до умов роботи, внаслідок чого має місце стаціонарний стан, який характеризується постійним та мінімальним значенням сили тертя та інтенсивності зношування. Кожен зовнішній вплив, який виводить трибовузол зі стаціонарного стану, викликає в ньому відповідні процеси, які прагнуть протистояти, послабити та навіть повністю купіювати результат цього впливу, тобто повернути трибовузол у стаціонарний стан. Таким чином, які б процеси не проходили при терті та зношуванні, результат може бути лише один: стаціонарний стан трибовузла, тобто мінімізація та стабілізація сили тертя та інтенсивності зношування. Цей принцип добре узгоджується з відомою класичною теоремою І. Пригожина [34], відповідно до якої виробництво ентропії при наближенні термодинамічної системи до стаціонарного стану прагне до мінімального позитивного значення.

Розглянемо декілька відомих з техніки прикладів, які підтверджують процес самоорганізації. На рис. 4.22 наведена класична схема підшипника ковзання.

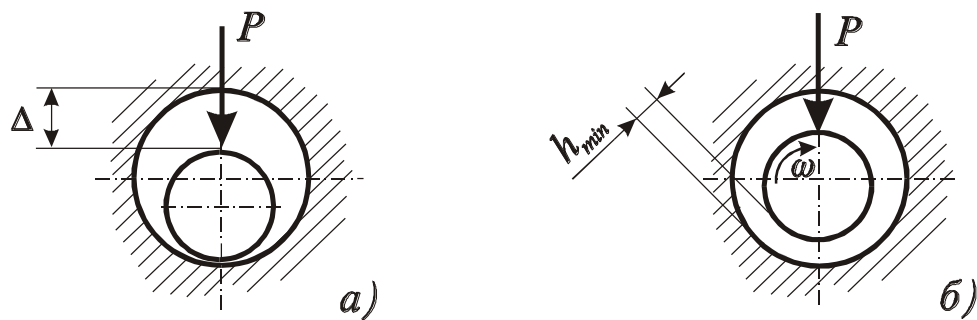


Рис. 4.22. Схема підшипника ковзання:

а) вал в неробочому стані; б) вал в робочому стані

В неробочому стані вал, якій не обертається, під впливом сили власної ваги та діючого навантаження  $P$  знаходиться в безпосередньому контакті з підшипником. Це обумовлено тим, що діаметр підшипника більше діаметра вала, внаслідок чого між ними створюється невеликий зазор, який заповнений оливою. Максимальний зазор  $\Delta$  має місце у верхній частині підшипника.

У робочому стані, коли вал починає обертатися, спостерігається гідродинамічний ефект, який полягає у мимовільному утворенні вантажно-підйомного оливного шару між валом та підшипником. Такий шар, як вказувалось вище, утворюється за рахунок утягування в зазор оливи мікрорівнями вала та адсорбції ПАР. Прилеглі до поверхні вала шари оливи за рахунок в'язкості захоплюють за собою сусідні шари. При достатніх в'язкості та швидкості вала у шарі оливи створюється тиск, необхідний для відділення вала від підшипника, тому вал спливає на тонкому шарі та трохи зміщується у бік обертання. Внаслідок гідродинамічного тиску, що розвивається в шарі оливи, забезпечується поділ поверхонь вала та підшипника, і тертя між поверхнями замінюється внутрішнім тертя шарів оливи, товщина яких більше підсумкової висоти мікрорівнів поверхонь вала та підшипника. В таких умовах не буде їх безпосереднього контакту та, як наслідок, зношування буде мінімальним:

головним чином, за рахунок електростатичних розрядів, небезпечного зближення поверхонь у зв'язку з раптовим збільшенням навантаження, а також при попаданні в зазор частинок, розмір яких перевищує товщину гідродинамічного шару.

Як відомо, несуча здатність оливного шару залежить, у тому числі, від динамічної в'язкості оливи та кутової швидкості. Кожне змінення цих параметрів на якийсь час виводить підшипник зі стаціонарного (рівноважного) стану, але виникають протидії, які досить швидко повертають підшипник у рівноважний стан. Так, наприклад, при зниженні температури підшипника та внаслідок цього і оливи, в'язкість останньої підвищується, що приводить, у свою чергу, до збільшення внутрішнього тертя та адекватного зростання температури, тобто до падіння в'язкості. Таким чином відбувається повернення підшипника до стаціонарного стану.

Збільшення швидкості також приводить до зростання сил внутрішнього тертя. Це викликає збільшення температури, адекватне падіння в'язкості, тобто приводить до стабілізації несучої здатності оливного шару.

Якщо з якихось причин підвищується навантаження, то вал під його впливом не видавлює розташований під ним несучий шар оливи та поверхня вала не вступає у безпосередній контакт з поверхнею підшипника, що може викликати інтенсивне зношування. Це обумовлено тим, що під впливом навантаження адекватно збільшується в'язкість оливи.

Таким чином, підшипник ковзання можна вважати типічним прикладом трибовузла, здатним до самоорганізації, при якій автоматично забезпечується мінімізація сил тертя та інтенсивності зношування.

Відомо, що в процесі роботи трибовузлів відбувається змінення геометричних характеристик контакту. Це в першу чергу відноситься до початкового етапу експлуатації – припрацювання, яке є процесом, що приводить до мінімуму енергетичних витрат на тертя при сталому русі. Це виражається в тому, що в процесі припрацювання незалежно від початкової мікрогеометрії устанавлюється оптимальна шорсткість, яка забезпечує найкраще сполучення деформаційної та механічної

сил тертя та як наслідок, мінімізацію сил тертя та інтенсивності зношування.

Поряд зі змінням геометричних характеристик контакту при припрацюванні формується структура та властивості поверхневих шарів, які забезпечують самоорганізацію трибовузлів. На підставі розглядання загальних закономірностей тертя та зношування Б.І. Костецьким [35] була побудована теорія структурно-енергетичної адаптації (структурної пристосовності) поверхонь тертя при механічному та термомеханічному процесах. Відповідно до цієї теорії для всіх матеріалів та умов середовища існує певний діапазон навантажень та швидкостей переміщення, при яких здійснюється протікання механо-хімічного зношування. При цьому структура поверхневих шарів набуває найбільших для даних умов міцності та стійкості до фізико-хімічного впливу. Такі структури Б.І. Костецький назвав вторинними.

Коли чистота поверхонь, структура та властивості поверхневих шарів стають оптимальними, процес припрацювання закінчується, після чого сили тертя та інтенсивність зношування квазістабілізуються. У цьому випадку трибовузол адаптований до умов тертя, тобто він у максимальному ступені наближений до стаціонарного стану.

Аналогічні процеси структурної пристосовності характерні для змащувальних олив. Як буде наведено далі, в початковий період використання олива інтенсивно окислюється, що супроводжується генеруванням ПАР, які здатні створити на трибоповерхнях адсорбційну межову плівку, яка знижує зношування. З підвищенням температури з якоїсь причини стійкість плівки зменшується, тобто здійснюється десорбція, яка приводить до підвищення інтенсивності зношування. Але разом зі зростанням температури інтенсифікується генерування вторинних продуктів окислення, тобто вторинних ПАР, які створюють вторинні межові шари. Таким чином, процес тертя та зношування квазістабілізується.

Одночасно в початковий період робіт в оливі інтенсивно збільшується кількість механічних домішок, які сприяють зниженню сили тертя та зношування за рахунок поділяючої дії.



При цьому внутрішнє тертя оливи замінюється тертям між поверхнями через частинки, які зменшують електростатичне зношування.

Зважені в оливі частинки постійно знищуються та видаляються фільтрами та з витоками. Але як тільки їх стає недостатньо для забезпечення поділяючої дії, поверхні починають контактувати безпосередньо вершинами мікровиступів, що приводить до появи нових частинок, які знову забезпечують поділяючу дію.

Таким чином, коли кількість ПАР та механічних домішок для конкретних умов тертя виявиться достатнім для забезпечення мінімальних сил тертя та інтенсивності зношування, процес змінення фізико-хімічних властивостей оливи квазістабілізується.

Весь комплекс продуктів, що утворюється в оливі, є проявом їх “припрацювання”, тобто структурної пристосовності. Але оливи менш стабільні за своїми властивостями, ніж поверхні. Тому через деякий час настає такий стан, коли олива не може ефективно виконувати свої функції, тобто її треба замінити. Свіжій оливі також необхідно припрацювання, що виводить трибовузол зі стаціонарного стану. Після повного “припрацювання” оливи знову процес тертя та зношування протікає в стаціонарному стані.

Таким чином, в трибовузлах одночасно протікають два таких явища: структурна пристосовність поверхонь та структурна пристосовність оливи, тобто має місце виявлення комплексної структурної пристосовності.

На підставі викладеного можна зробити висновок про те, що суттєвість явищ, які протікають в трибовузлах, така, що будь-які зовнішні впливи сприяють виникненню внутрішніх процесів, які знижують негативну з точки зору зношування ефективність цих впливів, тобто трибовузли за рахунок самоорганізації здатні самостійно приходити у стаціонарний (рівноважний) стан, при якому сила тертя та інтенсивність зношування мають мінімальне значення.

## 5. МОТОРНІ ОЛИВИ

### 5.1. Умови роботи моторних олив та вимоги, що пред'являються до них

Двигуни внутрішнього згоряння широко використовуються в будівельних, колійних та перевантажувальних машинах. Умови експлуатації та робочі режими двигунів суттєво відрізняються один від одного, але майже у всіх випадках ці умови досить важкі. Це пов'язано насамперед з тим, що двигуни вищеназваних машин під час виконання робіт працюють в умовах надзвичайної забрудненості докільця. І хоча у системах змащення двигунів завжди передбачено очищення олив, існуючі фільтри не можуть в достатній мірі очистити оливи від найбільш небезпечних частинок забруднення. В таких умовах інтенсивно протікає абразивне зношування найбільш уразливих елементів двигунів, до яких можна віднести поршневі кільця, вкладиші колінчатого вала і т.п.

Одночасно з цим двигуни піддаються високим температурам. За цим показником можна визначити три зони:

високотемпературна (відносяться камера згоряння, головка циліндрів та верхня частина поршня);

середньотемпературна (поршень, поршневі кільця, стінки циліндрів та поршневий палець):

низькотемпературна (розподільний механізм, колінчатий вал, вкладиші, картер, оливні магістралі, фільтри і т.п.).

При згорянні палива температура газів сягає 1700-2500°C. Тому, коли олива потрапляє в камеру згоряння, то відбувається її випаровування, термічне розкладання та згоряння. На днищі та стінках камери згоряння плівка оливи повністю не згоряє, а обвуглюється з утворенням нагару.

У середньотемпературній зоні олива виконує свої змащувальні функції, але також піддається впливу температури на рівні 250-350°C. В таких умовах олива окислюється у тонкій плівці, що приводить до лакових відкладень. Спостерігається

іноді пригоряння та залягання поршневих кілець внаслідок заповнення канавок поршня лаковими відкладеннями.

У низькотемпературній зоні олива має відносно невелику температуру. Так, наприклад, у картері вона досягає значення на рівні 90-110°C, а в підшипникових вузлах – до 200°C. Тут також відбувається окислення оливи, причому процес прискорюється внаслідок каталітичної дії кольорових металів, з яких виготовлено підшипники. У картері спостерігаються процеси осадкоутворення, а також корозія, обумовлена накопиченням в оливі кислих продуктів.

Враховуючи такі жорсткі умови роботи, до якості моторних олив пред'являються такі вимоги:

- при всіх умовах роботи двигунів моторні оливи повинні безперебійно поступати до трибоповерхонь, що труться;
- моторні оливи повинні забезпечити мінімальний знос трибовузлів та витрати на подолання тертя, охороняти трибоповерхні від корозії;
- бути стійкими до високої температури та створювати якнайменше відкладень;
- мати стабільні властивості при зберіганні, транспортуванні та експлуатації;
- в мінімальній мірі змінювати свою в'язкість при змінюванні температури;
- не повинні бути токсичними та не викликати небезпечних забруднень довкілля.

## **5.2. Класифікація, номенклатура та вибір моторних олив**

Відповідно до вітчизняної класифікації моторні оливи поділяються на двадцять один в'язкісний клас, з яких чотири зимових, сім – літніх та десять – всесезонні (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

## Класифікація моторних олив за в'язкістю

Клас в'язкості	Кінемат. в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при 100°С	Кінемат. в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при -18°С	Клас в'язкості	Кінемат. в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при 100°С	Кінемат. в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при -18°С
<b>Зимові класи</b>			<b>Всесезонні класи</b>		
3з	≤3,8	1250	3з/8	7,0-9,5	1250
4з	≤4,1	2600	4з/6	5,6-7,0	2600
5з	≤5,6	6000	4з/8	7,0-9,5	2600
6з	≤5,6	10400	4з/10	9,5-11,5	2600
<b>Літні класи</b>			5з/10	9,5-11,5	6000
6	5,6-7,0	-	5з/12	11,5-13,0	6000
8	7,0-9,5	-	5з/14	13,0-15,0	6000
10	9,5-11,5	-	6з/10	9,5-11,5	10400
12	11,5-13,0	-	6з/14	13,0-15,0	10400
14	13,0-15,0	-	6з/16	15,0-18,0	10400
16	15,0-18,0	-	-	-	-
20	18,0-23,0	-	-	-	-

Примітка: кінематична в'язкість моторних олив нормується при температурі 100°С, тому що це - середня температура оливи у картері двигуна.

Класифікація моторних олив за експлуатаційними властивостями (табл. 5.2) передбачає розподіл олив на шість груп, три з яких у свою чергу розподіляються на дві підгрупи. В одній з них пропонуються оливи для карбюраторних та інжекторних двигунів (індекс 1), а в другій – для дизелів (індекс 2).

Маркірування моторних олив складається з груп знаків, перший з яких позначається буквою “М” (олива моторна), другий знак – число, що визначає належність до того чи іншого класу в'язкості при 100°С, а третій знак характеризує рівень експлуатаційних властивостей. Наприклад, М-8-В<sub>1</sub>, М-10-Г<sub>2</sub>, М-6з/10-В.

Таблиця 5.2

**Класифікація моторних олив за експлуатаційними властивостями**

Група олив за експлуатаційними властивостями	Галузь використання, що пропонується
А	Нефорсовані карбюраторні двигуни та дизелі
Б <sub>1</sub>	Малофорсовані карбюраторні двигуни, що працюють при умовах, що сприяють утворенню високотемпературних відкладень та корозії підшипників
Б <sub>2</sub>	Малофорсовані дизелі
В <sub>1</sub>	Середньофорсовані карбюраторні та інжекторні двигуни, що працюють в умовах, що сприяють окисленню оливи та утворенню всіх видів відкладень
В <sub>2</sub>	Середньофорсовані дизелі, що працюють на оливах з підвищеними антикорозійними, протизношувальними властивостями та низькою схильністю до утворення високотемпературних відкладень
Г <sub>1</sub>	Високофорсовані карбюраторні та інжекторні двигуни, що працюють в тяжких експлуатаційних умовах, які сприяють окисленню олив, утворенню всіх видів відкладень та корозії
Г <sub>2</sub>	Високофорсовані дизелі без наддування або з помірним наддуванням, що працюють в експлуатаційних умовах, які сприяють створенню високотемпературних відкладень
Д	Високофорсовані дизелі з наддуванням, що працюють в важких експлуатаційних умовах, коли потребується використання олив з високою здатністю до нейтралізації, з високими антикорозійними та протизношувальними властивостями, малою схильністю до створення усіх видів відкладень
Е	Дизелі з лубрикаторною системою змащення циліндрів, що працюють на паливі з високим вмістом сірки

В деяких випадках після основного позначення олив ще указуються деякі додаткові букви. Наприклад, в позначенні оливи М-14-Г<sub>2</sub>(цс) букви у дужках означають, що ця олива може використовуватися в циркуляційних та лубрикаторних змащувальних системах та має лужне число 20мгКОН/г.

Зарубіжні моторні оливи також класифікуються за рівнем в'язкості. При цьому загальноприйнятою стала міжнародна класифікація Американського товариства автомобільних інженерів – SAE J300. Рівень експлуатаційних властивостей та галузь використання зарубіжні виробники моторних оливи у більшості випадків указують за класифікацією API (американський інститут нафти). Класифікація API підрозділяє моторні оливи на дві категорії: “S” (Service) – оливи для бензинових двигунів та “C” (Commercial) – оливи для дизелів. Класи у цих категоріях вказують букви латинського алфавіту, що стоять після букви, яка визначає категорію. Наприклад, SF, SH, CC, CD або SF/CC, CG/CD CF-4/SH.

Імпортні оливи підрозділяють на зимові (біля цифри є буква W, наприклад, SAE20W), літні (без букв, наприклад, SAE30), всесезонні, що мають подвійне позначення (наприклад, SAE15W/30, SAE15W-30/40 або SAE10W-40).

Відповідність класів в'язкості вітчизняних стандартів класам в'язкості за SAE наведена у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Відповідність класів в'язкості вітчизняних стандартів класам в'язкості за SAE

SAE	Вітчизняні стандарти
1	2
5W	3з
10W	4з
20W	6з
20	6
30	10
40	14
50	20 і 22
10W/ 30	4з/10
15W/ 30	5з/10
5W/ 30	5з/12
15W/ 40	5з/14
20W/ 30	6з/10
20W/ 40	6з/14

Основні марки та властивості моторних олив, що використовуються в двигунах будівельних, колійних та перевантажувальних машин, наведені в табл. 5.4 та 5.5.

Таблиця 5.4

Основні марки та властивості моторних олив вітчизняного виробництва для бензинових двигунів мобільних машин

Показник	М-6з/12Г <sub>1</sub> за ТУ 381011099-86	М-5з/10Г <sub>1</sub> за ТУ 381011099-86	М-4з/6В <sub>1</sub> за ОСТ 38- 137099-86	М-8В <sub>1</sub> за ГОСТ 10541-78	М-6з/10В <sub>2</sub> за ГОСТ 10541-78
1	2	3	4	5	6
Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с при: 100 <sup>0</sup> С -18 <sup>0</sup> С	≥ 12 ≤ 10400	10-11 не нормується	5,5-6,5 1100-2600	7,5-8,5 не нормується	9,5-10,5 ≤ 9000
Індекс в'язкості, не менше	115	120	125	93	120
Масова частина, %, не більше: механічн. домішок води	0,015 сліди	0,015 сліди	0,02 сліди	0,015 сліди	0,02 сліди
Темпера- тура, <sup>0</sup> С: спалахува- ння у відкр. тиглі застигання, не вище	210 -30	200 -38	165 -42	207 -25	190 -30
Корозійність на пластин- ках із свинцю, г/м <sup>2</sup> , не більше	відс.	не нормується	5,0	10,0	4,0
Лужне число, мгКОН/г, не менше	7%	5,0	5,0	4,2	5,5
Зольність, %, не більше	1,3	0,9	1,3	0,95	1,3
Щільність при 20 <sup>0</sup> С, не більше	900	900	880	905	890

Таблиця 5.5

Основні марки та властивості моторних олив вітчизняного виробництва для дизелів мобільних машин (за ГОСТ 8581-78)

Показник	М-8В <sub>2</sub>	М-10В <sub>2</sub>	М-8Г <sub>2</sub>	М-10Г <sub>2</sub>	М-10Г <sub>2</sub> К
В'язкість кінематична, мм <sup>2</sup> /с при температурі: 100 <sup>0</sup> С	8±0,5	11±0,5	8±0,5	11±0,5	11±0,5
Індекс в'язкості	85	8585	85	95	95
Лужне число, мгКОН/г, не менше	3,5	3,5	6,0	6,0	6,0
Зольність, %, не більше	1,3	1,2	1,65	1,65	1,15
Масова частка механічних домішок, %, не більше	0,015	0,015	-	-	-
Температура, <sup>0</sup> С, спалахування у відкр. тиглі застигання, не вище	200 -25	205 -15	200 -25	205 -15	220 -18
Корозійність на пластинках із свинцю, г/м <sup>2</sup> , не більше	10	10	20	20	відс.
Щільність при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup> , не більше	905	905	905	905	900

При виборі потрібної марки моторної оливи необхідно враховувати цілий ряд обставин. По-перше, необхідно керуватися рекомендаціями заводів-виробників того чи іншого двигуна. Крім того, велике значення має стиль водіння машини та виконання на ній відповідних робіт, умови експлуатації, ступінь навантаження, кліматичні особливості регіону, сезон.



Найбільше поширення одержали мінеральні моторні оливи, що обумовлено їх відносно невеликою вартістю. Сучасні технології напрацювання таких олив дали можливість надати їм таких параметрів, що задовольняють практично усі вимоги експлуатації в бензинових двигунах та дизелях.

Напівсинтетичні оливи у порівнянні з мінеральними мають дещо кращі показники. Їх можна використовувати в більш широкому діапазоні температури експлуатації, вони краще захищають трибовузли від зношення, корозії і нагаро- та лаковідкладень (особливо під час пуску двигунів).

Синтетичні оливи мають найкращі показники. Вони можуть використовуватися практично при будь-яких експлуатаційних умовах. Але ці оливи більш агресивні по відношенню до різних ущільнювачів, у зв'язку з чим ці оливи не рекомендується використовувати у застарілих конструкціях двигунів або у тих двигунах, що знаходяться у поганому технічному стані. Синтетичні оливи доцільно використовувати в сучасних високофорсованих двигунах, у тому числі з турбонаддуванням і каталізаторами.

### **5.3. Присадки до моторних олив. Механізм дії присадок**

В сучасних двигунах внутрішнього згоряння, що працюють при високих ступенях стиснення та температурах, використання моторних олив без присадок, які здатні значно покращити експлуатаційні властивості цих олив, безперспективно. До таких присадок відносяться мийно-диспергувальна, антиокислювальні, антикорозійні, в'язкісні, протизношувальні, протизадирні, протипінні та депресори. Слід відмітити, що така термінологія дуже умовна. Жодна присадка не виявляє однофункціональної дії. Кожна з них може впливати на декілька властивостей моторної оливи, тому назва конкретної присадки визначає лише головне її призначення. Сучасним напрямком є введення у моторні оливи композицій присадок, які одночасно виконують всі необхідні функції.

**Мийно-диспергувальні присадки.** Призначення - зниження інтенсивності осідання вуглецевих відкладень,

головним чином, на деталях циліндро-поршневої групи. Принцип дії таких присадок полягає в тому, що вони створюють електростатичний бар'єр на частинках, який перешкоджає злипанню цих частинок у згустки та осадженню їх на трибоповерхнях внаслідок гравітаційних сил [36].

В якості мийно-диспергувальних присадок використовуються високолузні сульфонати, алкілсаліцилати, а також алкілфеноляти та інші солі сульфокислот.

Найбільш розповсюдженими є присадки СК-11, СБ-3, ПМС, ПМСя, АСК, МАСК та ін. Ці присадки мають високі диспергуючу та нейтралізуючу властивості, що власно і стало причиною їх широкого використання в моторних оливах.

**Антиокислювальні та антикорозійні присадки.** Ці дві групи присадок будемо розглядати сумісно, тому що їх функції у значному ступені співпадають, різняться вони, в основному, механізмом дії.

Призначення антиокислювальних присадок (інгібіторів) - гальмування процесу окислення олив. Внаслідок дії цих присадок знижується інтенсивність корозійних процесів, а також швидкість утворення вуглецевих відкладень. Антикорозійні присадки виконують лише одну функцію – запобігання корозії антифрикційних сплавів шляхом утворення на їх поверхнях захисної плівки.

В якості антиокислювальних та антикорозійних присадок найбільше розповсюдження отримали діалкілдітіофосфат металів, у тому числі дітіофосфат цинку (ДФ-11) і діалкілфенілдітіофосфат цинку (ВНИИ НП 354). Ефективною антиокислювальною присадкою є також різні органічні з'єднання, які мають у своєму складі сірку, фосфор та азот (присадка ИНХП-21 та ін.).

**В'язкісні присадки.** Як відомо, моторні оливи повинні мати пологую в'язкісно-температурну характеристику і одночасно достатню в'язкість при робочих температурах, які має олива в двигуні. Задоволення цих вимог дозволить забезпечити легкий запуск двигуна в холодних умовах та гідродинамічний режим змащення підшипників колінчатого вала. Малов'язкі оливи характеризуються високим індексом в'язкості (про індекс в'язкості див. 5.4), але при робочих температурах трибовузлів в'язкість може бути недостатньою для забезпечення гідродинамічного режиму. Крім того, при зниженій в'язкості

збільшується витрата оливи на згоряння в циліндрах. Щоб забезпечити сумісність необхідної в'язкості при робочих температурах та пологої залежності в'язкості від температури використовують загущені оливи, в які вводять в'язкісні присадки – поліізобутилені, поліметакрилати, полівінілалкілові ефіри, поліалкістироли, сополімери стиролу з олефінами.

Ефективність використання в'язкісних присадок забезпечується згортанням їх молекул кільцем при низьких температурах та розгортанням при високих, що сприяє збільшенню в'язкості.

**Протизношувальні та протизадирні присадки.** Призначення цих присадок – зменшення зносу трибоповерхонь та запобігання задиркам. Крім того, ці присадки мають антифрикційну дію. В якості протизношувальних та протизадірних присадок використовують сірчисті, хлорні та фосфорні з'єднання різних видів та сполучень, а також високомолекулярні жирні кислоти та їх ефіри.

Механізм дії цих присадок полягає у тому, що вони створюють на трибоповерхнях стійкі межові плівки, які здатні ці трибоповерхні розділити, не допускаючи їх безпосереднього контакту.

До протизношувальних та протизадірних відносяться присадки ЛЗ-309/2, ИП-22К, ДФ-1, ПМСя, АСК, КП та ін.

**Протипінні присадки.** Аерація є головною причиною, яка викликає піну, що небезпечно з точки зору зниження тиску у системі змащування двигуна, збільшення швидкості окислення оливи та її витікання через ущільнення. В якості протипінних присадок використовують деякі кремнійорганічні з'єднання, у тому числі, полісилоксанові рідини. Найбільш розповсюджена присадка ПМС-200А, яку додають в кількості 0,005%, що достатньо для ефективного гасіння піни в усьому об'ємі оливи.

**Депресори** - це присадки, які підвищують температуру застигання моторної оливи шляхом гальмування створення в ній структурного каркасу з кристалів, головним чином, парафіну. Зниження температури застигання необхідно для полегшення пуску при низьких температурах та безперервної подачі оливи до трибовузлів при прогріванні холодного двигуна. Найбільш розповсюджені поліметакрилатні депресанти ПМА "Д", та ПМА "В".

Як правило, в моторних оливах використовуються композиції присадок, які, як відзначалося вище, покращують декілька властивостей олив. До таких композицій відносяться суміш присадок ВНИИ НП-370+ПМС, ЛЗ-23К+ПМС-200А, ВНИИ НП-360+ПМС+В-354+ПМС-200А, ЦИАТИМ-339+ПМС+В-354+ПМС-200А та ін.

#### 5.4. Основні експлуатаційні властивості моторних олив

До експлуатаційних властивостей моторних олив відносять ті, від яких залежать витрати на тертя, знос трибоповерхонь, утворення на них вуглецевих відкладень, корозія та запуск двигуна. Найважливіші з цих властивостей є в'язкість, змащувальні та миючі властивості, а також термоокислювальна стабільність (табл. 5.6).

Таблиця 5.6  
Експлуатаційні властивості моторних олив

Властивість	Показник, що характеризує властивість	Забезпечення властивості
Змащувальні	Антифрикційні, протизношувальні та протизадирні властивості	Потрібна в'язкість, індекс в'язкості, наявність в оливі протизношувальних та протизадирних присадок
Термоокислювальна стабільність	В'язкість, кислотність, наявність лаків, смол, карбенів та карбоїдів	Наявність в оливі мийно-диспергувальної та антиокислювальної присадок
Мийні	Лужне число, кислотність, наявність лаків, смол, карбенів та карбоїдів	Наявність в оливі мийно-диспергувальної присадки
Протикорозійні	Ступінь корозії металів при контакті з оливою	Наявність в оливі протикорозійної присадки
Низькотемпературні	В'язкість та температура застигання	Наявність в оливі депресорної присадки
Коківність	Нагароутворювальні властивості оливи	Потрібний хімічний склад оливи, її в'язкість та чистота
Ступень окислення	Кислотне число	Наявність в оливі антиокислювальної присадки

**В'язкість.** В'язкістю називають внутрішнє тертя рідини, яке виникає між її молекулами при їх переміщенні під впливом зовнішніх сил.

Дотична реакція  $T$ , що виникає при відносному ковзанні суміжних шарів рідини, називається силою в'язкого зсуву (силою рідинного тертя). Вона визначається за законом Ньютона

$$T = \eta \cdot (dV_x/dx) \cdot S, \quad (5.1)$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість (коефіцієнт динамічної в'язкості);  
 $dV_x/dx$  – градієнт швидкості зсуву по нормалі до напрямку потоку  $x$ , тобто змінення швидкості по товщині шару рідини (рис. 5.1);

$S$  - площа зсуву.

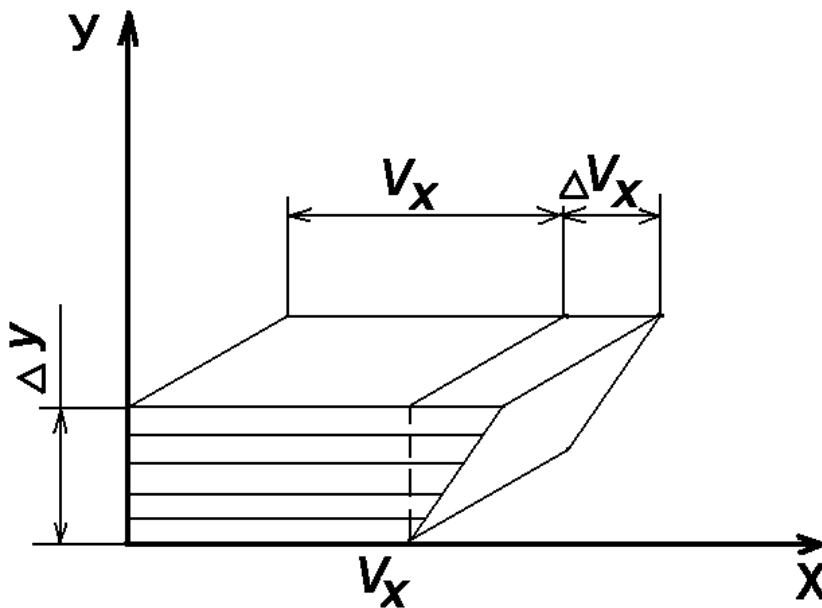


Рис. 5.1. До визначення поняття в'язкості

В одиницях SI динамічна в'язкість визначається в  $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$  (в старих одиницях це Пуаз). Частіше користуються кінематичною в'язкістю, яка є відношення динамічної в'язкості до щільності оливи при тих же температурі та атмосферному тиску:

$$\gamma = \dot{\eta} / \rho \quad (5.2)$$

В одиницях SI кінематична в'язкість визначається в  $\text{м}^2/\text{с}$  або  $\text{мм}^2/\text{с}$ , а в старих одиницях - у сантистоксах ( $1 \text{ сСт} = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$ ).

В'язкість суттєво залежить від температури оливи: чим вона вище, тим в'язкість нижче. Але для різних олив інтенсивність змінення в'язкості неоднакова. При цьому чим менше вона змінюється зі зміненням температури, тобто чим більш полого йде крива змінення в'язкості з температурою, тим вище якість оливи. Така олива при високій температурі залишається достатньо в'язкою, щоб забезпечити надійне змащування трибовузлів, а при низькій температурі – легко прокачується по трубопроводах та каналах системи змащування. Таким чином, для оцінення в'язкісних властивостей оливи необхідно знати її в'язкість при різних температурах. В стандартах на оливи, як правило, вказуються значення їх в'язкості при двох або трьох температурах. Іноді наводиться значення в'язкості при одній температурі, та дається значення відношення в'язкостей при  $50^\circ\text{C}$  та  $100^\circ\text{C}$  або ступінь змінення в'язкості від температури, яка називається індексом в'язкості (ІВ) за Діном та Девісом. Індекс в'язкості можна знайти розрахунковим шляхом, порівнюючи оливу, що випробовується, із двома еталонними оливами: найкраща еталонна олива з індексом в'язкості 100 має пологу температурну криву в'язкості, найгірша – з індексом 0 – круту. Для визначення індексу в'язкості необхідно експериментально встановити кінематичну в'язкість оливи, що випробовується, при температурі  $37,8$  і  $98,9^\circ\text{C}$  та розрахувати індекс в'язкості за формулою

$$\text{ІВ} = (\gamma - \gamma_1) \cdot 100 / \gamma - \gamma_2, \quad (5.3)$$

де  $\gamma$  - в'язкість оливи при температурі  $37,8$  та  $98,9^\circ\text{C}$ , що має при  $100^\circ\text{C}$  таку ж в'язкість, що й олива, що випробується, при температурі  $40^\circ\text{C}$ ;

$\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  - в'язкість, відповідно, оливи, що випробовується, та еталонної оливи з  $\text{ІВ} = 100$  при температурі  $37,8^\circ\text{C}$ .

Чим вище індекс в'язкості оливи, тим більш полого змінюється крива її в'язкості зі зміненням температури, тобто

краще в'язкісні властивості оливи (див. рис. 5.2).

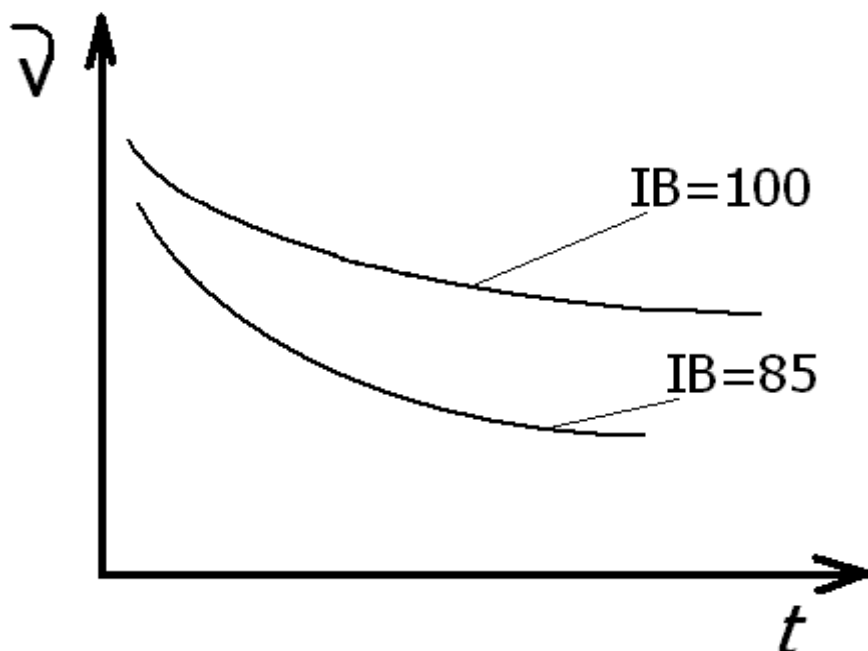


Рис. 5.2. Змінення в'язкості оливи в залежності від її температури

Усі величини, що входять до рівняння (5.3), виражені в умовних одиницях в'язкості, що використовуються в США, тобто універсальних секундах Сейболта. Їх визначення утруднено, тому при визначенні індексу в'язкості користуються номограмою, що наведена в [37].

В'язкісно-температурні властивості олив можна характеризувати також температурним коефіцієнтом в'язкості (ТКВ), який визначається за формулами:

для малов'язких олив та олив середньої в'язкості

$$\text{ТКВ}_{0-100} = (\gamma_0 - \gamma_{100}) / \gamma_{50}; \quad (5.4)$$

для високов'язких олив

$$\text{ТКВ}_{20-100} = 1,25(\gamma_{20} - \gamma_{100}) / \gamma_{50}, \quad (5.5)$$

де  $\gamma_0$ ,  $\gamma_{20}$ ,  $\gamma_{50}$  та  $\gamma_{100}$  - кінематична в'язкість оливи, відповідно, при 0, 20, 50 і 100<sup>0</sup>С.

Чим менше ТКВ, тим краще в'язкісно-температурна залежність оливи.

Залежність кінематичної в'язкості від температури можна орієнтовно визначати з емпіричного рівняння Вальтера

$$\lg \lg(\gamma + 0,6) = A - B \cdot \lg T, \quad (5.6)$$

де  $\gamma$  – кінематична в'язкість, мм<sup>2</sup>/с ;

$A, B$  – константи, що залежать від виду оливи;

$T$  – температура оливи, при якій визначається в'язкість, К.

В'язкість змінюється також зі зміненням тиску оливи. З підвищенням тиску  $P$  в'язкість оливи збільшується експоненціально, згідно з рівнянням

$$\mu_p = \mu_0 e^{\alpha p}, \quad (5.7)$$

де  $\mu_p$  та  $\mu_0$  - відповідно, динамічна в'язкість оливи при тиску  $p$  та при атмосферному тиску;

$\alpha$  – п'єзокоефіцієнт в'язкості.

**Змащувальні властивості.** Це властивості оливи, які впливають на процеси тертя та зношування трибовузлів. Основні з них - це антифрикційні (впливають на величину сили тертя), протизношувальні та протизадирні (охороняють трибовузли від задирок і заїдань при високих навантаженнях та температурах) властивості.

Головним параметром оливи, що визначає її змащувальні властивості, є в'язкість, від величини якої залежать витрати потужності на тертя, зношування трибовузлів (через надійне гідродинамічне змащування), ущільнення поршневих кілець, витрати палива (через витрати на тертя), легкість запуску двигуна (особливо при негативній температурі).

На жаль, надійних лабораторних методів визначення змащувальних властивостей олив немає. Існують так звані машини тертя, за допомогою яких можна попередньо визначити



показники змащувальних властивостей тієї чи іншої оливи. На жаль, отримані при таких випробуваннях кількісні показники, як правило, значно відрізняються від фактичних значень, отриманих при експлуатації конкретного трибовузла або машини в цілому. Але незважаючи на це, машини тертя широко використовуються при лабораторних трибологічних випробуваннях змащувальних властивостей олів.

Найбільше розповсюдження отримали чотирикулькова машина тертя ЧКМ або МАСТ-1, схема випробувань яких наведена на рис. 5.3,а.

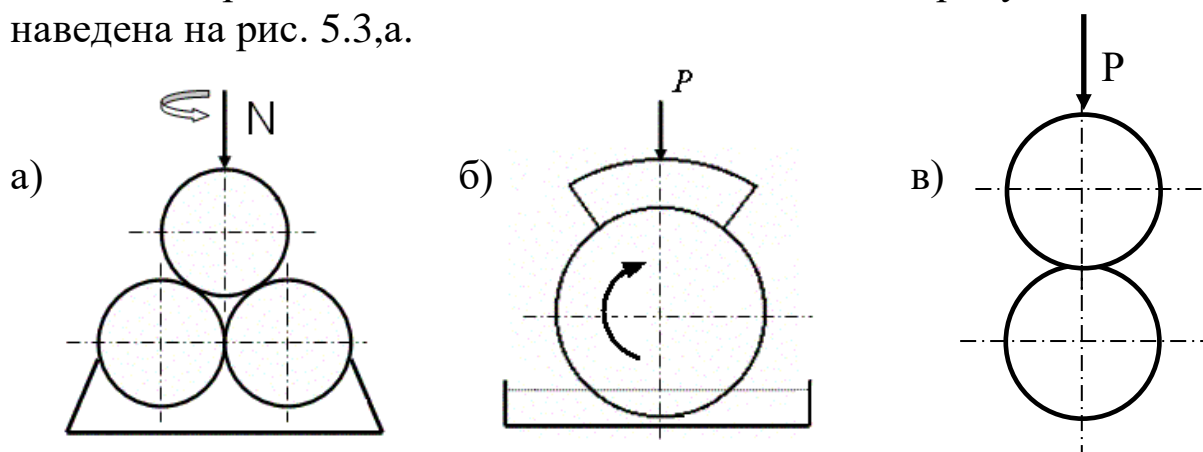


Рис. 5.3. Схема випробувань на машинах тертя:

- а) ЧКМ (МАСТ-1); б) СМЦ-2 (схема “колодка-ролик”);  
в) СМЦ-2 (схема “ролик-ролик”)

Випробування змащувальних властивостей олів на машині тертя ЧКМ або МАСТ-1 проводяться у відповідності до ГОСТ 9450-75. Вузол тертя на цих машинах являє собою змінні чотири кульки, виготовлені, як правило, зі сталі ШХ-15. Три нижніх кульки затискуються кільцем на горизонтальній площині, а четверта верхня кулька закріплюється у патроні та розташовується в поглибленні, що створюється трьома нижніми кульками. До верхньої кулі прикладається навантаження у відповідності до ГОСТ 9450-75. Чашку з вузлом тертя заповнюють оливою, що випробовується, після чого вмикають двигун, який обертає центральну кулю з відповідною частотою. Для оцінення змащувальних властивостей оливи визначають діаметр плями зносу, навантаження зварювання, критичне

навантаження та індекс задирки.

На машині тертя СМЦ-2 (більш пізня модифікація СМТ) у якості елементів, що зношуються, використовують змінні ролики та колодки (рис. 5.3,б, в). Використовуються схеми “колодка-ролик” (імітує роботу підшипника ковзання) та “ролик-ролик” (імітує роботу вищих кінематичних пар тертя). В першому варіанті контактування ролик обертається з потрібною частотою, а колодка, до якої прикладається навантаження, нерухома. У другому варіанті ролики обертаються у різні боки та з різною частотою обертання, що сприяє прослизанню роликів один відносно другого.

Олива, що випробовується, заливається у ванночку машини. Під час випробувань фіксується момент сил тертя за допомогою потенціометра, а знос зразків визначається шляхом зважування їх до та після випробувань.

Існують ще декілька типів машин тертя (АЄ-5, МПТ-1, І-47 МДП-1 та ін.), які дозволяють проведення визначень змащувальних властивостей олив при різних варіантах контактування поверхонь.

**Термоокислювальна стабільність** оливи характеризує її стійкість до впливу кисню (окислення) в тонкому шарі в умовах високої температури (характерно для тонкого шару оливи на дзеркалах циліндрів). Для визначення цього показника використовується метод, розроблений К.К. Папок [38]. Цей метод засновано на вимірюванні часу (в хвилинах), за який тонкий шар оливи на нагрітій металевій поверхні у пристрої за наявності кисню повітря перетворюється у лакову плівку. Чим вище час, тобто чим вище термоокислювальна стабільність, тим повільніше олива окислюється в тонкому шарі, що свідчить про відносно кращу якість оливи.

**Мийні властивості** характеризують схильність моторної оливи до утворення різних відкладень на деталях двигуна. Визначаються на лабораторній установці ПЗВ (рис. 5.4), яка являє собою малогабаритний одноциліндровий двигун, що обладнаний електродвигуном для привода колінчатого вала та електропідігрівачем, який забезпечує підтримку потрібної температури оливи у картері та на поверхні поршня.

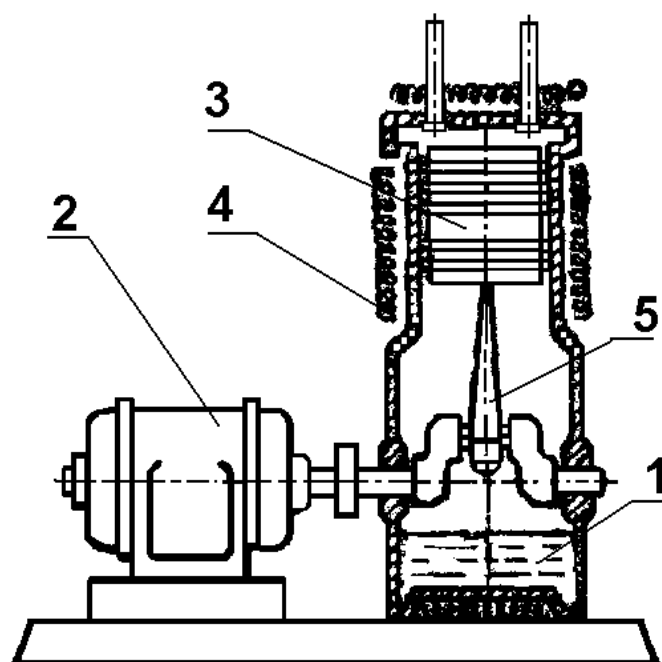


Рис. 5.4. Схема установки ПЗВ

1-олива, що випробовується; 2-електродвигун; 3- поршень;  
4- електропідігрівач; 5-шатун

В картер установки заливають 250 мл оливи та піддають її випробуванням на протязі 2 год. Температуру у головці циліндрів установлюють  $300^{\circ}\text{C}$ , у середині циліндра –  $225^{\circ}\text{C}$ , у картері –  $125^{\circ}\text{C}$ , а повітря, що поступає у циліндр, -  $220 \pm 20^{\circ}\text{C}$ . Колінчатий вал обертається із частотою  $2500 \pm 50 \text{ хв}^{-1}$ . Після випробувань установку розбирають та за забрудненістю поршня лаковими відкладеннями у відповідності до еталонної шестибальної системи оцінюють мийні властивості оливи, що випробувалася. Якщо поршень чистий, то це оцінюється, як 0 балів, а якщо уся бокова поверхня покрита лаком чорного кольору – як 6 балів.

**Протикорозійні властивості** характеризують здатність оливи захищати трибоповерхні від корозії. На процес корозії впливають органічні кислоти та луги, активні сіркові з'єднання, вода, кисень повітря, продукти згоряння палива та ін.

Відомі різні методи визначення протикорозійних властивостей оливи. Всі вони засновані на одному принципі – на визначенні ступеня корозії металу при його контакті з оливою в

тих чи інших умовах випробувань.

Найбільш розповсюджений метод Пинкевича щодо визначення протикорозійних властивостей олив на приладі АП-1 (рис. 5.5).

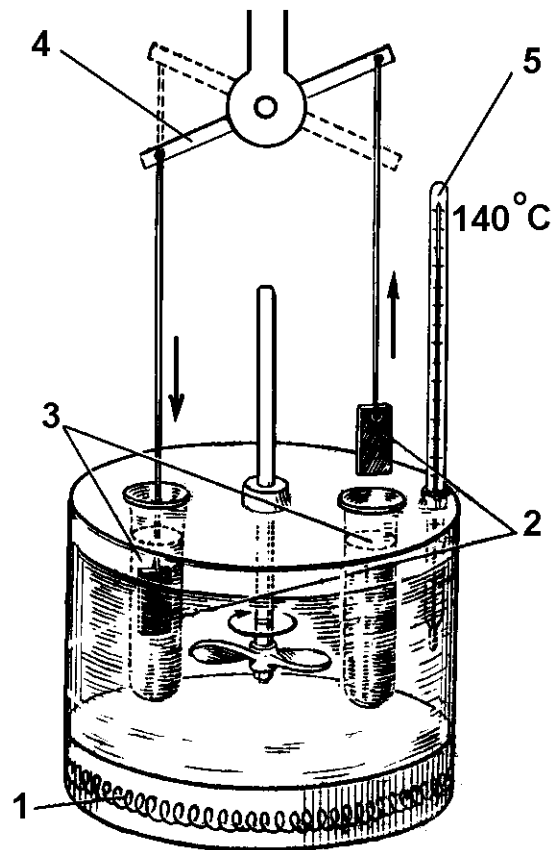


Рис. 5.5. Схема приладу АП-1 для визначення протикорозійних властивостей олив:

1 – електрообігрів; 2 - свинцеві пластівці; 3 - олива у пробірках;  
4 - механізм привода пластівців; 5-термометр

Прилад АП-1 складається з нагрівальної системи, скляних пробірок (8 шт.), в кожному з яких заливають по 80 мл оливи, що випробовується, та пристосування, що забезпечує автоматичне попереми́нне занурення свинцевих пластівців в пробірці з оливою та витягнення їх відтіля.

Температура оливи складає 140°C, час випробувань – 50 год. Про протикорозійні властивості (г/м<sup>2</sup>) оливи судять за

витратою за рахунок корозії маси свинцевих пластівців, віднесеної до їх площини, за час випробувань. Чим менше маса пластівців, тим краще протизношувальні властивості оливи.

Існують ще прилади НАМИ, ДК-2, ПЗВ та інші, призначені для випробувань протикорозійних властивостей оливи.

**Низькотемпературні властивості** характеризують прийнятність оливи до використання при негативних температурах.

Про властивості оливи, які виявляються тільки при низьких температурах, можна судити за в'язкістю та температурою застигання. Зі зниженням температури олива не замерзає відразу, як наприклад, вода, а поступово стає все більш в'язкою, поки зовсім не втратить рухомість (плинність). З підвищенням в'язкості утруднюється прокачування оливи по трубопроводах та фільтрація її від забруднень, ускладнюється запуск двигуна.

Якщо в оливі є парафінові вуглеводні, що легко застигають, то зі зниженням температури вони виділяються у вигляді кристалів та прискорюють процес застигання оливи.

Температура, при якій олива втрачає рухомість, називається температурою застигання оливи.

Температура, при якій рухомість оливи достатня для пуску холодного двигуна та прокачування оливи, завжди повинна бути вище температури застигання приблизно на 10 градусів.

Зниження температури застигання оливи досягається введенням в неї депресорної присадки.

**Коксованість.** У двигунах олива попадає у камеру згоряння та згоряє в ній, що активно впливає на утворення нагару. Саме тому при оціненні експлуатаційних властивостей оливи дуже важливо знати її нагарні властивості. На жаль, поки ще не розроблені лабораторні методи, які дозволяють надійно оцінювати цю важливу властивість оливи. Тому тільки моторні випробування є найбільш достовірним методом оцінення нагарних властивостей оливи.

В лабораторних умовах найчастіше використовують метод, який засновано на визначенні коксіваності оливи. Сутність цього методу полягає в тому, що оливу нагрівають до високої температури без доступу повітря. В результаті цього відбувається

випарування та розкладання оливи з утворенням коксового осаду. Кількість осаду виражають у відсотках по відношенню до взятої для випробувань маси оливи. Показник “коксівність” широко використовують для оцінення якості оливи, тому що його величина пов’язана з хімічним складом оливи, зі ступенем її чистоти, в’язкістю та іншими властивостями.

**Температура спалахування оливи** - найнижча температура, при якій пари оливи, що нагріта в спеціальному приладі, створюють з повітрям суміш, яка спалахує від стороннього джерела вогню.

**Температура займання** - температура оливи, при якій не тільки спалахують її пари від стороннього джерела вогню але й сама олива.

**Температура самозаймання** - температура оливи, при якій вона запалюється без стороннього джерела вогню.

**Лужне число** характеризує склад в оливі речовин, які володіють лужними властивостями, та виражається в кількості міліграмів КОН, що потрібно для нейтралізації 1 г оливи. Воно є показником нейтралізуючих властивостей оливи та може бути використано в якості непрямого показника складу в оливі мийно-диспергувальної присадки, яка має лужні властивості.

**Кислотне число** оливи характеризує наявність в ній органічних кислот. Воно також виражається в міліграмах КОН, яке потрібно для нейтралізації 1 г оливи.

## 5.5. Старіння моторних олив

Під терміном «старіння» ми будемо розуміти сукупність різних процесів, які приводять до змін фізико-хімічних властивостей олив при використанні в двигунах та при зберіганні. Якщо мати на увазі, що сучасна олива – це базова олива плюс присадки, то складний комплекс явищ, що відбуваються при старінні оливи, можна поділити так: хімічні та фізико-хімічні процеси старіння оливної основи, зовнішнє забруднення оливи та спрацьовуваність присадок. Такий розподіл умовний, тому що всі процеси, які відбуваються з оливою при

старінні, взаємозв'язані. Але для встановлення закономірностей старіння доцільно поділити ці процеси на більш прості, хоча для цього й потрібні деякі умовні допущення.

В процесі експлуатації оливи вона окислюється, в ній накопичуються механічні домішки (частинки зносу, пилу та вода), спрацьовування присадки.

**Окислення оливи.** При роботі двигуна під впливом кисню повітря та високої температури олива окислюється. Важливу роль в цьому процесі грає постійний контакт оливи з металом (особливо, з кольоровим, з якого виготовлені вкладиші колінчатого вала), який виконує функції каталізатора окислення. В результаті цього в оливі з'являються оксиди та кислоти, які обумовлюють корозійну агресивність оливи. Крім того, в оливі накопичуються смоли, лаки, асфальтени, карбени та карбоїди, які сприяють забрудненості оливи продуктами органічного походження.

Найбільш шкідливі продукти окислення з точки зору експлуатації двигуна – оксикислоти та асфальтени, які нерозчинні в оливі та, маючи високу липкість, міцно утримуються на металі, внаслідок чого погіршується тепловідведення від них. Крім того, ці забруднення забивають канавки поршневих кілець, обмежуючи їх переміщення, а іноді приводять до повного залягання кілець.

Швидкість окислення оливи збільшується зі зростанням її температури. При звичайній температурі навколишнього повітря окислення оливи протікає надзвичайно повільно або зовсім не відбувається.

Численними експериментальними даними встановлено, що найбільш інтенсивно процес окислення протікає в початковий період експлуатації оливи, тобто тоді, коли в неї багато нестабільних вуглеводнів. Як тільки останні окисляться, процес квазістабілізується.

Ступінь окислення безпосередньо можна характеризувати кислотним числом (К.Ч.), закономірність зміни якого така (рис. 5.6): в початковий період відбувається різке збільшення його, а потім швидкість зростання кислотного числа знижується та стає практично постійною.

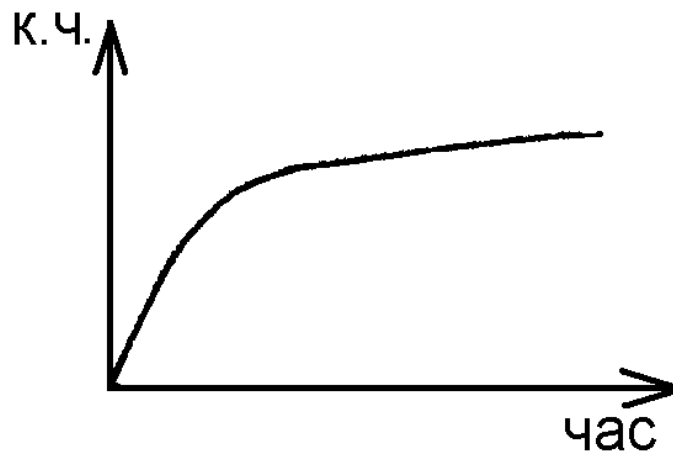


Рис. 5.6. Характерний графік змінення кислотного числа моторної оливи

Слід відмітити і позитивний бік процесу окислення оливи. Внаслідок цього процесу в оливі, як відзначалося вище, накопичуються продукти окислення, які володіють дипольним моментом, тобто стають ПАР, які створюють на трибоповерхнях межовий шар, який розділяє їх та знижує таким чином тертя та зношування.

При наявності в оливі антиокислювальних присадок процес окислення сповільнюється, а нейтралізуючий компонент (метал присадки) вступає в реакцію з органічними кислотами.

**Забруднення оливи.** Під загальним поняттям «забруднення» будемо мати на увазі накопичення в оливі забруднюючих домішок, які при певних умовах погіршують експлуатаційні показники оливи. Забруднення, що поступають в оливу (причини та джерела цього більш докладно наведено в 6.3), нерозчинні в ній, їх вважають механічними домішками неорганічного походження. Ці забруднення приводять до інтенсивного абразивного зношення (особливо небезпечні частинки пилу), підвищують швидкість окислення оливи, розривають змащувальну плівку, погіршуючи режим змащування, засмічують фільтруючі елементи.

З перших хвилин роботи двигуна олива перетворюється у дисперсну систему, яка складається з високодисперсних



вуглеводних частинок, розподілених в оливному середовищі.

Розмір таких частинок від 0,4 до 200 мкм, причому частинки зносу в моторній оливі мають розміри до 10 мкм, а більш великі розміри характерні для частинок пилу. При цьому розміри частинок не залишаються постійними з часом, тому що найдрібніші з них збираються (коагулюють) в більш крупні агрегати, а деяка частина, навпаки, зменшує свої розміри, бо потрапивши в зазор між трибоповерхнями, під впливом навантаження подрібнюються та набувають розміру зазору.

Наявність в оливі мийно-диспергувальної присадки перешкоджає об'єднанню частинок в більш великі агрегати, які потім у вигляді лакових відкладень осідають на деталях двигуна.

Нерозчинені в оливі забруднення різного походження не слід розглядати як окремі, не пов'язані між собою тверді частинки. Металеві частинки зносу, сажі та пилу можуть обволікатися продуктами окислення та адсорбувати на своїй поверхні молекули присадки.

Закономірність накопичення механічних домішок неорганічного походження така: в початковий період має місце швидке зростання їх утворення, а після цього процес накопичення домішок стабілізується та швидкість його стає практично постійною. Причини стабілізації – це робота фільтрів, особливо тонкої відчистки, а також доливки оливи, які компенсують її витрати за рахунок угару.

До механічних домішок відноситься також вода, яка попадає в оливу або у вигляді конденсату при перепадах температур, або через нещільність системи змащування чи охолодження.

Вода погіршує антикорозійні властивості оливи, збільшує її об'єм у піддоні (за рахунок цього підвищується витікання оливи), а також сприяє випадінню в осад присадок, більшість з яких є гігроскопічними.

**Спрацьовуваність присадок.** Відбувається з початкового періоду експлуатації оливи в двигуні. Витрата ефективності присадки знижує її експлуатаційну надійність, а також строки служби власне оливи. Причини витрати присадок такі:

витрата лужного компоненту мийно-диспергувальної присадки на нейтралізацію кислих продуктів;  
адсорбція молекул присадки на поверхнях деталей двигуна та на окремих частинках домішок з наступною фільтрацією.

Витрати присадок в оливі під час її експлуатації можна контролювати методом ІК-спектроскопії, але для реалізації цього методу потрібна дефіцитна електронна апаратура, що дорого коштує. Найбільш простим та інформативним методом контролю складу мийно-диспергувальної присадки є визначення лужного числа оливи. Закономірність його змінення така: на початку роботи оливи спостерігається різке зменшення лужного числа, що обумовлено збільшенням в цей час кислотного числа (див. рис. 5.6). Після цього швидкість падіння лужного числа стабілізується та набуває майже постійного значення, що обумовлено доливками оливи та меншою швидкістю зростання кислотного числа.

**Змінення в'язкості.** В'язкість моторної оливи під час експлуатації може збільшуватися та навпаки зменшуватися.

Збільшення в'язкості спостерігається тому, що олива під час використання у двигунах активно окислюється, накопичуючи таким чином продукти органічного забруднення. За рахунок цього в'язкість оливи збільшується, що підвищує витрати енергії, необхідної для збовтування оливи щоками або противагами колінчатого вала, погіршує умови подачі оливи до пари тертя “шийка-вкладиш”, ускладнює пуск двигуна в умовах негативних температур довкілля.

Зменшення в'язкості спостерігається тому, що при неповному згорянні палива воно через замки кілець стікає по дзеркалах циліндрів у картер, потрапляє в оливу та розріджує її. Це не тільки підвищує рівень оливи у піддоні картера, але й погіршує умови змащування трибоповерхонь, особливо тих, що працюють в гідродинамічному режимі тертя. Крім того, наявність палива в оливі підвищує його температуру займання та самозаймання.

## 5.6. Бракування олив за фізико-хімічними властивостями та електропровідністю. Строки служби моторних олив

У зв'язку з процесами старіння моторної оливи настає такий стан, коли вона не може ефективно виконувати свої важливі функції (головним чином, надійно захищати трибоповерхні від тертя та зносу). В цьому разі виникає необхідність заміни оливи на свіжу. При цьому виникає проблема визначення саме того часу, коли подальша експлуатація оливи стає небезпечною. В керівництвах по експлуатації кожної машини є інформація про те, після якого часу напрацювання двигуна олива підлягає заміні, але вказані строки слід розглядати, як орієнтовні, бо кожний двигун експлуатується при різних навантаженнях, температурах, ступені забруднення доквілля і т.п. Крім того, велике значення має кваліфікація водія або машиніста та його індивідуальна манера роботи. Тому необхідно постійно контролювати якість оливи під час експлуатації та якщо який-небудь показник якості її вийде за межі припустимого значення бракувального показника, оливу безумовно треба замінити на свіжу. Припустимі значення бракувальних показників моторної оливи наведено у табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Бракувальні показники якості моторних олив та їх припустимі значення [39]

Найменування показника	Бензиновий двигун	Дизель
1. Змінення в'язкості, %, не більш:		
приріст	25	35
зниження	20	20
2. Склад домішок, %, не більш	1,0	3,0
3. Лужне число, мгКОН/г, не менш	0,5 – 2,0*	1,0 – 3,0*
4. Зниження температури запалення, град., не більш	20	20
5. Склад води, %, не більш	0,5	0,3
6. Склад палива, %, не більш	0,8	0,8
* Більші значення – для олив вищих груп – Г, Д та Е.		

Моторні оливи груп В, Г та Д володіють різним запасом мийно-диспергувальних властивостей, тому абсолютне значення їх бракувальних показників слід встановлювати диференційовано, тобто з урахуванням використання оливи у відповідних за рівнем форсування двигунів.

Слід відмітити, що постійний контроль якості оливи за багатьма показниками для визначення необхідності її своєчасної заміни пов'язано зі значними труднощами: необхідністю в кожній організації, що експлуатує машини, мати хімічну лабораторію, постійний у ній штат співробітників, відповідне лабораторне обладнання, хімічні реактиви і т. п. Крім того, виконання кожного з видів аналізів займає значний час, що не завжди можливо, особливо для мобільних, землерийно-транспортних, колійних та інших машин, які в очікуванні результатів аналізів вимушені простоювати.

Тому необхідно, щоб був деякий інтегрований бракувальний показник оливи, який характеризував би її стан в цілому та визначення якого не займало б багато часу. Таким показником може бути електропровідність оливи, яка адекватно реагує на змінення її найбільш важливих властивостей, у тому числі, протизношувальних. Це обумовлено тим, що використовуючи електричні явища при терті, можна отримати важливу інформацію про процеси, що спостерігаються на трибоповерхнях, та керувати їх зносом.

Електрична міцність оливної плівки, що поділяє трибоповерхні, велика і пробій її під впливом трибоелектрики здійснюється при відносно великій різниці потенціалів та, як наслідок, з більш високою температурою.

У олів, що працювали, електропровідність вище, т.я. в них є металеві частинки зносу, які сприяють створенню провідності. Тому чим більше в оливі частинок зносу, тим вище електрична провідність. Але при експлуатації генерування до оливи частинок зносу свідчить про погіршення її протизношувальних властивостей. Результати досліджень показали [40], що електропровідність оливи прямо пропорційна її діелектричній проникності, квадратному кореню з питомої інтенсивності зношування та діаметру плями контакту. Таким чином,

збільшення інтенсивності зношування, що супроводжується генеруванням в оливу частинок зносу металевих поверхонь, повинно привести до підвищення електропровідності оливи. Для вимірювання останньої можна використовувати лабораторний переносний тераомметр МОМ-4, який дозволяє проводити вимірювання електричного опору рідких діелектриків в діапазоні  $2 \cdot 10^3$  до  $10^{13}$  Ом (величина, зворотна опору, є електропровідністю).

На рис. 5.7 наведено графік змінення електропровідності моторної оливи М-12-Г<sub>1</sub>, з якого добре можна бачити закономірність підвищення цього показника оливи з часом її використання в двигуні.

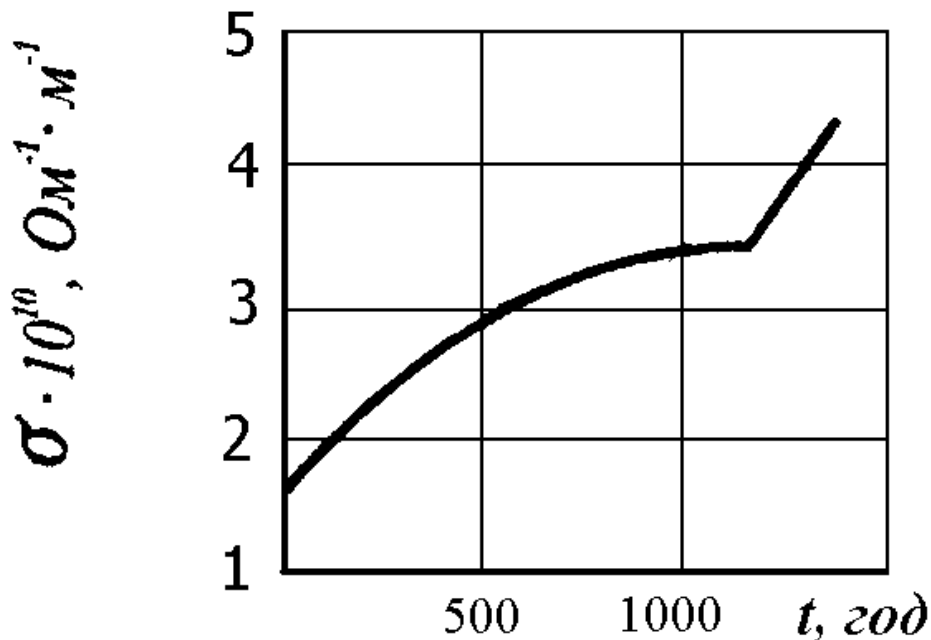


Рис. 5.7. Залежність електропровідності оливи від часу її роботи

На наведеному рисунку електропровідність монотонно зростає, але тоді, коли інтенсивність зношування стане непомірно великою, цей показник почне різко, стрибкоподібно збільшуватися, що є підставою для необхідності заміни оливи на свіжу.

Слід відмітити, що визначення електропровідності потребує всього 15 хв, тобто цей метод визначення можливості подальшої експлуатації або необхідності заміни оливи є експрес-методом.

## **6. РОБОЧІ РІДИНИ ГІДРОПРИВОДІВ МАШИН**

### **6.1. Умови роботи робочих рідин та вимоги, що пред'являються до них**

Завдяки ряду важливих переваг гідравлічний привод широко використовується в різних мобільних машинах (екскаваторах, скреперах і т.п.). Одним з основних конструктивних елементів, що забезпечує безперебійну та тривалу експлуатацію гідравлічного привода, є робоча рідина, яка виконує важливі та багатобічні функції. Насамперед рідина унаслідок своєї нестисливості є робочим тілом гідропривода, тобто передає енергію від насоса до робочих органів машин. Крім того, робоча рідина захищає елементи гідропривода від зношування, зменшує витрати енергії на тертя, відводить теплоту від поверхонь, що труться, а також очищує гідроагрегати від продуктів зношування та інших забруднень.

Умови експлуатації гідроприводів будівельних, колійних та перевантажувальних машин, а отже, й робочих рідин, дуже важкі. Це насамперед надзвичайно висока запиленість довкілля, внаслідок чого через фільтри-сапуни, різні нещільності в гідроприводі в нього, а, отже, і в робочу рідину, проникає значна кількість пилу, що викликає інтенсивне абразивне зношування.

Крім того, спостерігаються значні перепади температур: від  $-30$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  при запуску до  $60-80^{\circ}\text{C}$  при сталому режимі. Температура гідропривода може короткочасно підвищуватися до  $120-130^{\circ}\text{C}$ . Спостерігаються також великі перепади тиску: від  $0$  до  $25$  МПа та вище. Швидкість ковзання поверхонь, що труться, може досягати  $20$  м/с.

В таких умовах робоча рідина окислюється, забруднюється та вступає в хімічний контакт з конструкційними матеріалами, а великі перепади тиску можуть привести до розриву молекулярних зв'язків, тобто до витрати робочою рідиною в'язкості.

У зв'язку з настільки важкими умовами експлуатації робочі рідини повинні відповідати таким вимогам:

мати мінімальну стисливість;  
володіти високими змащувальними властивостями;  
мати в'язкість, яка забезпечує задовільну роботу гідропривода в широкому діапазоні робочих температур;  
мати високій індекс в'язкості;  
мати температуру застигання на 5-10<sup>0</sup>С нижче можливої температури довкілля;  
бути сумісною із матеріалами, з яких виготовлені ущільнювальні вузли;  
зберігати стабільність властивостей при експлуатації, транспортуванні та зберіганні;  
не бути токсичною та не викликати небезпечних забруднень довкілля.

Ці вимоги в максимальному ступені задовольняють робочі рідини на нафтовій основі.

## **6.2. Класифікація та номенклатура робочих рідин**

В якості робочих рідин в гідроприводах мобільних машин використовуються деякі марки індустріальних та спеціальних олив.

Система позначення індустріальних олив являє собою групу знаків. Перший знак - це буква "И", яка позначає, що олива індустріальна, друга визначає приналежність до групи за призначенням (для олив, що використовуються в гідроприводах, - буква "Г"), третя - приналежність до підгрупи за експлуатаційними властивостями, четвертий знак - цифра, яка характеризує клас кінематичної в'язкості при температурі 40<sup>0</sup>С (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

## Класи в'язкості олив для гідравлічних приводів

Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при температурі 40 <sup>0</sup> С, мм <sup>2</sup> /с	Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при температурі 40 <sup>0</sup> С, мм <sup>2</sup> /с
5	4,14-5,06	32	28,8-35,2
7	6,12-7,48	46	41,4-50,6
10	9,0-11,0	68	61,2-74,8
15	13,5-16,5	100	90,0-110,0
22	19,8-24,2	150	135,0-165,0

Індустріальні оливи за експлуатаційними властивостями поділяють на п'ять підгруп: А, В, С, Д, Е. Для гідроприводів мобільних машин використовуються оливи підгрупи А. До неї відносяться нафтові оливи без присадок для машин та механізмів промислового обладнання, умови роботи яких не пред'являють особливих вимог до антиокислювальних та антикорозійних властивостей олив.

Наприклад, марка оливи И-Г-А-32 позначає, що ця олива індустріальна, для гідравлічних систем, експлуатаційні властивості її відповідають підгрупі А, клас в'язкості – 32.

Система позначення спеціальних олив для гідроприводів також являє собою групу знаків. Перші два знаки - букви “МГ”, які позначають, що це олива для гідроприводів, третій знак - цифра, яка показує клас кінематичної в'язкості при 40<sup>0</sup>С (табл. 6.1), четвертий знак - буква, яка указує на приналежність оливи до групи за експлуатаційними властивостями (табл. 6.2).

Наприклад, марка оливи МГ-15-В позначає, що ця олива для гідропривода з класом в'язкості 15, групи В за експлуатаційними властивостями.



Таблиця 6.2

Група оливо для гідравлічних приводів за експлуатаційними  
властивостями

Клас в'язкості	Склад оливи	Область використання, що рекомендується
А	Без присадок	Гідроприводи з шестеренними та поршневыми насосами, які працюють при $p \leq 15 \text{ МПа}$ та $t \leq 80^\circ\text{C}$
Б	З антиокислювальними та антикорозійними присадками	Гідроприводи з насосами, всіх типів, які працюють при $p \leq 25 \text{ МПа}$ та $t > 80^\circ\text{C}$
В	З повним пакетом присадок	Гідроприводи з насосами всіх типів, які працюють при $p > 25 \text{ МПа}$ та $t > 90^\circ\text{C}$

Нафтопереробна промисловість випускає значну кількість індустриальних та спеціальних оливо для гідроприводів, серед яких для мобільних машин найбільше поширення отримали сім марок, характеристика яких наведена у табл. 6.3 та 6.4 [41].

Таблиця 6.3

Номенклатура та показники якості індустриальних оливо

Показник	И-Г-А-32 (И-20А)	И-Г-А-46 (И-30А)
Щільність при $20^\circ\text{C}$ , $\text{кг/м}^3$ , не більше	890	890
В'язкість кінематична при $40^\circ\text{C}$ , $\text{мм}^2/\text{с}$	29-35	41-51
Кислотне число, $\text{мгКОН/г}$ , не більше	0,03	0,05
Температура, $^\circ\text{C}$ : спалахування у відкритому тиглі, не нижче застигання, не вище	200 -15	210 -15
Стабільність проти окислення: приріст кислотного числа, $\text{мгКОН/г}$ , не більше	0,3	0,4

Примітка: у дужках - старе позначення оливи.

Таблиця 6.4

## Номенклатура та показники якості спеціальних олив

Показник	МГ-15-В (ВМГЗ)	МГ-22-А (АУ)	МГ-22Б (АУП)	МГ-46-Б (МТ-30)	МГ-46-В (МГЕ-46В)
Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при 40 <sup>0</sup> С при – 40 <sup>0</sup> С	13,5-16,5 -	19,8-24,2 1300	19,8-24,2 -	41,4-50,6 -	41,4-50,6 -
Індекс в'язкості	160	-	-	85	85
Кислотне число, мгКОГ/г	-	0,05	0,45-1,0	0,06	0,7-1,5
Температура, <sup>0</sup> С: спалахування у відкритому тиглі застигання	135 -60	165 -45	145 -45	190 -30	190 -30
Змінення маси гуми марки УИМ-1 після випробувань в оливі, %	4,0-7,5	-	-	4,0-6,5	3,5-5,0

Слід відмітити, що з метою уніфікації експлуатаційних матеріалів в деяких гідроприводах мобільних машин пропонується використовувати ту моторну оливу, яка застосовується у двигуні внутрішнього згорання.

### 6.3. Основні експлуатаційні властивості робочих рідин

Найбільш важливими експлуатаційними властивостями робочих рідин є стабільність проти окислення, змащувальна здатність, в'язкість, стисливість, промислова чистота, протикорозійні та низькотемпературні властивості, емульгованість та спінення.

Поняття змащувальної здатності, в'язкості, стабільності проти окислення, антикорозійних та низькотемпературних властивостей розглянуті в підрозділі 5.4. За цими параметрами робочі рідини практично не відрізняються від моторних олив. Слід лише відмітити, що стосовно до робочих рідин немає такого поняття, як термоокислювальна стабільність, тому що це не

актуально по відношенню до робочих рідин. Це обумовлено тим, що в гідроприводі немає таких високих температур, які спостерігаються в двигунах внутрішнього згорання, наприклад, в районі ВМТ. У зв'язку з цим робочі рідини не окислюються настільки глибоко, як моторні оливи. Тому в процесі експлуатації в робочих рідинах практично не створюються продукти глибокої полімеризації, тобто відпадає необхідність забезпечувати високі мийно-диспергувальні властивості робочих рідин. Процес окислення робочих рідин обмежується, як правило, утворенням лаків та смол, які відкладаються на деталях, зарощують зазори та калібровані отвори, збільшують зусилля зрушення та заклинюють золотники.

У зв'язку з цим розглянемо лише ті властивості, які мають експлуатаційну значимість для робочих рідин.

**Стисливість.** Як відмічалось вище, робоча рідина повинна бути в максимальному ступені нестислива. Стисливість – це здатність робочої рідини до зменшення об'єму під навантаженням. Характеризується коефіцієнтом  $C$  стисливості, який показує відносне змінення об'єму робочої рідини, яка приходить на одиницю тиску

$$C = \frac{1}{V} \frac{dV}{dp}, \quad (6.1)$$

де  $V$  - початковий об'єм робочої рідини до додавання навантаження;

$dV$  - приріст об'єму при прирості  $dp$  тиску.

Для розрахунків при роз'язанні інженерних задач частіше використовують модуль об'ємної пружності, який являє собою величину, яка зворотна коефіцієнту стисливості.

Стисливість робочої рідини залежить від концентрації в ній нерозчиненого повітря.

Робочі рідини на нафтовій основі мають відносно невелику стисливість: при тиску 400 МПа їх об'єм зменшується на 15-20%.

**Емульгованість** - це здатність робочої рідини забезпечити швидкий відстій води та запобігати створенню стійких емульсій.

При роботі гідропривода наявність води в робочій рідині приводить до таких негативних явищ:

- зниження в'язкості робочої рідини;
- погіршення змащувальної здатності робочої рідини;
- збільшення корозії елементів гідропривода;
- випадання в осад деяких видів присадок.

У зв'язку з цим потрапляння води у робочу рідину при експлуатації неприпустиме, але вода все ж таки завжди є у робочій рідині за рахунок конденсату та різних нещільностей. Крім того, вода може попадати у робочу рідину через фільтр-сапун.

Якщо з робочою рідиною вода не змішується, то вона опускається на дно гідробаку, відкіля може бути виведена через зливальний отвір. Але деякі робочі рідини при обводненні створюють стійкі водооливні емульсії, які являють собою однорідну дисперсію однієї рідини в іншій. Така система нестабільна, але час, якій необхідно для поділу фаз емульсії, може розрізнятися дуже сильно: від декількох секунд до багатьох років.

Утворення водооливних емульсій стимулюється полярно-активними речовинами, які в робочих рідинах можуть бути в якості природних компонентів, що перейшли з нафти, виникли внаслідок окислення або штучно уведені в якості присадок. Ці полярно-активні речовини можуть діяти в якості емульгаторів, тобто речовин, які підвищують стійкість емульсії. Утворенню останніх сприяє також забруднення робочої рідини частинками домішок.

Показник емульгованості робочих рідин - вміст в ній води.

**Спінення** - це здатність робочої рідини до поглинання повітря з утворенням піни. Наявність повітря в робочій рідині приводить до інтенсифікації окислення, зниження коефіцієнта подачі насоса, підсилення корозії елементів гідропривода, запізнення його швидкодії, погіршення точності позиціонування робочих органів, збільшення об'єму робочої рідини в гідробаці та до різких витоків її назовні через ущільнення.

Незважаючи на існування ряду гіпотез про причини спінювання, це питання неможливо вважати у значній мірі вивченим. Відомо лише, що на утворення піни суттєвий вплив справляє температура та в'язкість: по мірі підвищення

температури робочої рідини спінювання спочатку може бути відсутнім, а після розвиватися та досягти максимуму, перейшовши через який інтенсивність спінювання зменшується.

Повітря в робочій рідині може перебувати у розчиненому та нерозчиненому станах. Проводяться теоретичні та експериментальні дослідження впливу повітря на кількісні та якісні показники роботи гідروпривода, визначені основні способи зниження вмісту повітря в робочих рідинах. Але в нормативно-технічній документації немає даних щодо розчинності повітря та не лімітується вміст його в розчиненому та нерозчиненому стані. Ефективні способи боротьби з піноутворенням - використання в робочих рідинах протипінних присадок, а також введення у конструкцію гідропривода спеціальних пристроїв-деаераторів, які сприяють видаленню повітря з робочих рідин.

**Промислова чистота** робочих рідин – одна з найважливіших експлуатаційних властивостей, оскільки від неї у значному ступені залежить надійність роботи елементів гідропривода. По мірі підвищення робочого тиску в гідроприводі вимоги до чистоти робочих рідин неухильно збільшуються. Промислова чистота робочої рідини визначає не тільки надійність гідроприводу, але й за цим показником судять про чистоту всього гідропривода в цілому. В процесі виробництва та експлуатації машин робоча рідина забруднюється. Під забрудненням будемо розуміти сукупність твердих, рідких та газоподібних речовин, які містяться в робочій рідині та негативно впливають на надійність гідропривода [49, 50].

До твердих забруднень відносяться металеві частинки, які залишаються в гідроприводі після усіх видів технологічної обробки деталей, складання вузлів, а також продукти зносу та руйнування конструктивних елементів, продукти корозії, хімічних реакцій та атмосферний пил.

До рідких забруднень відносяться вода, а до газоподібних - повітря та його компонент - кисень, який інтенсифікує окислювальні процеси. Крім того, при експлуатації гідропривода при підвищених температурах в робочих рідинах з'являються мікроорганізми та продукти їх життєдіяльності.

Як показали дослідження, більша частина забруднень має неорганічний характер, а органічна частина складає 15-20% загальної кількості забруднень. В неорганічній частині наявні частинки високої твердості, яка значно перевищує твердість конструкційних металів, що використовуються. Такі частинки викликають інтенсивне зношування сполучених елементів, тобто становлять найбільшу небезпеку з точки зору надійності гідропривода. Основна маса частинок механічних домішок при роботі гідропривода знаходиться у завислому стані та мігрує по гідроприводу разом із робочою рідиною.

Джерела та причини надходження частинок забруднення такі:

потрапляння частинок пилу з атмосфери через фільтр-сапун, ущільнення, різні нещільності;

утворення частинок в результаті корозії, окислення робочої рідини та зносу металів;

заливання робочої рідини у погано очищені ємності, перекачування по забруднених трубопроводах;

використання вже забруднених при зберіганні та транспортуванні робочих рідин, а також випадкових ємностей;

потрапляння в робочі рідини забруднень, які залишилися після виготовлення та ремонту машини (пісок, пил, окалина від зварювання, стружка і т.п.).

Абразивні частинки, які з'являються в результаті цього, як правило, мають дуже велику твердість. Наприклад, твердість діоксиду кремнію складає 10780-11700 МПа, оксиду алюмінію - 20900-22900 МПа. Твердість абразивних частинок зношування – 8000 – 14000 МПа. Це обумовлено тим, що в період акту формування частинок під впливом навантаження здійснюється перекручування кристалевої ґрати частинок, різко підвищується локальна температура, яка обумовлює своєрідну термообробку відділених частинок. Твердість частинок кварцу, який входить, як до діоксиду кремнію, так і до складу піску, складає 7 одиниць за шкалою Мооса (твердість алмазу за тією ж самою шкалою - 10 одиниць). Все це значно більше твердості трибоповерхонь гідроприводів.

Згідно з досвідом експлуатації робочих рідин, забруднення їх стружкою, піском, окалиною (виробничі забруднення) складає близько 3%, пилом, частинками ґрунту та зносу (експлуатаційні забруднення) -10%, операційними домішками, які поступили при заміні, – 37%, а внаслідок доливок рідини – 70-80%.

Для оцінення чистоти робочих рідин гідроприводів розроблено ГОСТ 17216-71. Цей стандарт встановлює 19 класів чистоти робочих рідин. Кожному класу відповідає певне число різних розмірів та склад за масою частинок забруднень в 100 см<sup>3</sup> робочої рідини (табл. 6.5).

Таблиця 6.5

Класи чистоти робочої рідини згідно з ГОСТ 17216-71

Клас чистоти	Число частинок забруднень в об'ємі 100см <sup>3</sup> , не більше, при розмірі частинок, мкм						Маса забруднень, %, не більше
	≥ 5 до 10	> 10 до 25	>25 до 50	> 50 до 100	> 100 до 200	волокна	
00	8	4	1	АВ	АВ	АВ	не норм.
0	16	8	2	“-	“-	“-	“-
1	32	16	3	“-	“-	“-	“-
2	63	32	4	1	“-	“-	“-
3	125	63	8	2	“-	“-	“-
4	250	125	12	3	“-	“-	“-
5	500	250	25	4	1	“-	“-
6	1000	500	50	6	2	1	0,0002
7	2000	1000	100	12	4	2	0,0002
8	4000	2000	200	25	6	3	0,0004
9	8000	4000	400	50	12	4	0,0006
10	16000	8000	800	100	25	5	0,0008
11	31500	16000	1600	200	50	10	0,0016
12	63000	31500	3150	400	100	20	0,0032
13	не норм.	63000	6300	800	200	40	0,005
14	“-	125000	12500	1600	400	80	0,008
15	“-	не норм.	25000	3150	800	160	0,016
16	“-	“-	50000	6300	1600	315	0,032
17	“-	“-	не норм.	12500	3150	630	0,063

Але при визначенні класу чистоти в експлуатаційних умовах число частинок в різних розмірних групах часто відповідає різним класам чистоти, у зв'язку з чим визначення його дуже ускладнено. Тому для 8 - 17 класів чистоти користуються такою формулою для визначення індексу забрудненості Z [39]:

$$Z = 10^{-3} (\delta_{5-10} \cdot 10 + \delta_{10-25} \cdot 25 + \delta_{25-50} \cdot 50 + \delta_{50-100} \cdot 100 + \delta_{100-200} \cdot 200 + \delta_{гол} \cdot 400), \quad (6.2)$$

де  $\delta_{5-10}$ ,  $\delta_{10-25}$ ,  $\delta_{25-50}$  та ін. - число частинок в 100 см<sup>3</sup> робочої рідини в інтервалі розмірів 5-10, 10-25, 25-50 мкм і т. ін., а також волокон.

Клас чистоти робочої рідини за індексом забрудненості визначається за табл. 6.6.

*Примітка: АВ- абсолютна відсутність.*

Таблиця 6.6

Індекси забрудненості та відповідні їм класи чистоти робочих рідин

Z	100	210	420	830	1640	3280	6520	13040	26080	52130
Клас чистоти	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Якщо отриманий індекс забрудненості не збігається з табличним, то його приводять до найближчого у бік збільшення. Наприклад, якщо індекс забрудненості складає 4150, то клас чистоти робочої рідини 14-й.

Забезпечення відповідного рівня чистоти робочої рідини зв'язано із значними матеріальними витратами (підвищення номінальної тонкості фільтрації рідини та невеликий строк служби фільтроелементів у зв'язку зі швидкою його забрудненістю).

Критерії, які визначають необхідний ступінь чистоти робочої рідини, - величина зазора та робочий тиск. Зі



зменшенням величини зазора та збільшенням тиску вимоги до чистоти робочої рідини підвищуються.

На підставі результатів досліджень рекомендуються класи чистоти за ГОСТ 17216-71, наведені у табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Класи чистоти робочої рідини, що рекомендуються

Гідрообладнання	Номінальний тиск, МПа	Клас чистоти, не гірше
Насоси та гідромотори: шестеренні пластинчасті	2,5-6,3	13-14
	більше 6,3	12
Насоси та гідромотори аксіально-поршневі з розподілом: торцевим клапанним	до 20,0	11
	більше 20,0	11
	до 20,0	14
	більше 20,0	13
Насоси та гідромотори радіально-поршневі	до 20,0	12-14
	більше 20,0	11-13
Гідроапаратура	до 32,0	12
Гідророзподільники	до 32,0	11

За кордоном для контролю чистоти робочої рідини та вибору обґрунтованих норм цього показника також розроблені та впроваджені відповідні класи чистоти. В теперішній час прийняті в основному п'ять систем класифікації за чистотою рідин: ISO 4406-міжнародна організація по стандартизації або SETOP R P 70H, NAS1638, SAE, MILS ТД 126А.

Розглянемо деякі з них. NAS1638 передбачає 14 класів чистоти. При цьому число частинок даного розміру в кожному наступному класі, як правило, подвоюється (табл. 6.8).

Табл. 6.8

За системою SAE установлюється сім класів чистоти робочої рідини із розміром частинок 5-100 мкм. У зв'язку з відносно невеликою кількістю класів чистоти рідин дана система майже не використовується.

Наведені системи класифікації робочих рідин за чистотою зіставлені в табл. 6.9.

#### 6.4. Старіння робочих рідин

При експлуатації гідроприводів робочі рідини, як і моторні оливи, піддаються старінню, на що впливають багато факторів: режими та умови роботи гідропривода, якість робочої рідини в початковому стані, види та періодичність технічного обслуговування, стан ущільнювальних вузлів і т.п. Тому впливає необхідність контролювати якість робочої рідини в процесі експлуатації гідроприводів. Якість визначається сукупністю експлуатаційних властивостей, що нормуються відповідними технічними умовами.

Розглянемо змінення, які мають місце при використанні робочої рідини в гідроприводах.

**Кінематична в'язкість.** Як відомо, на в'язкість впливають температура та тиск. З підвищенням температури в'язкість знижується, що приводить до негативних явищ в роботі гідроприводів – збільшення витоків та порушення гідродинамічного режиму змащування.

Тиск в зонах тертя також впливає на в'язкість робочих рідин. При незначних тисках в тонких плівках в'язкість залишається сталою, але при підвищенні тиску вона збільшується у відповідності до рівняння 5.7.

В'язкість робочої рідини може зменшуватися за рахунок того, що в ній завжди наявна вода, але й може збільшуватися у зв'язку з тиском. За рахунок останнього, а головним чином, у зв'язку із значними перепадами тиску, розриваються міжмолекулярні зв'язки вуглеводнів, що приводить з часом до повної витрати робочою рідиною в'язкості.

Таблиця 6.9

Зіставлення існуючих за кордоном систем класифікації чистоти робочих рідин

ISO 4406/СЕТО P R P 70H	Частинки забруднень 10 мкм в 1мл 10 мкм	MILS ТД 1246 А	NAS1638	SAE
26/23	140000			
22/23	85000	1000	-	-
23/20	14000	700	-	-
21/18	4500	-	12	-
20/18	2400	80	-	-
20/17	2300	-	11	-
20/16	1400	-	-	-
19/16	1200	-	10	-
18/15	580	-	9	6
17/14	280	300	8	5
16/13	140	-	7	4
15/12	70	-	6	3
14/12	40	200	-	-
14/11	35	-	5	2
13/10	14	-	4	1
12/9	9	-	3	0
12/8	5	-	2	-
10/8	3	100	-	-
10/7	2,3	-	1	-
10/6	1,4	-	-	-
9/6	1,2	-	0	0
8/5	0,6	-	00	-
7/5	0,3	50	-	-
6/3	0,14	-	-	-
5/2	0,04	25	-	-
2/8	0,01	10	-	-

**Вміст механічних домішок.** Проблема чистоти робочих рідин виникла у зв'язку з необхідністю підвищення робочого тиску та надійності гідропривода. Багатьма дослідженнями встановлено, що на частку гідропривода приходить 30-70% відмовлень в роботі будівельних, колійних та перевантажувальних машин. Головна причина – забрудненість робочих рідин, яка приводить до таких негативних явищ:

абразивне зношення трибоповерхонь;  
засмічення фільтрів та зарощування малих щілин в елементах керування, що приводить до нестабільної роботи гідропривода;  
підвищення зусиль зрушення та заклинювання золотників розподільників.

На надійність роботи гідроприводів, в першу чергу, впливає гранулометричний склад забруднень. Розподіл частинок за розмірами в робочих рідинах гідроприводів підлягає логарифмічно нормальному закону [42] (рис. 6.1).

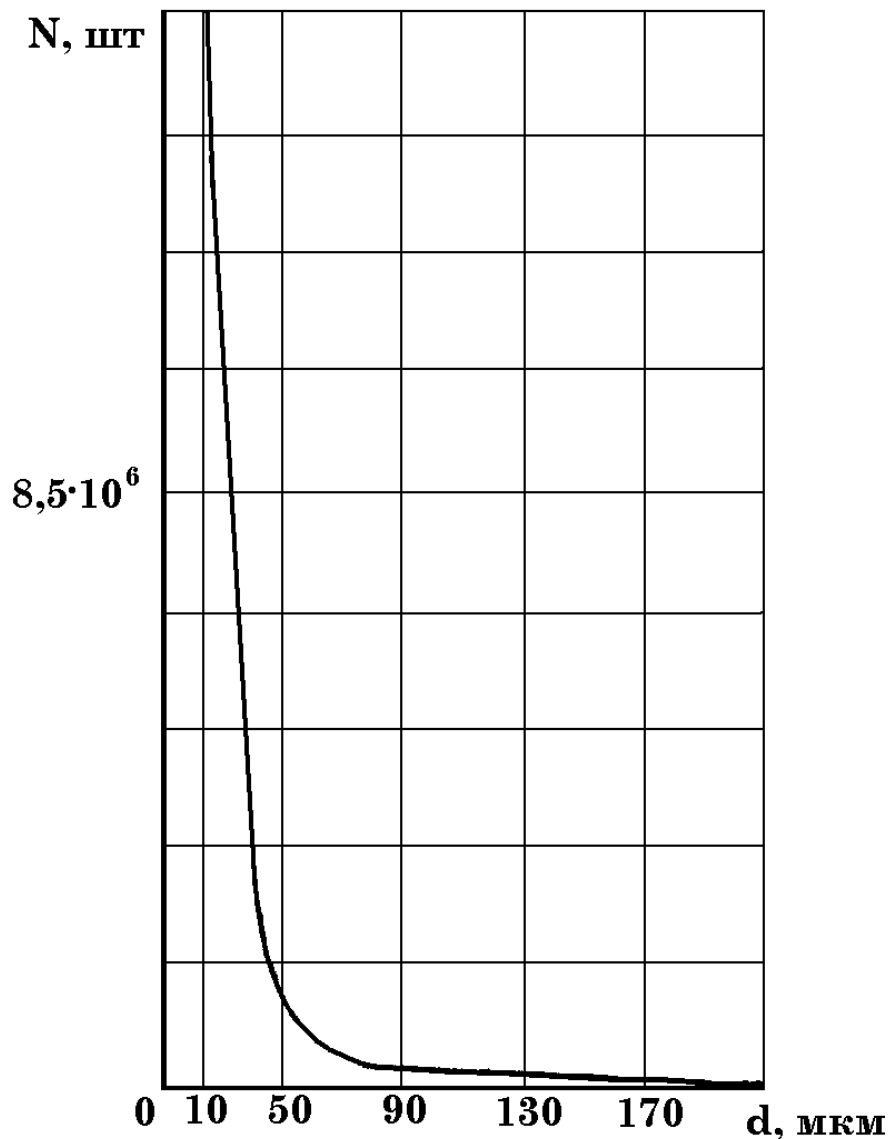


Рис. 6.1. Графік розподілення частинок забруднень за розмірами

Найбільш небезпечні частинки - ті, розмір яких складає більше 5 мкм. Менші за розміром частинки заходять в зазор та викликають позитивні з точки зору зменшення зносу явища, які докладно описані в підрозділі 15.1.

**Вміст води.** Наявність води при експлуатації гідропривода сприяє утворенню стійких емульсій. При зміні температури та робочого тиску вода, що емульгована в робочій рідині, здатна частково перейти у розчинений стан.

Поява мікрокрапель води в змащувальних плівках внаслідок їх випаровування приводить до розривів оливої плівки на трибоповерхнях та сприяє збільшенню в 1,5-2,0 рази зносу.

### **6.5. Бракування робочих рідин за фізико-хімічними властивостями та за електропровідністю тонких плівок. Строки служби робочих рідин**

Процеси старіння робочих рідин приводять до того, що з часом вони повністю втрачають свої експлуатаційні властивості, у зв'язку з чим підлягають заміні. Строки служби робочих рідин в гідроприводах зазначені у відповідних керівництвах по експлуатації машин, але ці строки слід розглядати як орієнтовні, бо вони не враховують умови експлуатації конкретної машини, манери керування ними, ступінь складності робіт, що виконуються, і т.п. Тому робочі рідини, враховуючи їх високу вартість, необхідно змінювати не за керівництвами по експлуатації, а за їх фактичним станом, тобто тоді, коли хоча б один з бракувальних показників фізико-хімічних властивостей робочої рідини досягає граничного значення, величина яких для окремих рідин наведена в табл. 6.10.

Таблиця 6.10

## Граничні значення бракувальних показників робочих рідин

Показник	МГ-15-В	МГ-46-В	МГ-22-А	И-Г-А-46
Кінематична в'язкість при 40°C, мм <sup>2</sup> /с, не менше	12	35	18	35
Вміст механічних домішок, % не більше	0,008	0,008	0,008	0,008
Клас чистоти за ГОСТ 17216-71, не гірше	14	14	14	14
Вміст води%, не більше	0,5	0,5	0,3	0,2
Кислотне число, мгКОН/г, не більше	0,55	1,55	0,25	0,25

Наведені в цій таблиці граничні значення бракувальних показників не стандартизовані. Крім того, при визначенні можливості подальшого використання в гідроприводі робочої рідини або необхідності її заміни потрібно здійснювати постійний контроль якості рідини шляхом фізико-хімічного аналізу. Такий контроль викликає багато труднощів, що вже відмічалось вище стосовно моторних олив. Тому за аналогією з моторними олівами можна визначити електропровідність робочої рідини та за цим показником робити висновок про її якість та можливість подальшої експлуатації. Вимірювання електропровідності детально описано в підрозділі 5.6, а бракувальні значення цього показника визначаються індивідуально для кожного типу гідроприводів (наприклад, для індустріальної оливи И-Г-А-32 бракувальне значення електропровідності складає  $3,48 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ).

## 7. ТРАНСМІСІЙНІ ОЛИВИ

### 7.1. Умови роботи трансмісійних олиव та вимоги, що пред'являються до них

Трансмісійні оливи використовують в коробках передач, ведучих мостах, роздавальних коробках, бортових передачах, тобто там, де є зубчаті передачі.

Основне призначення трансмісійних передач – зниження зношування трибоповерхонь, які контактують по лінії, тобто працюють в жорстких умовах великого навантаження. Крім цього, трансмісійні оливи повинні зменшувати витрати енергії на подолання тертя, відведення теплоти від деталей та запобігати корозії. Вони повинні також знижувати вплив динамічних навантажень, зменшувати шум та вібрацію зубчатих передач та ущільнювати зазори в сальниках.

Трансмісійні оливи працюють у специфічних умовах. Трибоповерхні зубчатих передач, як визначалося вище, зазнають впливу значних динамічних навантажень (1500 – 2000 МПа, гіпоїдних – більш 2500 МПа). Швидкість ковзання складає 2,5 – 3,0 м/с, робоча температура відносно невелика та складає 80 – 100<sup>0</sup>С, але в місцях безпосереднього контакту зубців внаслідок короткочасного місцевого нагріву температура досягає 250<sup>0</sup>С. При цьому можливе не тільки інтенсивне окислення оливи, але й термічне руйнування її вуглеців. Високі контактні навантаження приводять часто до того, що при запуску машини та сталій температурі має місце тільки граничне змащування. При цьому під впливом високих контактних навантажень гранична плівка видавлюється, внаслідок чого оголюються поверхні зубців, що може викликати задирання та викришення. Для забезпечення швидкого запуску машини взимку необхідні невеликі в'язкість та температура застигання. В той же час при сталому режимі в'язкість повинна бути достатньою для запобігання або зменшення зносу при великих контактних навантаженнях.



До трансмісійних олив висуваються загальні експлуатаційні вимоги, тобто необхідно, щоб оливи мали достатньо високі протизношувальні та особливо протизадирні властивості, мали добрі в'язкісно-температурні характеристики, а також потрібну температуру застигання. Крім того, вони повинні в мінімальному ступені змінювати свої властивості під впливом температури, бути стабільними в часі, не мати у своєму складі абразивних частинок домішок, води та корозійно-агресивних з'єднань, а також не руйнувати гумові ущільнення.

З усіх вимог, що наведені вище, найважливіше значення мають протизадирні та протизношувальні властивості, для покращення яких вводять до трансмісійних олив відповідні присадки.

Протизадирні та протизношувальні властивості цих олив оцінюють на чотирикульковій машині, на якій є можливість отримати високі контактні навантаження, які близькі до реальних у трансмісіях.

Для забезпечення надійної роботи зубчатих передач необхідно, щоб нижча припустима межа в'язкості оливи складала  $5 \text{ мм}^2/\text{с}$ , а максимальне припустиме значення в'язкості визначається за умовами забезпечення вільного дотику машини без застосування засобів підігріву.

## **7.2. Класифікація та номенклатура трансмісійних олив та їх строки служби**

Трансмісійні оливи позначаються групою знаків, перша з яких "ТМ" (трансмісійна олива), друга – цифри, що визначають приналежність до групи за експлуатаційними властивостями, третя – клас кінематичної в'язкості при  $100^{\circ}\text{C}$ . Групи олив за експлуатаційними властивостями та класи в'язкості наведені в табл. 7.1 та 7.2.

Для різних кліматичних умов промисловість випускає всесезонні, північні та арктичні оливи. Для трансмісій БКВРМ використовують, в основному, оливи класу в'язкості 18 всесезонно, а також 9 та 12 класи у районах Крайньої Півночі.

Таблиця 7.1

## Групи олив за експлуатаційними властивостями

Група	Склад оливи	Галузь використання, що рекомендується
1	Без присадок	Циліндричні, конічні та черв'ячні передачі при контактних навантаженнях до 1600 Мпа та температурі до 90 <sup>0</sup> С
2	З протизношуваною присадкою	Там же при контактних навантаженнях до 2100 МПа та температурі до 130 <sup>0</sup> С
3	З протизадирними присадками помірної ефективності	Циліндричні, конічні та спірально-конічні передачі, що працюють при контактних навантаженнях до 2500 МПа та температурі до 150 <sup>0</sup> С
4	З протизадирними присадками високої ефективності	Циліндричні, конічні, спірально-конічні, гіпоїдні передачі, що працюють при контактних навантаженнях до 3000 МПа та температурі оливи до 150 <sup>0</sup> С
5	З протизадирними присадками високої ефективності та багатофункціональної дії	Гіпоїдні передачі, що працюють з ударними навантаженнями більш 3000 МПа та температурі до 150 <sup>0</sup> С

Таблиця 7.2

## Групи в'язкості трансмісійних олив

Клас в'язкості	Кінематична в'язкість при 1000С, мм <sup>2</sup> /с	Температура, <sup>0</sup> С, при якій динамічна в'язкість не перевищує 150 Пає
9	6,0 – 10,99	-45
12	11,0 – 13,99	-35
18	14,0 – 24,99	-18
34	25,0 – 41,0	-

Номенклатура трансмісійних олив, що використовуються в теперішній час, та їх властивості наведені в табл. 7.3 [41].

Таблиця 7.3

Основні марки та властивості трансмісійних олив  
за ГОСТ 23652-79

Показник	ТМ-3-9 (ТСП-10)	ТМ-2-18 (ТЕП-15)	ТМ-3-18 (ТАП-15В)	ТМ-4-18 (ТСП-14гип)	ТМ-5-18 (ТАД-17и)
В'язкість: кінематична, мм <sup>2</sup> /с, при 100 <sup>0</sup> С динамічна, Па·с, при -15 (-20) <sup>0</sup> С, не більше	10,0  300(-35 <sup>0</sup> С)	15,0±1  200	15,0±1  180	≥14,0  (75)	≥17,5  -
Індекс в'язкості, не менше	90	-	-	85	100
Температура, <sup>0</sup> С: спалаху у відкрит. тиглі, не менше застигання, не більше	128  -40	185  -18	185  -20	215  -25	200  -25
Масова частка, %: механічних домішок не більше води	0,02 сліди	0,03 сліди	0,03 сліди	0,01 відсут.	відсут. відсут.
Випробування на корозію пластинок на протязі 3 год із сталі та міді при 100 <sup>0</sup> С	витрим.	витрим.	витрим.	витрим.	витрим.
Змащувальні Влас- тивості на ЧКМ: індекс задирки, Н, не менше	470	-	490	588	568
навантаження зва- рювання, Н, не менше	3479	-	3283	3920	3687
показник зносу при 392 Н, 1 год, мм, не більше	-	0,55	-	-	0,4
Зольність, %	-	≥0,3	-	-	≤0,3
Кислотне число, мгКОН/г, не більше	-	-	-	-	2,0
Щільність при 20 <sup>0</sup> С, кг/дм <sup>3</sup> , не більше	-	950	930	910	907

Примітка: у дужках наведено старі позначення олив.

Для БКВРМ в умовах середньої смуги можна в якості всесезонної використовувати оливу ТМ-2-18, яка містить у собі 5% протизношувальної присадки ЕФО та 1% депресора, який знижує температуру застигання оливи. Але все ж таки відносно висока температура застигання декілька обмежує її використання взимку.

Можна також використовувати оливу ТМ-3-18, яка за в'язкісними характеристиками мало відрізняється від ТМ-2-18, але має кращі протизадирні властивості за рахунок наявності в ній відповідної присадки ОТП або ЛЗ-23К.

Для полегшення роботи машин в умовах низької температури випускається олива ТМ-3-9 з протизадірною присадкою ОТП. Використання цієї оливи забезпечує запуск агрегатів трансмісії при температурі до  $-35^{\circ}\text{C}$ , що в умовах експлуатації України, в основному, загалом достатньо.

Крім цих основних марок, виробляють ще оливу ТМ-2-34, яка містить осірковану рослинну оливу та призначена для коробок передач і рульових механізмів.

Експлуатація гіпоїдних передачах забезпечується оливою ТМ-4-18, яка в своєму складі має ефективні протизадирну, мийну та протипінну присадки.

Універсальна олива ТМ-5-18 призначена для всіх агрегатів трансмісії. Вона має в своєму складі поліметакрилат Д, який знижує температуру застигання, а також комплексну присадку, що забезпечує високі протизадирні, протизношувальні, протикорозійні та протиокислювальні властивості. Олива придатна для всесезонної роботи гіпоїдних, спіральних-конічних, конічних та черв'ячних передач.

Строки служби трансмісійних олив визначаються, як правило, в відповідних керівництвах на експлуатацію машин, але вказані строки не враховують умови та особливості експлуатації машин, тому ці строки слід вважати орієнтовними (як і у випадках з моторними оливами та робочими рідинами). Краще було б замінювати трансмісійні оливи за їх фактичним станом, але на жаль до теперішнього часу немає ніяких відомостей щодо граничних значень їх бракувальних показників якості, тому доцільно все ж таки міняти оливи згідно з керівництвом по експлуатації.

## 8. КОМПРЕСОРНІ ТА ТРАНСФОРМАТОРНІ ОЛИВИ

Компресорні оливи широко використовують для змащування поршневих та ротаційних компресорів, в яких олива знаходиться в прямому контакті зі стиснутим газом, який має високу температуру. Склад та властивості газу в значній мірі визначають вимоги до оливи та її працездатність.

В поршневих компресорах оливи використовують для змащування циліндрів та клапанів, а також в якості середовища, що ущільнює та герметизує камери стиску.

Температура повітря після кожного ступеня стиску повітряних компресорів не перевищує  $170^{\circ}\text{C}$  для загальнопромислових компресорів і вище  $180^{\circ}\text{C}$  для компресорів машин та для технологічного призначення. В таких умовах головними експлуатаційними властивостями олив, що забезпечують ефективну та безпечну роботу компресорів, є їх термоокислювальна стабільність та здатність запобігати або зводити до мінімуму утворення коксових оливних відкладень в нагнітальних мережах компресорів. Головною причиною пожеж, що виникають у змащувальних оливами компресорах, є утворення твердих продуктів розпаду та ущільнення оливи при її експлуатації. Вимоги до термічної стабільності компресорних олив підвищуються в залежності від температури нагнітання компресора.

Стосовно до компресорних машин в'язкість є однією з основних характеристик оливи. Від в'язкості залежать витрати енергії на тертя і знос поверхонь деталей, ущільнення поршневих кілець, час запуску компресора та температура трибоповерхонь.

Утворення відкладень коксу залежить від термічної стабільності оливи та її в'язкості. Олива більш низької в'язкості швидше переміщується по нагнітальному тракту компресора та утворює менше відкладень в системі нагнітання. У відповідності до правил техніки безпеки експлуатації стаціонарних повітряних компресорів (стандарт ISO 5388) для компресорів, що змащуються оливами, відкладення коксу повинні своєчасно видалятися. Частість перевірок та строки очищення залежать від якості оливи, але при цьому товщина шару відкладень не повинна перевищувати 3 мм при ефективному тиску менш 1 МПа та 1 мм при тиску 3 – 5 МПа. Слід мати на увазі, що існуюча думка про

зв'язок температури спалахування оливи з її небезпечною експлуатацією неправильна. Висока температура спалахування не гарантує більшої безпеки її використання у порівнянні з оливою, яка має меншу температуру спалахування. Для поршневих компресорів більш важлива температура самозаймання компресорних олив, яка для дистилатних олив з низькою температурою спалахування вище, ніж для залишкових високов'язких олив.

Класифікація компресорних олив поділяє їх на три групи:

перша - для компресорів, що працюють на помірних режимах, які стискають повітря та інші нерозчинені в оливі газу при температурі нижче  $160^{\circ}\text{C}$ ;

друга – те ж саме, але при температурі нагнітання нижче  $180^{\circ}\text{C}$ ;

третья – для компресорів, які працюють у важких умовах при температурі нагнітання нижче  $200^{\circ}\text{C}$ ;

четверта – для компресорів високого тиску, які працюють в особливо важких умовах при температурі нагнітання вище  $200^{\circ}\text{C}$ .

У відповідності до існуючої класифікації компресорні оливи маркують наступним чином. Буква “К” визначає приналежність до компресорних олив. Після цього вказується цифра, яка визначає номер групи (за виключенням першої групи). Потім після дефіса йде цифра, яка відповідає кінематичній в'язкості оливи при  $100^{\circ}\text{C}$ .

Приклад позначення такої: олива К-12 – компресорна, яка відноситься до першої групи класифікації, з в'язкістю  $12 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $100^{\circ}\text{C}$ . К4-20 – це олива компресорна, яка відноситься до четвертої групи та має в'язкість  $20 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $100^{\circ}\text{C}$ .

Трансформаторні оливи використовують для заливання силових та вимірювальних трансформаторів, а також оливних вимикачів. В останніх оливи виконують функцію дугогасильного середовища.

Електроізоляційні властивості оливи визначаються тангенсом кута діелектричних витрат. Діелектрична міцність трансформаторних олив визначається, в основному, наявністю в ній волокон та води, тому механічні домішки та вода в

трансформаторній оливі повинні бути повністю відсутніми. Низька температура застигання цих олив ( $-45^{\circ}\text{C}$  та нижче) необхідна для збереження рухомості в умовах низьких температур. Для забезпечення ефективного відведення тепла трансформаторні оливи повинні мати якнайменшу в'язкість при температурі спалахування не нижче 95, 125, 135 та  $150^{\circ}\text{C}$  для різних марок.

Найбільш важлива властивість трансформаторних олив – це стабільність проти окислення, тобто здатність оливи зберігати свої параметри при довгій роботі. У зв'язку з тим усі сорти трансформаторних олив інгібовані антиокислювальною присадкою, ефективність якої заснована на її здатності взаємодіяти з активними пероксидними радикалами, які створюються при ланцюговій реакції окислення вуглеців та є головними її носіями.

Міжнародна електротехнічна комісія розробила стандарт “Специфікація на свіжі нафтові ізоляційні оливи для трансформаторів та вимикачів”. Цей стандарт передбачає три класи трансформаторних олив: I – для південних районів (температура застигання олив – не вище  $-30^{\circ}\text{C}$ ), II – для північних районів (температура застигання – не вище  $-45^{\circ}\text{C}$ ) та III – для арктичних районів (температура застигання олив – не вище  $-60^{\circ}\text{C}$ ). Буква “А” в позначенні класу вказує на те, що олива має інгібітор окислення, а відсутність цієї букви, означає, що олива не інгібована.

Трансформаторні оливи працюють у порівняно м'яких умовах. Температура верхніх шарів оливи у трансформаторах при короткочасних перенавантаженнях не повинна перевищувати  $95^{\circ}\text{C}$ . Багато трансформаторів обладнані плівковими діафрагмами або азотним захистом, що дозволяє ізолювати оливу від кисню повітря. При видаленні продуктів окислення строк служби оливи збільшується у багато разів. Для цього призначені спеціальні заповнені силіконом адсорбери, які підключаються до трансформаторів при експлуатації. Строк служби трансформаторних олив в значній мірі залежить також від використання в обладнанні матеріалів, які сумісні з оливою, тобто не прискорюють її старіння. Для високоякісних трансформаторних олив строк служби може бути 20-25 років та більше.

Номенклатура компресорних та трансформаторних олив, а також їх властивості, наведені в табл. 8.1 та 8.2 [41].

Таблиця 8.1

Номенклатура компресорних олив та їх властивості

Показник	К-12 за ГОСТ 1861- 73	К-19 за ГОСТ 1861-73	КС-19 за ГОСТ 9243-75	К-28 за ОСТ 38 012282-82
Кінематична в'язкість при 100 <sup>0</sup> С, мм <sup>2</sup> /с	11-14	17-21	18-22	25-31
Кислотне число, мгКОН/г, не більше	0,15	0,1	0,02	-
Температура, <sup>0</sup> С: спалахування у відкритому тиглі застигання	216 -25	242 -5	270 -15	275 -10

Таблиця 8.2

Номенклатура трансформаторних олив та їх властивості

Показник	ТКп за ТУ38 101890-81	Т-1500У за ТУ38 401-58-107-97	ГК за ТУ38 1011025-85
Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при: 50 <sup>0</sup> С -30 <sup>0</sup> С	9 1500	- 1300	9 1200
Кислотне число, мгКОН/г, не більше	0,02	0,01	0,01
Температура, <sup>0</sup> С: спалахування у закритому тиглі, не менше застигання, не більше	135 -45	135 -45	135 -45
Вміст, %, водорозч. кислот та лугів механічних домішок	відсут. відсут.	- -	- -
Тангенс кута діелектричних витрат при 90 <sup>0</sup> С, %, не більше	2,2	0,5	0,5
Щільність при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup> , не більше	895	885	895



## 9. ПЛАСТИЧНІ МАСТИЛА

### 9.1. Вимоги, що пред'являються до пластичних мастил

Поряд з рідкими оливами та робочими рідинами при експлуатації БКВРМ широко використовують мазеподібні змащувальні матеріали, які називаються пластичними (консистентними) мастилами. Головна їх особливість полягає в тому, що вони сполучають у собі механічні властивості твердих та рідких тіл. Під впливом невеликих зовнішніх зусиль (наприклад, власної ваги) вони поведуть себе аналогічно твердим тілам. Якщо навантаження, що прикладене до них, перевищує певне критичне значення, то ці мастила набувають здатності необмежено та необоротно деформуватися, тобто вони стають схожими з рідинами. На підставі цих ознак можна зробити висновок, що такі мастила являють собою різновид пластичних матеріалів і тому називаються пластичними.

Пластичні мастила використовують у відкритих негерметизованих та важкодоступних трибовузлах, де потрібно забезпечити зносостійкість та тривалий строк служби мастила, а також для консервації машин та робочих поверхонь, для герметизації рухомих ущільнень, у герметизованих підшипниках ковзання та в механізмах, коли через умови роботи не припускається розбризкування оливи.

Пластичні мастила повинні відповідати таким вимогам:

мати високу межу міцності, щоб добре утримуватися на вертикальних та похилих площинах, деталях, що рухаються, та в важкодоступних трибовузлах;

володіти відповідною пенетрацією, тобто густотою, яка забезпечує надійне змащування трибовузла без витікання;

мати необхідну температуру краплепадіння та зберігати її в визначеному інтервалі теплової навантаженості вузла;

характеризуватися відповідною в'язкістю та високою стійкістю до випарування;

мати достатню колоїдну та хімічну стабільність, не розшаровуватися та не окислюватися в процесі роботи та зберігання;

володіти достатніми протикорозійними, протизносними та протизадирними властивостями.

## 9.2. Класифікація та номенклатура пластичних мастил

Пластичні мастила поділені на три групи: антифрикційні, консерваційні та ущільнювальні. Найбільш велика група мастил – антифрикційна, яка призначена для зниження зносу та тертя ковзання трибовузлів. Такі мастила поділяються на підгрупи, які позначаються індексами: С - загального призначення для звичайних температур (до 70<sup>0</sup>С) – солідоли; О – для підвищеної температури (до 110<sup>0</sup>С); М – багатоцільові, які працюють при температурах від –30 до 130<sup>0</sup>С в умовах підвищеної вологості; Ж – термостійкі (150<sup>0</sup>С та вище); Н – морозостійкі (нижче –40<sup>0</sup>С); И – протизадирні та протизносні (підшипники кочення при контактних навантаженнях вище 2500 МПа, підшипники ковзання – вище 150 МПа); П – приладні; Д – припрацюванні (містять в собі дисульфід молібдену); Х – хімічно стійкі (для трибовузлів, які мають контакт з агресивним середовищем).

Крім призначення та галузі використання, в класифікаційному позначенні пластичних мастил вказують тип згущувача, температурний діапазон, при якому рекомендується використання, дисперсне середовище та консистенція (густота). Згущувач позначають першими двома буквами назви металу, якій входить до складу мила: Ка – кальцієвий, На – натрієвий, Ли – літієвий, Ли-Ка – змішаний, тобто літієво-кальцієвий.

Температурний діапазон, що рекомендується, вказують дрібним числом: у чисельнику – зменшена у 10 разів без знаку “-” мінімальна температура, в знаменнику – також зменшена у 10 разів максимальна температура. Температурний діапазон має орієнтовне значення, тому що він залежить від конструкції трибовузла та умов експлуатації.

Тип дисперсного середовища та наявність твердих добавок позначають малими буквами: у – синтетичний вуглеводень, к – кремнійорганічні рідини, г – графіт, д – дисульфід молібдену. Консистенцію мастила позначають умовним числом від 0 до 7.

Наприклад, класифікаційне позначення літєвого мастила “Літол -24” таке: МЛи4/13-3. Це означає, що мастило багатоцільове (М), антифрикційне, працездатне в умовах підвищеної вологості, загущене літєвим милом (Ли), може бути використаним в інтервалі температур від  $-40$  до  $+130^{\circ}\text{C}$  (4/13). Відсутність індексу дисперсійного середовища позначає, що мастило виготовлено на нафтовій оліві. Цифра 3 умовно характеризує консистенцію мастила.

Серед пластичних мастил найбільш розповсюджені солідоли, які відрізняються один від одного складом згущувача, тобто температурним діапазоном працездатності. Аналогічні властивості у мастила 1-13, але у нього при покращеній термостійкості гірше вологостійкість.

“Літол -24” є високоякісним мастилом, яке рекомендовано для використання із збільшеним у 2 – 4 рази строком служби.

Основні зовнішні ознаки пластичних мастил – колір, запах та однорідність.

Враховуючи, що всі пластичні мастила непрозорі, їх колір фіксують тільки в відбитому світлі. Колір мастила залежить від його складу та від забарвлення компонентів, що входять до його складу. Більшість мастил зберігають колір олив та згущувачів, що містяться у них. Таким чином, чим світліше мастило, тим більш глибокої очистки олива використана для його виготовлення. Широко розповсюджені солідоли мають, як правило, колір від світло-жовтого до темно-коричневого. Наявність графіту (наприклад, мастило УСсАс) надає мастилу чорного кольору.

Жирові мастила універсального призначення, наприклад, солідоли, серії УС, можуть мати запах господарського мила. Усі синтетичні мастила (типу солідол С) мають своєрідний декілька ароматний запах.

Мастила, які містять субмікроскопічної величини дисперсні частинки, зовнішньо виглядають гладкими та блискучими.

Номенклатура та показники якості пластичних мастил, що найбільш розповсюджені в техніці, наведені в табл. 9.1 - 9.6 [41].

Таблиця 9.1

## Номенклатура та показники якості антифрикційних мастил

Найменування мастила	Температура краплепадіння, °С	Пенетрація при 25°С, $\times 10^{-1}$ мм	Межа міцності при 20°С, Па	В'язкість при 0°С та $10\text{с}^{-1}$ , Па·с, не більше	Колоїдна стабільність, %, не більше
Солідол Ж за ГОСТ 1033-79	75-87	230-290	300-600	250	13
Прес-солідол Ж за ГОСТ 1033-79	$\geq 75$	330-355	-	100	13
Графітна за ГОСТ 3333-80	77-85	250-280	300700	100	5

Таблиця 9.2

## Номенклатура та показники якості мастил загального призначення для підвищених температур

Найменування мастила	Температура краплепадіння, °С	Пенетрація при 25°С, $\times 10^{-1}$ мм	Межа міцності при 20°С, Па	В'язкість при 0°С та $10\text{с}^{-1}$ , Па·с, не більше	Колоїдна стабільність, %, не більше
1-13 за ТУ 38 5901257-90	$\geq 120$	180-25	500-1000	500	20
Консталін за ГОСТ 1957-73	$\geq 130$	225-275	150-300	500	20

Таблиця 9.3

## Номенклатура та показники якості багатоцільових мастил

Найменування мастила	Температура краплепадиння, °С	Пенетрація при 25°С, $\times 10^{-1}$ мм	Межа міцності при 20°С, Па	В'язкість при 0°С та $10\text{с}^{-1}$ , Па·с, не більше	Колоїдна стабільність, %, не більше
Літол 24 за ГОСТ 21150-87	$\geq 185$	220-250	500-1000	280	12
Фіол-1 за ТУ38УССР 201247-80	$\geq 185$	310-340	$\geq 250$	200	25
Фіол-2 за ТУ38УССР 201188-79	$\geq 180$	265-295	$\geq 300$	250	16
ЛКМтранс-2 за ТУ У0149943.4 45-96	$\geq 210$	250-290	$\geq 500$	280	10

Таблиця 9.4

## Номенклатура та показники якості низькотемпературних мастил

Найменування мастила	Температура краплепадиння, °С	Пенетрація при 25°С, $\times 10^{-1}$ мм	Межа міцності при 20°С, Па	В'язкість при 0°С та $10\text{с}^{-1}$ , Па·с, не більше	Колоїдна стабільність, %, не більше
ЦИАТИМ-203 за ГОСТ 8773-73	$\geq 160$	250-300	350-700	1000 (-30°С)	10
ГОИ-54п за ГОСТ 3276-89	$\geq 60$	200-245	200-600	1200 (-40°С)	15
Лита ТУ38.10180 8-90	$\geq 170$	240-265	550-750	1000 (-30°С)	20

Таблиця 9.5

## Номенклатура та показники якості напіврідких мастил

Найменування мастила	Температура краплепадіння, °С	Пенетрація при 25 <sup>0</sup> С, x10 <sup>-1</sup> мм	Межа міцності при 20 <sup>0</sup> С, Па	В'язкість при 0 <sup>0</sup> С та 10с <sup>-1</sup> , Па·с, не більше	Колоїдна стабільність,%, не більше
ЦИАТИМ-208 за ГОСТ 16422-84	-	300-360	-	18000 (-30 <sup>0</sup> С)	-
СТП-Л за ТУ38УССР 201232-81	-	≥25 (0 <sup>0</sup> С)	-	-	-
Трансол-100 за ТУ38УССР 201352-84	≥150	400-430	-	1200 (30 <sup>0</sup> С)	30
Трансол-200 за ТУ38УССР 201352-84	≥150	400-430	-	1400 (-30 <sup>0</sup> С)	30
Редуктол ТУ38.59014 49-95	-	400-450	-	1500	-
Редуктол М за ТУ У00149943. 511-95	-	400-450	-	1500	-

Таблиця 9.6

## Номенклатура та показники якості автомобільних мастил

Найменування мастила	Температура краплепадіння, °С	Пенетрація при 25 <sup>0</sup> С, x10 <sup>-1</sup> мм	Межа міцності при 20 <sup>0</sup> С, Па	В'язкість при 0 <sup>0</sup> С та 10с <sup>-1</sup> , Па·с, не більше	Колоїдна стабільність, %, не більше
ШРБ-4 за ТУ38УССР20 1143-77	≥230	265-295	≥200	80	10
ШРУС-4 за ТУ38УССР 201312-81	≥190	250-280	300-700	250	16
ЛЗ-31 за ТУ8.1011144-80	≥188	220-250	500-620	280	12

### 9.3. Основні властивості пластичних мастил

**Число penetрації** характеризує густоту мастила. Воно визначається глибиною занурення в мастило стандартного конуса під впливом його власної маси (150 г) на протязі 5 с. За глибиною занурення, яка виражена в частках міліметра, оцінюється консистентність мастила, тобто його penetрація. Наприклад, якщо конус опустився в мастило на 25 мм, то його число penetрації складає 250.

Чим вище penetрація, тим менше густина мастила.

**Межа міцності** пластичного мастила – це максимальне напруження на кривій, яка виражає залежність напруження зсуву від деформації. За значенням межа міцності являє собою мінімальне напруження зсуву, при якому починається витікання мастила у зв'язку з руйнуванням каркасу, що створений згущувачем.

Межею міцності визначається можливість скидання мастил з деталей, що обертаються, та здатність їх утримуватися у трибовузлах.

**Ефективна в'язкість** – це показник, який дозволяє оцінювати прокачуваність мастила по шлангах та мастилопроводах до трибовузлів, пускові властивості механізмів, що покриті мастилом, та ін.

Ефективна в'язкість визначається за допомогою автоматичного капілярного віскозиметра або пластовіскозиметра. Визначення засновано на вимірюванні швидкості, з якою мастило під впливом зусилля, яке створює пружина, продавлюється через капіляр або опір, який чинить мастило, обертання коаксіальних циліндрів з маленьким зазором. Ефективна в'язкість залежить від швидкості зсуву, тому одночасно з її значенням вказують температуру та швидкість зсуву, при яких проводилося визначення.

**Температура краплепадіння.** Пластичне мастило в умовах зберігання та використання повинно являти собою пластичний матеріал. Одна з причин перетворення його в рідкий стан – надмірно сильне нагрівання. Тому найважливішим показником якості будь-якого консистентного мастила є та температура, при

якій під впливом теплового руху досягається настільки великий ступінь руйнування кришталевого каркасу, що мастило стає текучим. Перехід з пластичного стану в рідкий умовно виражають температурою краплепадіння, тобто температурою, при якій зі стандартного приладу в процесі нагрівання падає перша крапля мастила.

Щоб не виникла небезпека витікання мастила з трибовузла, його треба використовувати при температурах більш низьких, ніж температура краплепадіння.

## **10. ПАЛИВА ДЛЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

### **10.1. Вимоги, що пред'являються до палив**

За визначенням Д.І.Менделєєва, паливом називається горюча речовина, яке спалюється для отримання тепла.

За агрегатним станом усі види палива можуть підрозділятися на рідкі, газоподібні та тверді, а за походженням – на природні та штучні.

Двигуни БКВРМ – одні з найбільш крупних споживачів рідких палив, до яких пред'являються такі вимоги:

при згорянні палива повинні виділяти максимальну кількість теплоти;

вони повинні мати високі експлуатаційні властивості, які обумовлюють надійну та економічну роботу двигунів внутрішнього згорання, а також добрі змащувальні властивості, які забезпечують мінімальне зношування трибовузлів паливної апаратури;

не повинні викликати корозію деталей паливної апаратури;  
повинні зберігати стабільність своїх властивостей під час зберігання, транспортування та експлуатації;

не повинні утворювати особливих утруднень при перекачуванні та заправленні в баки машин, добре перекачуватися по трубопроводах двигуна;



повинні бути достатньо розповсюдженими у природі та дешевими;

повинні мати мінімальну схильність до утворення нагару, лакових відкладень та осаду.

В якості рідких палив для двигунів БКВРМ використовуються різні сорти бензинів та дизельного палива.

Бензин являє собою складну суміш легких ароматичних, нафтенових, парафінових та змішаних вуглеводнів з числом вуглецевих атомів від 4 до 10 з середньою молекулярною масою близько 100. Це легкозаймиста безкольорова або ледь жовтувата рідина (якщо вона без спеціальних добавок) з температурою спалахування 20 – 40<sup>0</sup>С.

Дизельне паливо – це складна суміш парафінових, ароматичних вуглеводнів та їх похідних з середньою молекулярною масою 110 – 230 та температурою спалахування 35 – 80<sup>0</sup>С.

## **10.2. Класифікація та номенклатура бензинів та дизельних палив**

Відповідно до вітчизняної класифікації бензини для карбюраторних та інжекторних двигунів позначаються буквою «А», що визначає, що це бензин автомобільний. Після цієї букви позначається цифра, яка розкриває мінімальне значення октанового числа, яке визначається за моторним методом. Друга буква «И» (якщо вона є) показує, що мінімальне значення октанового числа визначено дослідницьким методом.

Марки бензинів, які використовуються в двигунах БКВРМ, та основні властивості цих бензинів наведені у табл. 10.1.

Таблиця 10.1

## Марки бензинів за ДСТУ 4063-2001 та їх основні властивості

Показник	A-76	A-80	A-92	АИ-93	АИ-95	АИ-98
Щільність при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup> , не більше	-	755	770	-	-	не нормується
Октанове число, не менше, за методом:						
дослідним	-	80	92	93	95	98
моторним	76	76	83	85	86	88
Масовий вміст свинця, г/дм <sup>3</sup> , не більше:						
етилований	-	0,15	0,15	-	-	-
неетилований	-	0,013	0,013	-	-	0,013
Масова частка сірки, %, не більше	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1
Вміст фактичних смол, мг/100см <sup>3</sup> , не більше	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

Для дизелів вітчизняна промисловість випускає сорти дизельних палив, номенклатура та основні властивості яких наведено у табл. 10.2.

Таблиця 10.2

## Марки дизельних палив та їх основні властивості

Показник	Л за ДСТУ 3868-99	З за ДСТУ 3868-99	А за ГОСТ 305-82
Цетанове число, не менше	45	45	45
Кінематична в'язкість при 20 <sup>0</sup> С, мм <sup>2</sup> /с	3,0-6,0	1,8-5,0	1,5-4,0
Температура застигання, <sup>0</sup> С, не вище	-10	-35	-65
Температура спалахування в закритому тиглі, <sup>0</sup> С, не менше	40	35	30
Масова частина сірки, %, не більше	0,20	0,20	0,20
Вміст фактичних смол, мг/100см <sup>3</sup> , не більше	40	35	30
Зольність, %, не більше	0,01	0,01	0,01
Щільність при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup> , не більше	860	840	830

### 10.3. В'язкість та низькотемпературні властивості дизельного палива

В'язкість – це один з основних показників експлуатаційних властивостей дизельного палива.

Поняття в'язкості вже розглядалося в 5.4, тому розглянемо лише роль цього показника палива у роботі дизелів.

В'язкість дизельних палив нормується при температурі 20<sup>0</sup>С. При підвищенні температури в'язкість, як і в оливах, знижується, але не дуже значно. Та навпаки, при зниженні температури до негативних значень в'язкість суттєво підвищується (табл. 10.3). Таким чином, чим нижче температура, тим більший опір створюють частинки палива при їх русі по трубопроводах та тим більші витрати енергії на прокачування палива.

Таблиця 10.3

Відомості про залежність в'язкості дизельного палива від температури

Паливо	Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при температурі, °С			
	+20	0	-10	-20
Дизельне:				
літнє	6,36	12,94	20,59	50,92
зимове	4,26	8,36	12,43	20,60

При певному значенні в'язкості опір настільки підвищується, що порушується нормальна подача палива та робота паливного насоса.

В'язкість також впливає на процеси розпилу палива в форсунках та сумішоутворенні. При великій в'язкості створюються великі краплі палива та короткий струмінь його на виході з форсунки, тому потрібно більше часу на випаровування палива та його згоряння, виникає неповне згоряння, внаслідок чого двигун димить, на деталях його циліндро-поршневої групи відбувається інтенсивне нагаровідкладення, збільшується витрата палива. У зв'язку з цим необхідно обмежувати верхню межу в'язкості, яка знаходиться на рівні 8 мм<sup>2</sup>/с при температурі 20<sup>0</sup>С.

Зі зменшенням в'язкості, навпаки, покращується розпил палива у форсунках, у зв'язку з чим прискорюється процес його випарування, утворюється більш рівномірна за складом горюча суміш, тому паливо згоряє повніше. Але надмірне зменшення в'язкості приводить до зниження циклової подачі, підвищення внутрішніх витоків палива через зазори прецизійних пар паливних насосів та розпилювачів форсунок, зниження тиску упорскування, а також підсилення зносу плунжерних пар за рахунок погіршення змащувальних властивостей палива. Експериментальні дослідження показують, що нижня межа в'язкості повинна бути на рівні 1,5 – 1,8 мм<sup>2</sup>/с при температурі 20<sup>0</sup>С.

На погіршення текучості дизельних палив впливають також їх низькотемпературні властивості, які характеризуються температурами помутніння, кристалізації та застигання.

Температура помутніння – це температура, при якій витрачається фазова однорідність палива. На зовнішній вигляд воно стає мутним. Якщо помутніння починається при температурі 0<sup>0</sup>С, то це звичайно відбувається за рахунок виділення з палива дрібних крапельок води, які створюють кристалики льоду. Якщо паливо починає каламутніти при більш низькій або більш високій температурі, то це здійснюється за рахунок видалення з нього твердих парафінових вуглеців.

При подальшому зниженні температури кількість твердої фази збільшується та кристали ростуть. Температура, при якій в паливі з'являються перші видимі кристали, називається температурою кристалізації.

Температурою застигання називають температуру, при якій паливо втрачає рухомість. При цьому рівень палива, що застигло в стандартній пробірці, що нахилена під кутом 45<sup>0</sup>, повинен залишатися нерухомим на протязі однієї хвилини.

Низькотемпературні властивості палив залежать, в основному, від хімічного та фрикційного складу палива. Найбільш високу температуру застигання мають палива, які отримані з алканових нафт. Вони можуть використовуватися влітку, тому що мають температуру застигання близько -10<sup>0</sup>С. Зимові сорти палив з температурою застигання нижче -45<sup>0</sup>С

виробляють з нафтоцикланової основи. З парафінових нафт отримують палива з температурою застигання  $-35^{\circ}\text{C}$ .

Необхідно, щоб різниця між витратою фазової однорідності палива та повним його застиганням складала декілька градусів, тому що в умовах експлуатації паливо можна використовувати до початку кристалізації. Це обумовлено тим, що кристали парафіну, що виділяються, забивають систему живлення двигуна, особливо фільтри тонкої очистки, що порушує або зовсім припиняє подачу палива.

Оскільки помутніння та кристалізація залежать від наявності в паливі алканових вуглеців, які мають високу температуру застигання, то для покращення низькотемпературних властивостей палив більш повно видаляють парафінові вуглеці (глибока депарафінізація). Таким способом навіть з нафт алканової основи можна отримати паливо, яке працездатне при температурі  $-20^{\circ}$  -  $-25^{\circ}\text{C}$ , але займистість таких палив декілька погіршується. Іноді для зниження температури застигання до палива додають спеціальні присадки – депресанти. Уведення такої присадки у кількості 1% знижує температуру застигання палива до  $-20^{\circ}\text{C}$ , але при цьому збільшується нагаровідкладення.

При виборі марки дизельного палива необхідно пам'ятати, що температура застигання його повинна бути не менше ніж на  $10^{\circ}\text{C}$  нижче можливої температури експлуатації.

#### **10.4. Особливості згоряння палива в карбюраторних та дизельних двигунах**

Від того, наскільки досконало протікає процес згоряння палива в двигуні, залежать його техніко-економічні показники. Головні фактори, що впливають на згоряння палива, - це хімічний склад самого палива, склад пальної суміші, тиск у циліндрі, температура та час згоряння.

Нормальним згорянням робочої суміші в карбюраторному та інжекторному двигунах вважається таке, коли спалах свіжих частин суміші та переміщення фронту полум'я у камері згоряння

є наслідком передачі теплоти за допомогою теплопровідності та випромінювання. Тиск, який при цьому підвищується, стискує незгорілу частину суміші та хвилі тиску рухаються перед фронтом полум'я. Швидкість поширення фронту при нормальному згорянні складає 25 – 35 м/с. На неї впливає підвищення тиску та температури робочої суміші. Максимальна швидкість фронту полум'я відповідає коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha=0,93 - 0,95$ . Збагачення або збідніння суміші приводить до зниження швидкості фронту полум'я. При збагаченні суміші це відбувається внаслідок нестачі кисню для горіння бензину, а при збідненні – у зв'язку зі зниженням температури робочої суміші, тому що частина теплоти витрачається на нагрів залишкового повітря.

Збільшення частоти обертання колінчатого вала двигуна позитивно впливає на швидкість поширення фронту полум'я, що пояснюється посиленням вихрових рухів робочої суміші, які приводять до розширення фронту полум'я. Це дуже важливо, бо в протилежному випадку робота бензинового двигуна на перехідних режимах була б неможливою.

При нормальному згорянні палива тиск у циліндрі двигуна збільшується плавно, але при певних умовах (підвищення температури та тиску) може виникнути детонація (вибухове згорання). У цьому випадку швидкість поширення фронту полум'я наростає стрибкоподібно та досягає 1500 – 2500 м/с.

Відмітна особливість детонаційного згорання палива – поява ударних хвиль (рисунок 10.1), які багаторазово відбиваються від стінок камери згорання, викликають вібрацію та характерний металевий стук.

Зовнішнім проявом детонації є також димний випуск, оскільки при вибуховому розвитку процесу частина палива не встигає повністю згоріти.

За рахунок дії гарячих газів на стінки камери згорання зменшується теплопровідність, що викликає перегрів двигуна.

Додаткові витрати теплоти у систему охолодження та неповнота згорання палива сприяють зниженню потужності двигуна. При детонаційному згорянні має місце також різке збільшення теплових та механічних навантажень, що може

привести до поломки деталей циліндро-поршневої групи та прогорання клапанів та голівок поршнів. Крім того, спостерігається закоксування та, як наслідок, витрата рухомості поршневих кілець.

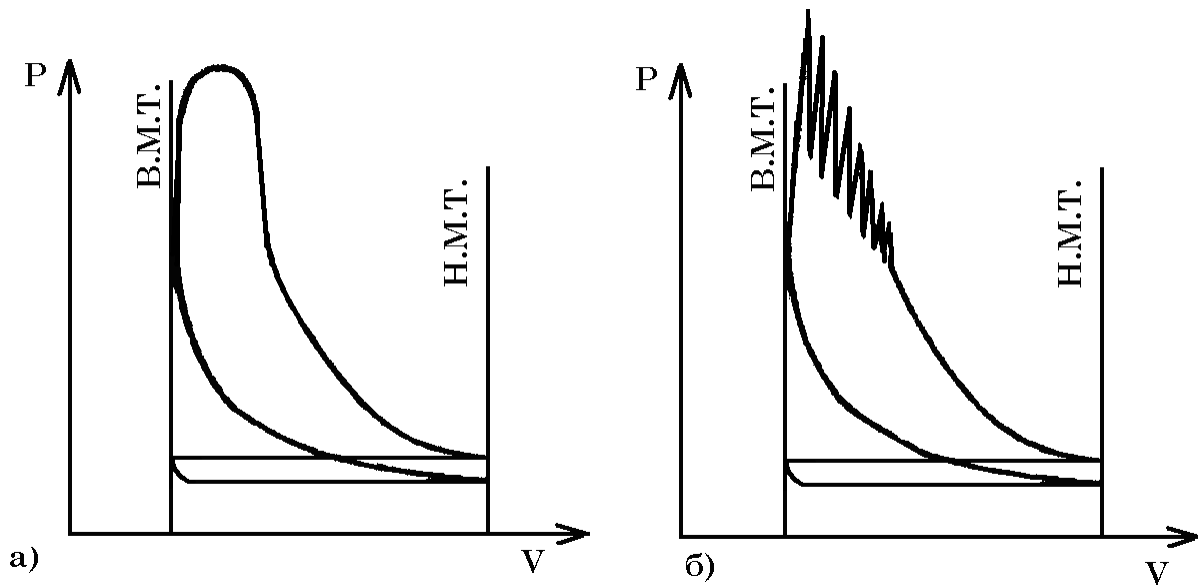


Рис. 10.1. Індикаторні діаграми при нормальному (а) та детонаційному згорянні (б) палива

Зовнішні ознаки детонаційного згорання виявляються вже при вибуховому згорянні 5% суміші. Якщо детонують 10-12% робочої суміші, то детонаційне згорання вважають середньої інтенсивності, а якщо 18-20%, то детонація вважається сильною. У цьому разі вона може привести до передачі її іншим циліндрам та до аварійного стану двигуна.

Найбільші можливості для переходу нормального згорання до детонаційного створюються при згорянні останніх частин робочої суміші: чим вона більше буде детонувати, тим гірші наслідки від цього.

Усі конструктивні та експлуатаційні фактори, які сприяють підвищенню температури та тиску, збільшенню часу згорання, впливають на можливість виникнення детонації. Тому в залежності від умов, що склалися, одне й те ж паливо може згоряти або нормально, або в детонаційному режимі. Враховуючи відмічені раніш фактори, можна успішно запобігати

детонаційному згорянню та забезпечувати нормальну експлуатацію двигуна.

Вища у порівнянні з бензиновими двигунами економічність дизелів визначається своєчасним спалахуванням та повним згорянням палива. Ці фактори обумовлені збільшеним ступенем стиску ( $\epsilon = 14 - 20$ ) та забезпеченням достатньої кількості кисню для згорання (коефіцієнт надлишку повітря 1,4 – 1,5).

Від моменту упорскування палива в камеру згорання та до виникнення згорання, що супроводжується виділенням теплоти, проходить певний, хоча й короткий проміжок часу, який називається періодом затримки самозаймання. Температура, до якої паливо повинно бути нагрітим, щоб почалося горіння, називається температурою самоспалахування. Вона залежить від хімічного складу палива та зовнішніх факторів: тиску, складу робочої суміші, типу камери згорання та ін. Чим триваліше період затримки самозаймання, тим більша частина свіжого заряду виявиться в циліндрі в момент спалахування та тим сильніше буде вибух. При такому згоранні робота дизеля буде жорсткою, причому в ритмічному шумі дизеля з'явиться різкий стук, який виразно чути. При цьому значно погіршується економічність двигуна, збільшуються механічні навантаження на деталі циліндро-поршневої групи, їх знос, деформація поршневих кілець та поршня, пригорають кільця у своїх канавках, порушується гідродинамічний режим змащування корінних та шатунних шийок.

Великий вплив на схильність до самозапалення чинить хімічний склад дизельного палива. Наявність у ньому ароматичних вуглеців викликає у зв'язку з утворенням перекисних з'єднань збільшення фази періоду затримки самоспалахування, що приводить до жорсткої роботи. Та навпаки, перевага в дизельному паливі нормальних парафінів у силу їх схильності до легкого утворення перекисних з'єднань скорочує період затримки самоспалахування, що сприяє м'якій роботі дизеля.



## 10.5. Октанове та цетанове числа

Оціненню детонаційних властивостей бензину для карбюраторних та інжекторних двигунів надається велике значення, тому що від його справедливості залежать відповідність даного палива конкретному типу двигуна та його основні техніко-економічні показники.

Загальноприйнятий оцінний показник детонаційної стійкості бензинів – октанове число. Цей показник чисельно рівний процентному складу за об'ємом ізооктану у такій його суміші з нормальним гептаном, яка за детонаційною стійкістю еквівалентна паливу, що досліджується. Наприклад, якщо при випробуваннях встановлено, що детонаційна стійкість бензину така ж, як у суміші, що складається з 76% ізооктану та 24% нормального гептану, то це означає, що октанове число бензину дорівнюється 76.

Ізооктан має високу детонаційну стійкість, у зв'язку з чим він здатен згоряти без детонації при високому ступені стиску. Тому детонаційна стійкість ізооктану прийнята рівною 100 одиницям.

Нормальний гептан, навпаки, має низьку детонаційну стійкість. Він починає детонувати навіть при низькому ступені стиснення, тому його детонаційна стійкість прийнята за нуль.

Найбільш практичне використання отримав моторний метод визначення октанового числа. Для цього використовують спеціальні одноциліндрові установки ІТ9-2М або УІТ-65, на яких під час роботи можна змінювати ступень стиснення в межах 4 – 10.

Спочатку цій установці завдають стандартний режим роботи, після чого переводять її на паливо, що випробовується. Змінюючи ступень стиснення, відмічають появу детонації та шукають такий склад робочої суміші, коли інтенсивність детонації буде середньою. Детонацію визначають за допомогою спеціального пристрою, який називається детонометром. Після цього підбирають таку суміш ізооктану з нормальним гептаном, яка в даних умовах детонує з такою ж інтенсивністю, як і паливо, що випробовується. Октанове число останнього дорівнює процентному складу ізооктану в цій суміші.

Для оцінення октанового числа бензинів використовують також дослідницький метод, в якому використовується установка ІТ9-6. Октанове число таким методом визначають при режимах роботи двигуна, які відповідають експлуатаційним режимам роботи машини. Звичайно цей метод дає декілька вищі значення октанового числа, ніж моторний.

Для підвищення детонаційної стійкості бензинів в них додають спеціальні речовини - антидетонатори.

Загальноприйнятий оцінний показник схильності дизельних палив до самозаймання - цетанове число.

Цетанове число палива чисельно дорівнює процентному складу за об'ємом цетану в такій його суміші з  $\alpha$ -метилнафталіном, яка по самозайманню еквівалентна паливу, що випробовується. Якщо, наприклад, його самозаймання таке ж, як і суміші, яка складається з 45% цетану та 55%  $\alpha$ -метилнафталіну, то цетанове число такого палива дорівнює 45.

Цетан – це чистий вуглеводень парафінового ряду, який має дуже високу схильність до самозаймання, яка умовно прийнята за 100 одиниць. Цетан в установці ІТ9-3М самозаймається навіть при найменшому ступені стиснення.

$\alpha$ -метилнафталін – також чистий вуглеводень, але ароматичного ряду. На відмінність від цетану він має дуже низьку схильність до самозаймання.  $\alpha$ -метилнафталін не займається навіть при найвищому ступені стиснення, тому схильність його до самозаймання умовно прийнята за нуль.

Цетанове число можна визначити за співпаданням спалахувань, запізнюванням самоспалахування та за критичними ступенями стиснення. Звичайно цетанове число визначають за методом співпадання спалахувань, використовуючи для цього одноциліндрову установку ІТ9-3М, яка працює за принципом самозаймання від стиснення. Конструкція установки забезпечує змінення ступеня стиснення від 7 до 23.

Випробування проводять таким чином. Запускають двигун установки та задають йому стандартний режим. Потім двигун переводять на паливо, що випробовується. Кут випередження упорскування установлюється рівним  $13^{\circ}$  до надходження поршня в ВМТ. Після цього зміненням ступеня стиснення

домагаються спочатку самозаймання палива строго в ВМТ, потім у цих же умовах переводять двигун на суміш цетану та  $\alpha$ -метилнафталіну, підбираючи такий її склад, щоб він при певному ступені стиснення також самозаймався строго в ВМТ. Тоді процентний склад цетану в цій суміші і показує цетанове число палива, що випробувалося.

## 10.6. Смоло- та лакоутворення в двигунах

Накопичення смол та нагарів на деталях двигуна залежить від конструктивних особливостей системи живлення та камери згоряння, режиму роботи двигуна, а головним чином - від якості палива та змащувальних олив, що використовуються.

У бензинах майже завжди у розчиненому стані є смолисті та смолоутворюючі речовини. Кількість їх залежить від хімічного складу, способу отримання та якості очистки бензину. З часом, а також під впливом кисню повітря та підвищеної температури, у паливі відбуваються змінення: збільшується кількість смолистих речовин, бензин темніє і набуває коричневого та навіть темно-коричневого кольору.

Смоли, які знаходяться у бензині у даний момент, називаються фактичними. Їх кількість визначають випарюванням бензину при певних умовах. Склад фактичних смол нормується у міліграмах на 100 мл бензину. Для різних марок бензину кількість смол перебуває в межах 2 – 15 мг/100 мл.

Смоли, які накопичуються у бензинах, осаджуються в паливних баках, на стінках бензопроводів, у карбюраторі, зменшують прохідні січення каліброваних отворів жиклерів та інжекторів, порушуючи нормальну роботу системи живлення. При створенні горючої суміші важкі вуглеці палива не випаровуються повністю, а залишаються у вигляді конденсату. Не можуть випаруватися також смолисті з'єднання, які мають велику молекулярну масу. Ці з'єднання відкладаються на стінках усмоктувального колектору та клапанах. Особливо небезпечним є накопичення смол на направляючих впускних клапанах, що викликає їх зависання та пригоряння, і як наслідок, приводить до

порушення робочого процесу двигуна. Найбільш інтенсивно накопичення смол відбувається на гарячих стінках трубопроводів, де смолисті речовини поступово ущільнюються та створюють тверді нагаровідкладення, які зменшують площу січення трубопроводів, викликаючи тим самим зниження потужності та економічності двигуна.

Відкладення нагару на поверхні камери згоряння може служити причиною замикання електродів свіч.

Зі збільшенням складу смол в бензині, як правило, знижується його октанове число та збільшується кислотність бензину, що приводить до інтенсивної корозії металу.

Дизельні палива, які містять значну кількість смолистих з'єднань, не можуть повністю згоріти, що сприяє накопиченню нагару.

Нагаровідкладення накопичуються на клапанах та голівці поршня, у камері згоряння, на соплах форсунок та у вихлопній системі. Вони викликають підвищений знос деталей циліндро-поршневої групи, пригоряння поршневих кілець та клапанів, погіршення розпилу палива, знижують, а іноді припиняють його подачу до циліндрів двигуна. При підвищенні нагаровідкладень погіршується відведення теплоти, що приводить до перегріву двигуна та падіння його потужності.

Нагароутворюючу здатність дизельних палив оцінюють за їх коксівністю, яка є здатністю палива створювати вугільний залишок після розкладання та випарування його в спеціальному приладі без доступу кисню при температурі 700 – 800<sup>0</sup>С.

Механізм процесу нагароутворення в двигунах достатньо добре вивчений К.К. Папоком [38], який встановив такі закономірності:

- нагароутворення залежить від температурних умов;
- найбільша швидкість утворення нагару на поверхнях деталей спостерігається в початковий період роботи двигуна;
- при роботі двигуна у сталому режимі нагар створюється тільки до певного моменту, після чого встановлюється рівновага;
- в залежності від режиму роботи та умов експлуатації двигуна кількість нагару на деталях може збільшуватися, зменшуватися або залишатися постійною.

Розрізняють дві фази створення нагару: його зростання та рівноважний стан. Збільшення нагару до певного значення за товщиною залежить від температурних умов, якості палива, оливи та складу суміші. Закінчується ця фаза досить швидко. Після того, як шар нагару за висотою досягне граничної величини, яка залежить від теплового режиму двигуна, збільшення товщини нагару припиняється і настає фаза рівноважного стану. При цьому нагар, який знову створився, вже не накопичується на деталях, а вигоряє разом з продуктами згоряння та виноситься у випускний тракт.

До складу нагару входять вуглецеві продукти (92 – 96%) – кокс, смолисті речовини, олива та негорюча частина (4 –6%) – кремній, залізо, свинець і т.п. У нагарі можуть бути також сірка (при роботі двигуна на сірковому паливі), а також інші речовини, які потрапляють до камери згоряння з паливом, повітрям або з оливою.

## **10.7. Корозійні властивості палив**

Корозія - це руйнування поверхні металу внаслідок хімічних або електрохімічних процесів. Корозія паливних баків, трубопроводів, деталей паливної апаратури відбувається при наявності в паливі корозійно-агресивних з'єднань: водорозчинних кислот та лугів, активних сіркових з'єднань, води, органічних кислот. Вуглеці палива корозійного руйнування не викликають.

Найбільш сильний корозійний вплив справляють активні сіркові з'єднання, водорозчинні кислоти та луки, а також вода. Тому наявність їх у бензині не допускається, але у зв'язку з особливостями хімічного складу нафти та умов експлуатації машин вони практично завжди містяться у паливі.

Вода може знаходитися в паливі як в розчиненому, так і у вільному стані (механічні суспензії, емульсії). В розчиненому вигляді води мало: не більше тисячних часток відсотків. Її вміст залежить від хімічного та фракційного складу палива, а також від вологості повітря, що оточує. Кількість води, що знаходиться у

вільному стані, може бути значною та залежить від умов транспортування та якості технічного обслуговування машини.

Органічні кислоти мають меншу корозійну активність, ніж водорозчинні. Найбільш енергійно вони взаємодіють з кольоровими металами (свинцем, цинком), а на чорні (сталь, чавун) впливають слабо. З підвищенням температури активність органічних кислот зростає. За наявності води кислоти (особливо низькомолекулярні) більш агресивні. У невеликій кількості вони завжди перебувають в паливі, їх кількість характеризується кислотним числом, яке регламентується стандартами на паливо та виражається кількістю міліграмів лугу, що необхідні для нейтралізації органічних кислот, які містяться в 100 мл палива (мг КОН/100 мл). Для бензину припустима кислотність до 3 мг КОН/100 мл, для дизельного палива – до 5 мг КОН/100 мл. При тривалому зберіганні його вміст органічних кислот підвищується внаслідок окислення вуглеців.

На корозійний знос поршневих кілець, клапанів та випускного колектора, крім вказаних факторів, суттєво впливає загальна кількість неактивних сіркових з'єднань, які присутні в паливі. Кінцевими продуктами згоряння палива завжди є вуглекислий газ  $\text{CO}_2$  та вода. При згорянні усіх сіркових з'єднань, як активних, так і неактивних, створюються кислотні оксиди: сірчистий  $\text{SO}_2$  та сірчаний  $\text{SO}_3$  ангідриди. Найбільш агресивний - сірчаний ангідрид, вміст якого в продуктах згоряння тим більше, чим вище температура, тиск та концентрація кисню. Водяні пари стикаються з холодними поверхнями двигуна та конденсуються. Оксиди сірки, які розчинені у воді, утворюють сірчисту  $\text{H}_2\text{SO}_3$  та сірчану  $\text{H}_2\text{SO}_4$  кислоти, які володіють ще більш сильним корозійним впливом. Таким чином, в двигунах може бути газова (від  $\text{SO}_2$  та  $\text{SO}_3$ ) та рідинна (від  $\text{H}_2\text{SO}_3$  та  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) корозія.

Форсовані високообертові дизелі більш піддаються сірчистій корозії, ніж низькообертові. При надлишку кисню та високій температурі сірчистий ангідрид у великій кількості переходить в сірчаний, тому при підвищенні теплонапруженості спостерігається більш інтенсивна газова корозія тарілок випускних клапанів, верхньої частини циліндрів, першого компресійного кільця та випускного колектора.

При зниженому тепловому режимі виникає рідинна корозія, яка особливо сильно виявляється під час запуску та прогріву двигуна в холодний час року. Чим більше прорив газів у картер двигуна та вище вміст сірки в паливі, тим сильніше рідинна корозія. Великий вплив на неї чинить режим роботи. В малонавантажених двигунах, коли температура охолоджуючої рідини низька, виникають сприятливі умови для конденсації парів води та виявлення рідинної корозії.

Таким чином, деталі двигуна, які контактують з продуктами згоряння палива, в зоні високої температури руйнуються від газової корозії, а в зонах низької температури, де конденсується вода, - від рідинної. Надійну експлуатацію двигуна на сірчистому паливі можна забезпечити тільки у тому випадку, коли правильно підібраний режим роботи двигуна, при якому сірчиста корозія буде найменш інтенсивна.

З вищенаведеного можна зробити висновок, що корозійне зношування деталей тісно пов'язано з вмістом сірки у паливі. Узагальнюючи результати численних досліджень, можна відмітити, що при збільшенні вмісту сірки від 0,2 до 0,5% корозійний знос підвищується на 25-30%. Якщо її концентрація зросте до 1%, то знос збільшиться у 2 рази [42, 51].

При виробництві палива основна маса сірчистих з'єднань переганяється з вуглецьями, які википають при високій температурі (вище 200<sup>0</sup>C). Тому вона знаходиться в дистилятах, з яких отримують дизельне паливо. Вміст сірки в ньому може доходити до декількох відсотків. В бензинових фракціях сірка наявна у кількості не більше 0,12- 0,15%. Найбільш радикальний спосіб боротьби з сірчистою корозією – це видалення сірки при очищенні палива та правильний підбор для двигунів оливи, яка містить в собі потрібні композиції присадок.

Слід також відмітити, що сірка в паливі шкідлива ще й тому, що при роботі двигуна на сірчистому паливі утворюється більше нагару та інтенсифікується процес старіння оливи.

## 10.8. Газоподібні палива

Газоподібне паливо набуває все більшого поширення у народному господарстві. Основні переваги такого палива: відносно низька вартість, висока антидетонаційна стійкість (октанове число пропану складає 120 одиниць, бутану – 92 одиниці), у зв'язку з чим є можливість підвищення ступеня стиснення двигуна та адекватно потужності та економічності), можливість транспортування на значні відстані по трубопроводах, у тому числі, у важкодоступні райони, зручність у використанні, можливість повного згоряння з незначним надлишком повітря, практично відсутні токсичні та корозійно-агресивні речовини в продуктах згоряння. Але використання газоподібних палив створює деякі проблеми, до яких можна віднести необхідність спорудження широкої мережі газонаповнювальних станцій, а також те, що природні гази у широкому діапазоні концентрації парів з повітрям створюють вибухонебезпечну суміш.

З усіх видів газоподібного палива поширення набули природні гази. За складом та тепловою цінністю вони відрізняються незначно.

Головними складовими природних газів є метан ( $\text{CH}_4$ ), який забезпечує високу теплову цінність палива, пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) та бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). Два останні складові є зрідженими газами.

Промисловість випускає зріджені гази двох марок: СПБТЗ та СПБТЛ (С-зріджений, П-пропан, Б-бутан, Т-технічний, З-зимовий, Л-літній). Характеристика цих палив наведена у табл. 10.4.

Слід також відмітити, що зріджені гази, як правило, не мають запаху та кольору, тому не помітне їх витікання з газобалонного обладнання. Тому для підвищення техніки безпеки до палива додають спеціальні одоранти (етилмеркаптан) у кількості 0,2 г на 1000 м<sup>3</sup>.



Таблиця 10.4

## Характеристика газоподібних палив

Показник	СПБТЗ	СПБТЛ
Теплота згоряння, Дж/кг	$(45-45,5) \cdot 10^3$	$(45,5-46) \cdot 10^3$
Вміст газів, % за масою, не більше		
метан, етан, етилен	5,0	6,0
пропан, пропілен	75,0	34,0
бутан, бутилен	20,0	60,0
Рідинний залишок при 20°C, % (об'ємний, не більше)	1,0	2,0
Мінімальний надлишковий тиск насичених парів, МПа, при температурі:		
+45°C	1,57	1,57
-20°C	0,157	-

**10.9. Шляхи економії палив при експлуатації**

При експлуатації транспортних засобів та спеціальної техніки з двигунами внутрішнього згоряння питомі витрати палива можна знизити, здійснюючи організаційні та технічні заходи.

До організаційних заходів належать такі:

перегляд лінійних норм витрачання палива та приведення їх у відповідність із сучасним технічним рівнем техніки та зміненими умовами експлуатації;

підвищення коефіцієнта використання пробігу вантажного рухомого складу;

інтенсифікація використання причепів;

додержання оптимальних швидкостей руху;

удосконалення обліку витрачання палива на підприємствах;

упорядкування постачання та роздачі палива та ін.

До технологічних заходів можна віднести такі:

постійне підтримування належного технічного стану техніки і передусім, систем живлення, запалювання та газорозподілу двигунів, регулювань ходових частин та шин;

обладнання майданчиків відкритого зберігання техніки в умовах негативних температур сучасними засобами розігрівання і підігрівання холодних двигунів, що дасть змогу повністю виключити їх прогрівання у міжзмінний час запусканням та роботою на холостому ходу.

Застосування альтернативних палив – один з головних напрямків економії нафтових видів палив. Найбільш ефективними та перспективними видами таких палив є природний газ, водень, пропан-бутанова суміш та метанол. До нових видів належать композиції легких вуглеводнів із бензином або дизельним паливом, скраплений метан, етан та їх композиції.

Застосування водню як додаткового палива для карбюраторних двигунів відкриває можливість принципово нового підходу до організації робочого процесу. При мінімальній модифікації двигуна, що стосується в основному системи живлення, можна досягти значного підвищення його паливної економічності: експлуатаційна витрата бензину знижується на 35-40% та зменшується токсичність відпрацьованих газів.

Додавання у бензин синтетичних компонентів та присадок – це досить перспективний напрям. Наприклад, у бензин додавали 8% метилтретинобутилового ефіру (МТБЕ) і бензометанольну суміш (15% метанолу і 7% ізобутанолу). Випробували також бензин А-76 з миючою присадкою “Найк” [43]. Випробовування цих палив у реальних умовах експлуатації показали надійну роботу двигунів. При цьому не потрібні спеціальні регулювальні роботи, двигун працює із звичайними експлуатаційними матеріалами, а умови зберігання і транспортування палива такі самі, як і бензину. Крім того, високі антидетонаційні властивості МТБЕ дають змогу збільшити випуск неетилованого бензину.

Одні з головних причин необґрунтованих витрат палива – це несправності устаткування нафтоскладів, порушення правил їх експлуатації та недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу.

Витрати палива є наслідком підтікання його із з'єднань шлангів і рукавів, негерметичності резервуарів, переливання

палива з однієї ємкості в іншу. Найбільші витрати бувають при зберіганні палива, що пояснюється його малою в'язкістю. Навіть незначне підтікання палива у вигляді краплин призводить до значних витрат. Наприклад, через нещільне з'єднання, яке пропускає одну краплину за секунду, витрати за рік складають 1,5 тонни. Якщо підтікання часом перетворюється в струминку, витрати збільшуються до 2,5 тонн за рік. Внаслідок малої в'язкості паливо просочується через невидимі отвори у швах ємкостей на поверхню та випаровується («потіння»). Витрати з 1-го м<sup>2</sup> шва, що «потіє», можуть досягти 0,7 тонн за рік.

Щоб уникнути витрати палива від витікання під час приймання, зберігання та видачі, треба щодня перевіряти справність резервуарів і тари, своєчасно замінити прокладки та набивку в запірній арматурі і в з'єднаннях, негайно усувати дефекти. Не можна наливати паливо у пошкоджену тару та переповняти її. Люки резервуарів повинні щільно закриватися, засоби перекачування треба регулярно перевіряти. Тріщини у зварних швах і невеликі отвори в трубопроводах і резервуарах усувають, установлюючи хомути або бандажі із застосуванням паливностійких мастил та епоксидних смол.

Витрати палива під час заправлення баків машин відбуваються, в основному, через відсутність спеціалізованого заправного устаткування або невмілого користування ним. Тому цю операцію слід здійснювати на справних стаціонарних постах заправлення за допомогою паливозаправних колонок або безпосередньо на місцях пересувними паливозаправниками.

Значні витрати палива, особливо бензину, мають місце через його випаровування. Передусім вивітрюються легкі (найбільш головні) фракції, що призводить до обважнювання фракційного складу, погіршення пускових властивостей, неповного згоряння, димного вихлопу, збільшення нагароутворень та ін. Крім того, у неетилованому бензині знижується октанове число, що погіршує умови протікання робочого процесу.

Значні витрати палива спостерігаються при порушеннях правил експлуатації. Від 4 до 17% збільшується витрата палива при зменшенні тиску в шинах коліс. Порушення теплового режиму двигуна може збільшити витрату палива на 8-10%, тому

неможливо експлуатувати двигун, якщо в ньому не працюють термостат та жалюзі. Неправильне регулювання муфт зчеплення, гальмових механізмів, сходження та розвалу коліс збільшує витрати палива на 10-20%. Підвищення пропускну здатності головного жиклера карбюратора підвищує витрати палива на 10%, неправильне регулювання кута випередження запалювання, несвоєчасне очищення електродів свічок від нагару – на 5-15%. Неправильне регулювання переривника-розподільника збільшує витрати палива на 7-10%, а робота двигуна з однією несправною свічкою – на 25-60%.

Застосування бензину з октановим числом, яке не відповідає двигуну, може спричинити прогорання головок блоків та їхніх прокладок, руйнування та пригорання поршнів та клапанів, що значно збільшує витрати палива. При використанні бензину та дизельного палива з вмістом сірки відповідно понад 0,15 і 0,5% деталі циліндро-поршневої групи зношуються в 3-4 рази швидше, а палива витрачається значно більше (до 29%).

До великих витрат палива (до 30%) призводять: низький коефіцієнт використання пробігу, недостатнє застосування причепів та напівпричепів, тягових потужностей, зниження частки централізованих перевезень вантажів, експлуатація транспорту у важких дорожніх умовах, наднормативні простой під розвантаженням та навантаженням.

## **11. ГАЛЬМОВІ, АМОРТИЗАЦІЙНІ ТА ПУСКОВІ РІДИНИ**

Гідравлічні приводи досить поширені в гальмових механізмах машин. В цих приводах використовуються так звані гальмові рідини, які повинні мати добрі в'язкісно-температурні та змащувальні властивості, високу фізичну та хімічну стабільність, бути інертними по відношенню до металу та матеріалів ущільнення. Гальмові рідини використовують всесезонно, тому їх важливою властивістю повинна бути стабільність при позитивних та негативних температурах довкілля.

Гальмові рідини виготовляють з використанням рослинних олив (як правило, касторової) або двохатомних спиртів

(гліколей). При використанні рослинних олив другим компонентом буває спирт, наприклад, бутиловий. У цілях зменшення використання натуральних жирів прагнуть зменшити частку касторової оливи в деяких рецептурах рідин. При цьому для зберігання в'язкості додають присадки, які загущують рідину.

Найбільш розповсюджена гальмова рідина БСК, яка являє собою суміш рівної кількості бутилового спирту та касторової оливи з додаванням органічного барвника (колір рідини - помаранчево-червоний). Цю рідину можна використовувати в гідроприводах гальм та у муфтах зчеплення в зонах помірного клімату. При температурі нижче  $-17^{\circ}\text{C}$  рідина БСК у зв'язку з інтенсивною кристалізацією починає переходити у тверду фазу. При потраплянні в систему води однорідність рідини порушується і вона стає непридатною до використання.

Добрі експлуатаційні властивості має гальмова рідина "Нева", яка виготовляється на основі гліколей з комплексом присадок (в'язкісною, протизношувальною, антикорозійною та ін.) та барвником. Діапазон температур, при яких може використовуватися ця гальмова рідина складає від  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . При цьому забезпечується надійна робота гальмової системи машини. При поглинанні води рідина не розшаровується, тому що вода добре розчинювана в гліколях. Основний недолік цієї рідини – висока гігроскопічність. У результаті накопичення вологи в рідині різко зменшується температура кипіння (зі  $180-200^{\circ}\text{C}$  до  $120-140^{\circ}\text{C}$ ), що знижує безпеку руху машини.

Гальмова рідина "Томь" - всесезонна рідина, яка являє собою суміш гліколей та ефірів борної кислоти. Основні переваги цієї рідини – менша гігроскопічність, незначне зниження температури кипіння при обводненні, кращі протизношувальні та антикорозійні властивості, відносно невелика вартість.

Композицію на основі боровміщуючих з'єднань, антиокислювальних та антикорозійних присадок являють собою рідини "Роса", "Роса-3" та "Роса ДОТ-4". Вони мають дуже добрі експлуатаційні властивості (особливо високотемпературні), їх можна використовувати в гальмових системах усіх типів при температурі довкілля від  $+50$  до  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Характеристика фізико-хімічних властивостей гальмових рідин наведена у табл. 11.1.

Таблиця 11.1

Характеристика фізико-хімічних властивостей рідин

Показник	БСК	«Нева»	«Томь»	«Роса», «Роса-3», «Роса ДОТ-4»
Зовнішній вигляд	Прозора рідина ярко червоного кольору	Прозора однорідна рідина жовтого кольору	Прозора однорідна рідина жовтого кольору	Прозора однорідна рідина жовтого кольору
В'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при t, °С:				
100, не менш	-	2,0	2,0	2,0
70, не менш	5,5	-	-	-
50, не менш	9,0	5,0	5,0	5,0
0, не більше	130	-	-	-
більш -40	-	1500	1500	1700
Низькотемпературні властивості	Після витримки 30 хв при – 40°С не повинно бути розшаро- вання	Після витримки 6 діб при – 40°С та 6 год при – 50°С не повинно бути осаду або розшаро- вання	Після витримки 6 діб при – 50°С не повинно бути осаду або розшаро- вання	-
Температура кипіння, °С, не нижче	115	190	205	260
Змінення при взаємо- дії з гумою, %:				
маси	1-5	-	-	-
об'єму	2-10	2-10	2-10	1-6
межі міцності	20	25	20	25
Температура кипіння рідини, що зволожена, °С, не нижче	-	-	140	155

Слід відмітити, що змішування гальмових рідин з паливом та оливами неприпустимо, бо ці нафтопродукти руйнують гумові вироби, що є причиною відмов гальмової системи.

Гідравлічні амортизатори різного типу заповнюють малов'язкими оливами. Ці рідини повинні мати добрі змащувальні та антикорозійні властивості, бути легко рухомими при всіх температурах використання, тобто мати гарну в'язкісно-температурну залежність та низьку температуру застигання.

Для забезпечення надійної роботи телескопічних амортизаторів необхідна рідина з високою термоокислювальною та механічною стабільністю, яка може тривалий час працювати, піддаючись значному механічному та термічному впливу при багатократному (десятки мільйонів циклів) витіканні через отвори клапанів та дроселів.

В якості амортизаційних рідин широко використовуються оливи АЖ-12Т, МГП-12 (Славол-АЖ) та ГРЖ-12, характеристики яких наведені у табл. 11.2.

Таблиця 11.2

Характеристика амортизаційних рідин

Показник	АЖ-12Т	МГП-12 (Славол-АЖ)	ГРЖ-12
Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, при температурі: 40 <sup>0</sup> С, не менш	-	-	16-20
50 <sup>0</sup> С, не менш	12,0	12,0	-
100 <sup>0</sup> С, не менш	3,6	3,8	3,9
-20 <sup>0</sup> С, не більше	-	800	800
-400С, не більше	6500	-	-
Температура, <sup>0</sup> С: спалахування, не нижче	165	140	140
застигання, не більше	-52	-50	-50
Щільність при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup> , не більше	-	917	917
Стабільність проти окислення: осад після окислення, %	відсутність	-	-
кислотне число до (після) окислення, мгКОН/г, не більше	0,04 (0,1)	-	-
Випробування на корозію	витримує	витримує	витримує

При низькій температурі навколишнього повітря (нижче  $-20...-25^{\circ}\text{C}$ ) для полегшення запуску двигуна використовують легкозаймисті пускові рідини. Вони повинні добре випаровуватися при низькій температурі та швидко запалюватися від блискавки або самозайматися від стиску, мати високі антикорозійні та протизношувальні властивості, низьку температуру застигання, бути стабільними при тривалому зберіганні.

На основі діетилового ефіру випускають легкозаймисту рідину “Холод Д-40” для дизелів та “Арктика” для бензинових двигунів (табл. 11.3).

Таблиця 11.3

Склад пускових рідин, %

Компоненти	“Холод Д-40”	“Арктика”
Діетиловий ефір, %	58-62	54-56
Газовий бензин, %	13-17	38-43
Ізопропилнітрат, %	13-17	2-4
Олива турбінна, %	9-11	1,5-2,5

Ефір має широку границю займання та невисоку температуру самозаймання у паливно-повітряній суміші. Додаток до пускової рідини для дизелів газового бензину (фракції з температурою кипіння  $30-100^{\circ}\text{C}$ ) та ізопропилнітрату дозволяє прискорити самозаймання та згорання головного палива, робить роботу дизеля під час пуску більш м’якою. У пусковій рідині “Арктика” для бензинових двигунів невелика кількість ізопропилнітрату прискорює підготовку ефіру та газового бензину до спалахування від іскри, а газовий бензин забезпечує плавний перехід до роботи на головному паливі. Турбінну оливу додають для зниження зносу під час пуску.



## 12. ОХОЛОДЖУЮЧІ РІДИНИ

### 12.1. Вимоги, що пред'являються до охолоджуючих рідин

Для забезпечення нормального теплового стану двигуна в процесі його роботи необхідно постійно відводити теплоту від високонагрітих деталей: головки та блоку циліндрів, поршнів, клапанів та ін. У залежності від типу двигуна та способу охолодження кількість теплоти, що відводиться, складає 25 - 30% загальної кількості теплоти, що виділяється при згорянні робочої суміші.

Наслідками перегріву двигуна можуть бути передчасне самозаймання робочої суміші, детонація, погіршення роботи системи змащування, зниження фізико-механічних властивостей матеріалів, інтенсивне утворення відкладень, заклинювання перегрітих деталей, пригоряння поршневих кілець та клапанів, підвищення витрат потужності на тертя.

Наслідками переохолодження можуть бути зниження індикаторної потужності двигуна, збільшення витрат потужності на тертя, погіршення сумішоутворення, підвищення зносу деталей циліндро-поршневої групи, розжиження моторної оливи та ін.

Таким чином, щоб умови роботи двигуна були нормальні, необхідно забезпечити певний тепловий режим, який характеризується заданим температурним діапазоном. Для забезпечення потрібного теплового режиму роботи двигуна використовують рідинне охолодження двигуна. Надійність та якість його роботи в значній мірі залежить від властивостей охолоджуючих рідин, до яких пред'являються такі вимоги:

- велика теплоємність;
- висока температура кипіння;
- низька температура замерзання;
- мінімальна схильність до утворення накипу;
- добрі антикорозійні властивості;
- сумісність з гумовими та пластиковими матеріалами;
- невелика вартість та широке розповсюдження.

В якості охолоджуючих рідин для двигунів використовуються, головним чином, низькозамерзаючі рідини (антифризи), а також вода.

## 12.2. Антифризи та вода

Антифризи можна використовувати при негативній температурі довкілля. Вони мають ряд переваг, але разом з цим не повністю відповідають вимогам, що до них пред'являються. Наприклад, у цих рідинах високий коефіцієнт розширення, що не дозволяє повністю заповнити систему охолодження, тому треба використовувати розширювальний бачок. Крім того, антифризи нерідко негативно впливають на ущільнювальні гумовотехнічні вироби та відносно дорогі. Але ж головна їх перевага – низька температура замерзання – забезпечує надійну роботу систем охолодження у достатньо широкому діапазоні негативних температур.

В якості антифризів для систем охолодження найбільше поширення отримала суміш етиленгліколю з водою. Температура замерзання такої суміші залежить від співвідношення компонентів. Найнижчу температуру замерзання ( $-75^{\circ}\text{C}$ ) має суміш, яка вміщає в собі 66,7% етиленгліколю та 33,3% води.

Промисловість випускає антифризи чотирьох марок: тосол А-40, тосол А-65, антифриз-40 та антифриз-65 (табл. 12.1).

Таблиця 12.1  
Характеристика низькозамерзаючих рідин

Показник	Тосол А-40	Тосол А-65	Антифриз 40	Антифриз 65
1	2	3	4	5
Зовнішній вигляд	Жовто-зелена рідина	Жовто-зелена рідина	Світло-жовта рідина	Світло-жовта рідина
Щільність при $20^{\circ}\text{C}$ , $\text{кг/м}^3$	1075-1085	1085-1095	1067-1072	1085-1090
Температура кристалізації, $^{\circ}\text{C}$ , не вище	-40	-65	-40	-65

Продовження табл. 12.1

1	2	3	4	5
Температура кипіння, °С, не нижче	105	105	100	100
Вміст етиленгліколю, мас, %, не менше	53	63	52	64
Присадки, г/л:				
декстрин	0,4	0,5	1,0	1,0
динатрійфосфат	-	-	2,5-3,5	3,0-3,5
протівспінювач	0,05	0,08	-	-
композиція антикорозійних з'єднувань	2,55	2,95	-	-

Слід мати на увазі, що антифризи на основі етиленгліколю мають сильні отрутні властивості, тому при роботі з ними потрібна особлива обережність.

Етиленгліколеві антифризи заливають у систему охолодження на 5-7% менше повного об'єму, тому що вони розширюються при нагріванні сильніше, ніж вода. Ці рідини мають непогані змащувальні властивості та не створюють накипу, оскільки при їх виготовленні використовують дистильовану воду.

Вода як охолоджуюча рідина використовується менше, ніж антифризи, але вона має певні переваги та й значні недоліки. Так, наприклад, висока температура замерзання ускладнює використання води взимку. Тому при негативних температурах навколишнього повітря виникає необхідність у випадку тривалої зупинки двигуна зливати воду з системи охолодження, інакше замерзла вода виведе її з ладу (тріщини у головці блоку циліндрів, руйнування трубок радіатора та ін.). При нетривалій зупинці двигун, щоб вода не замерзла, залишають працювати, що приводить до підвищеної витрати палива та збільшення зносу. Другий недолік обумовлюється наявністю в воді різних солей, які здатні у вигляді накипу відкладатися на поверхнях водяної оболонки двигуна, погіршуючи його охолодження у зв'язку з низькою теплопровідністю накипу. Крім того, вода викликає

корозію деталей системи охолодження, у тому числі, водяного насоса.

Схильність до утворення накипу залежить від жорсткості води, яку в експлуатаційних умовах можливо зменшити кип'ятінням, введенням до неї тринатрійфосфату, а також очищенням води пересувним глауконітовим фільтром або її магнітною обробкою. Використовується також метод введення в воду спеціальної присадки – антинакипину.

### **13. ТРАДИЦІЙНІ ШЛЯХИ ЕКОНОМІЇ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

У собівартості машино-зміни питома вага витрат на ПММ, що пов'язані з експлуатацією машин, становить до 30%. Внаслідок цього, а також з урахуванням дефіциту нафтопродуктів, їх економія стає досить значною.

Основні фактори, що визначають економію ПММ:

- підтримка машин у технічно справному стані;
- здійснення організаційно-технічних заходів, пов'язаних з комплектуванням загонів машин, нормуванням витрати ПММ, забезпечення ними будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин (БКВРМ) (доставка, зберігання, заправлення);
- зацікавленість операторів в економії ПММ, підвищення їхньої кваліфікації.

У питаннях підтримки БКВРМ у технічно справному стані основну роль грає своєчасне виконання контрольних-регулювальних робіт, проведення технічних обслуговувань і ремонтів.

Внаслідок поганого регулювання вузлів і механізмів машин перевитрата палива може досягати 102%, оливи - 247%. При цьому у випадку перегріву двигуна, негерметичності клапанів, порушення зазорів клапанного механізму, утворення нагару в камерах згоряння, залягання поршневих кілець, знаходження

карбюраторів у невідрегульованому стані перевитрата палива досягає 18%, а оливи - 30%. Порушення в роботі електросистем ведуть до перевитрати палива до 40%. Неправильне положення кришки повітряного фільтра (узимку, улітку), засмічення фільтра і впускного трубопроводу сприяють перевитраті палива до 3%, оливи - до 15%. Падіння тиску повітря в шинах і регулювання кутів установлення передніх коліс викликають перевитрату палива до 10%, оливи - до 10%. Неправильне регулювання гальм і підшипників маточин коліс викликає перевитрату палива до 20%, оливи - до 40%. Засмічення системи вентиляції картера двигуна спричиняє перевитрату оливи на вигар до 150%.

Будь-яка несправність у роботі машини викликає перевитрату палива та оливи. Наприклад, несправність однієї форсунки на двигуні екскаватора викликає перевитрату палива на 2,7%, бульдозера - на 7,9%. Застосування в гідросистемах робочих рідин більшої в'язкості, зношування гідроагрегатів сприяють перевитраті палива на екскаваторах до 3,5%, на бульдозерах - до 1,2%. Затуплення і зношення ріжучих крайок робочого устаткування приводить до перевитрати палива на екскаваторах до 1,1%, на бульдозерах - до 3,5%. Наведені дані переконливо свідчать про необхідність виконання технічного обслуговування і ремонтів машин відповідно до інструкцій щодо їх експлуатації, маршрутних технологій діагностування, виконання контрольних-регулювальних робіт, обслуговування і ремонту техніки.

Важливий резерв економії палива - правильне обкатування нових машин, що надходять в експлуатацію. Обкатування необхідно здійснювати відповідно до інструкцій по експлуатації машин заводів-виготовлювачів. Середня тривалість обкатування машин для автогрейдерів, автоскреперів і асфальтоукладальників - 60...70 год, автокранів, самохідних котків і екскаваторів - 65-74 год; компресорів, машин для влаштування цементобетонних покриттів, самохідних скреперів, електрозварювальних агрегатів - 40...60 год; бульдозерів і тракторів - 50...65 год; бетонозмішувачів - 30...35 год; причіпних машин (грейдерів, скреперів та ін.) - 20...30 год [44].

Досить важливо також виконання змащувальних операцій, використання мастильних матеріалів у відповідності до їх призначення.

Істотний вплив на економію ПММ роблять раціональне комплектування загонів машин для виконання окремих видів робіт, найбільш повне завантаження машин за потужністю, скорочення холостих пробігів і простоїв техніки. У деяких випадках загоны машин комплектують за критерієм мінімуму палива, що витрачається ними.

Недовикористання кожних 10% потужності машин збільшує витрату палива в середньому на 4-5%. Робота трактора вхолосту протягом 1...2 год у зміну за рік дає перевитрату палива 600 кг. Неправильно плановані маршрути перевезень, більші холості пробіги, недостатнє використання причепів і напівпричепів приводить до перевитрати палива до 15...30%.

Чималі втрати ПММ відзначаються при їхньому транспортуванні, зберіганні та заправленні машин. Так, заповнення автоцистерни бензином вище позначки за одну їздку приводить до втрати 10...12 кг пального, а нещільне закриття її горловини - до втрати 15...40 кг пального. Неповне завантаження резервуарів паливом і не фарбування його у світлі тони обумовлюють річні втрати палива внаслідок випару, що становлять 105...206 кг, а нещільне його закриття - до 2000 кг. Одна крапля бензину в секунду, що підтікає через нещільності у з'єднаннях, приводить до річних втрат палива до 1200 кг. Заправлення машин відкритим струменем (цебром) дають втрати палива до 200 кг у рік. Заправлення оливи кухлем за одне заправлення веде до втрати 0,2...0,25 кг масла, а заправлення солідолу вручну без шприців - у середньому 17-20%. Викладене варто враховувати при транспортуванні, зберіганні та заправленні машин ПММ. Для перевезення, зберігання і видачі ПММ можна використовувати спеціалізовані засоби і устаткування.

Важлива складова економії мастильних матеріалів - науково обґрунтоване продовження строків їхнього використання і регенерація. Відпрацьовані нафтопродукти підлягають збору і здачі їх на нафтобази за встановленою вартістю.

Чималу роль у дотриманні норм витрати ПММ, їхній економії грає зацікавленість операторів машин та їхня кваліфікація. Для стимулювання зацікавленості механізаторів в економії ПММ варто використати матеріальні та моральні фактори. Наприклад, позитивні результати дав досвід підприємств Угорщини, де відповідно до встановлених норм водії одержують гроші для оплати заправлення машин ПММ, і кошти, що залишаються в результаті їхньої економії, переходять у їхнє розпорядження. Необхідно також широко пропагувати досвід передових робітників, що домоглися найбільших успіхів в економії паливо-мастильних матеріалів.

Рух автомобіля без використання накатів у припустимих випадках, перевищення або зниження швидкості приводять до перевитрати палива на 5-25%, тривалий рух автомобіля на проміжних передачах та із включеним переднім мостом - на 15-20%, неправильні перемикання передач, розгін і гальмування - на 35...40% [44].

Таким чином, можна зробити висновок, що головним резервом економії ПММ є підтримка техніки у справному стані, висока кваліфікація персоналу, що її обслуговує, а також зацікавленість в цьому робітників, які пов'язані з експлуатацією БКВРМ.

#### **14. АЛЬТЕРНАТИВНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗБІЛЬШЕННЯ СТРОКІВ СЛУЖБИ ЗМАЩУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТРИБОВУЗЛІВ БУДІВЕЛЬНИХ, КОЛІЙНИХ ТА ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНИХ МАШИН**

Існуючі в теперішній час методи та засоби збільшення строків служби змащувальних матеріалів та підвищення експлуатаційної надійності трибовузлів будівельних, колійних, перевантажувальних та інших машин відносно непогано виконують свої функції. До цих методів та засобів можна віднести підвищення якості виготовлення як складових частин, так і самих машин (у тому числі, покращення якості складання),

використання високоякісних конструкційних та експлуатаційних матеріалів, фільтрація оливо та інших змащувальних рідин від механічних домішок (частинок пилу, зносу та води), підвищення культури експлуатації (витримування регламенту технічного обслуговування, підтримка машин у справному стані, а також припустимих режимів їх роботи, своєчасна заміна змащувальних матеріалів на свіжі та ін.) Але незважаючи на це, строки служби дорогих та у деяких випадках дефіцитних експлуатаційних матеріалів та зносостійкість трибовузлів машин залишаються недостатніми. Тому в останні роки вченими та конструкторами ведуться пошуки нових альтернативних методів та засобів збільшення строків служби змащувальних матеріалів та підвищення експлуатаційної надійності трибовузлів машин, у тому числі, будівельних, колійних та перевантажувальних.

#### **14.1. Гідродинамічне диспергування моторних оливо, робочих рідин та дизельного палива**

Ще в 40-х роках минулого сторіччя вперше була висловлена гіпотеза про те, що продукти окислення моторної оливи – асфальтени, карбени, карбоїди та ін., знаходячись у високодисперсному стані між трибоповерхнями, справляють буферний вплив, знижуючи таким чином силу тертя та зношування. Саме тому виникла ідея штучно подрібнювати до розмірів 5 мкм та менше не тільки продукти окислювання оливо, але й частинки зносу та пилу, які завжди наявні в оливі, робочій рідині та дизельному паливі з метою покращення їх протизношувальних та інших властивостей під час експлуатації. Такі високодисперсні частинки дійсно здатні покращити властивості вищезазначених рідин в силу таких причин:

високодисперсні частинки розміром 5мкм та менше адсорбують на себе ПАР - продукти окислення оливи та розділяють таким чином трибоповерхні одну від одної, справляють буферний вплив і не дряпають їх, тобто виконують функції протизношувальної присадки [36,40 та ін.];



відкладаючись у мікрозападинах трибоповерхонь, такі частиночки нівелюють їх, знижуючи таким чином питомий тиск та можливість мікросхоплювання поверхонь [40 та ін.];

високодисперсні частинки сприяють «перетіканню» електростатичних зарядів трибоелектрики з однієї трибоповерхні на іншу, знижуючи, таким чином, електростатичну складову зношування [40 та ін.].

Деякі дослідники наводять і інші причини позитивного впливу високодисперсних частинок зносу та пилу на експлуатаційні властивості змащувальних рідин.

Як відмічалось вище, практично в усіх трибоагрегатах для очищення змащувальних олив існують системи очищення їх від механічних домішок різного походження. Але ніякі фільтруючі пристрої не гарантують наявності в змащувальних рідинах частинок, розміри яких більше ніж 5мкм, тому стає очевидним те, що ті частинки механічних домішок, які без перешкод пройшли фільтроелементи, треба штучно роздрібнювати (диспергувати) до потрібних розмірів. Для цього були створені спеціальні пристрої – диспергатори, які відрізняються один від одного конструктивно в залежності від механізму впливу на частинки забруднень.

За механізмом впливу на частинки диспергування може бути здійснено двома способами: за рахунок ударних хвиль, які виникають при утворенні кавітаційних порожнин (ультразвукові та кавітаційні) та за рахунок удару об перепону частинок, які рухаються у потоці з оливою (гідродинамічні диспергатори).

Вибір типу диспергуючого пристрою повинен здійснюватися з позиції максимальної його простоти та надійності конструкції, а також досягнення ефекту, що очікується, при мінімальних енергетичних витратах.

Аналіз конструкцій, принципів роботи та технічних характеристик диспергаторів показує наступне.

Використання в двигунах внутрішнього згоряння та в об'ємних гідроприводах диспергуючих пристроїв, які працюють в діапазоні ультразвукових хвиль, небажано, тому що це може привести до механічної деструкції молекул вуглеців олив, що

супроводжується зниженням їх в'язкості (іноді повною витратою) та погіршенням змащувальної здатності [40].

Що стосується робочих рідин, які використовуються в гідроприводах, то слід відмітити наступне. Як вже відмічалось в підрозділі 6.1, робочі рідини працюють в умовах високих тисків, тобто при високих напругах зсуву, особливо при дроселюванні з великим перепадом тиску. Це приводить до молекулярно-структурних змінень рідин, які суттєво обмежують час їх експлуатації. Накладення на рідину, крім вказаного, додаткових полів збільшить інтенсифікацію процесу деструкції, що підтверджується спеціально проведеними експериментами [45 та ін.].

Недоліками ультразвукових диспергаторів, крім того, є необхідність їх регулювання перед та під час експлуатації, висока чутливість до змінення тиску, внаслідок чого порушується ультразвуковий режим та якість диспергування. Є також відомості про недостатній строк служби пластинки, що резонує.

Доцільність використання в двигунах внутрішнього згорання та об'ємних гідроприводах диспергаторів, які здійснюють здрібнювання домішок за рахунок створення в оливі чи робочій рідині зон активної кавітації, також викликає сумніви, бо при кавітації під час схлопування пухирців газу та пару виникають високі локальні температури (1273-1773 К) та тиск (150-200 МПа). Все це шкідливо для оливи та робочої рідини, оскільки при таких температурах інтенсивно здійснюються крекінг-процеси, які приводять до зменшення молекулярної маси оливи і робочої рідини та їх окислення, при якому створюються лаки, смоли та ін. Високий тиск, як вже відзначалося, прискорює деструкцію молекул вуглеців. Крім того, при кавітації інтенсивно виділяється повітря та відбувається ерозія деталей [45 та ін.].

Найбільш доцільно використовувати в двигунах внутрішнього згорання та об'ємних гідроприводах гідродинамічні диспергатори (ГД), які розроблені кафедрою БКВРМ УкрДАЗТ та при порівняно простій конструкції та технологічності не викликають деструкції молекул вуглеців, не потребують підготовки та регулювання перед та під час експлуатації, ефективність їх при зміненнях тиску не знижується.

ГД економічний з енергетичної точки зору, не викликає труднощів при вбудовуванні, довговічність його вище, ніж ультразвукових та кавітаційних диспергаторів. Крім того, в результаті обробки за допомогою ГД не тільки подрібнюються до потрібних розмірів частинки забруднень, але й відбувається механо-хімічна активація оливи та робочої рідини, яка приводить до додаткового покращення їх протизношувальних властивостей. Це обумовлено тим, що при гідродинамічному диспергуванні в зоні удару відбувається нагрів оливи та робочої рідини. Нагрів пов'язаний з в'язким тертям, головним чином, в соплі ГД. Така своєрідна термообробка приводить до структурних перетворень, які впливають на об'ємні та поверхневі властивості оливи та робочої рідини. Внаслідок цього відбувається інтенсивна адсорбція ПАР на трибоповерхнях, яка приводить до створення на них щільнопакованих межових плівок, що забезпечують надійно відділення трибоповерхонь одної від іншої, тобто зниження зносу.

На рис. 14.1 наведена принципова схема ГД. Олива чи робоча рідина з частинками поступає в конічне сопло 1, розганяється до великої швидкості та ударяється об перепону 2. В результаті удару частинки диспергуються, після чого олива або робоча рідина через проріз 3 поступає до системи. Наявність ГД не виключає використання традиційних оливоочисних пристроїв.

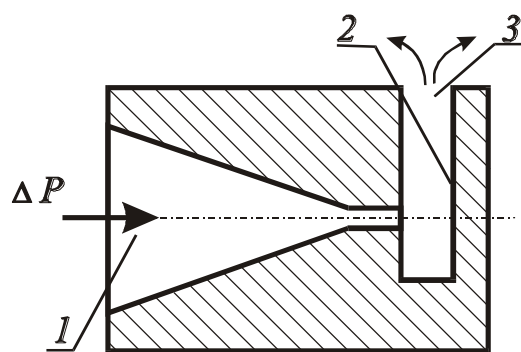


Рис. 14.1. Принципова схема ГД:

1-сопло; 2-перепона; 3-проріз

Для диспергування частинок зносу та пилу їх необхідно розігнати до певної швидкості, величину якої можна визначити з виразів [6].

Для частинок зносу:

$$V_{\min} = \frac{\pi}{4} \cdot c \cdot \frac{\sigma_{\text{пч}}}{E} \cdot \frac{1}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1}}, \quad (14.1)$$

де  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  ( $E$  – модуль пружності,  $\rho = \gamma/g$  – масова щільність матеріалу частинки зносу);  
 $\sigma_{\text{пч}}$  – межа міцності матеріалу частинки зносу.

Для частинок пилу:

$$V_{\min} = \left\langle \frac{2.22 \cdot 10^3 \cdot \sigma_{\text{пч}} \cdot \left[ (1 - \mu_1^2) \cdot E_2 + (1 - \mu_2^2) \cdot E_1 \right]^2}{b \cdot E_1^2 \cdot E_2^2} \right\rangle^{3/2}, \quad (14.2)$$

де  $\sigma_{\text{пч}}$  – межа міцності частинки пилу;  
 $\mu_1, \mu_2$  – коефіцієнти Пуассона, відповідно, частинки пилу та матеріалу перепони;  
 $E_1, E_2$  – модулі пружності, відповідно, частинки пилу та матеріалу перепони.  
 $b$  – константа, яка визначається за виразом

$$b = \frac{2 \cdot E_1}{3 \cdot (1 - \mu_1^2)} \cdot \left[ \frac{1,41 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot (1 - \mu_1^2)}{g \cdot E_1} \right]^{3/5}. \quad (14.3)$$

На підставі аналізу конструкцій трибовузлів та умов їх роботи в двигунах внутрішнього згорання та гідروприводах були обрані матеріали, які використовуються в них та мають найбільші значення межі міцності. Для цих матеріалів, а також для частинок пилу були проведені відповідні розрахунки за формулами (14.1) та (14.2). Результати цих розрахунків показали, що для

руйнування частинок зносу трибовузлів двигунів достатньо, щоб перепад тиску  $\Delta p$  на ГД був не менше 0,12 МПа. В гідроприводах з лопатевими насосами  $\Delta p$  повинно бути не менше 0,44 МПа, а з аксіально-поршневими типу НАР – не менше 0,18 МПа. При використанні насосів типу Г15 з штовхальниками із сталі ХВГ перепад тиску повинен складати не менше 0,9 МПа.

Такі перепади тиску для руйнування частинок зносу цілком реально створити при вбудуванні ГД в систему змащування двигунів внутрішнього згоряння та гідропривода. Але для диспергування частинок пилу, як показують розрахунки, необхідно, щоб  $\Delta p$  на ГД був не менше 26,5 МПа, що неможливо забезпечити при вбудуванні його в будь-яку систему. Але за експериментальними даними, руйнування частинок пилу в оливі або робочій рідині відбувається при значно менших перепадах (0,25 МПа), що обумовлено такими обставинами. ПАР, які завжди наявні в оливах та робочих рідинах, адсорбуються не тільки на трибоповерхнях, але й на частинках, які мають розгалужену структуру та багато мікротріщин, усередині яких активно адсорбуються ПАР. Вони, у відповідності до ефекту П.О. Ребіндера, створюють розклинюючий вплив, який сприяє «розчепленню» частинок при навіть невеликому механічному навантаженні. За певними умовами може мати місце навіть мимовільне диспергування частинок [46]. Удар частинок зносу та пилу об перепону ГД і є тим механічним впливом на частинки, якій сприяє їх диспергуванню при значно менших тисках. Крім того, слід відмітити, що при розрахунках мінімально необхідних швидкостей ми виходили з того, що частинки зносу мають такі ж фізико-механічні властивості, як і власне метал, з якого ці частинки були зняті. Насправді під час зняття з поверхонь тертя частинок зносу з ними відбуваються певні процеси, які приводять до скривлення кристалічних ґрат, перебудування дефектів металу та, як наслідок, змінення фізико-механічних характеристик цих частинок.

Для обробки олив та робочих рідин за допомогою ГД було розроблено спеціальний стенд (принципова схема – див. рис. 14.2), який виключає можливість диспергування частинок елементами стенда, у тому числі, насосом.

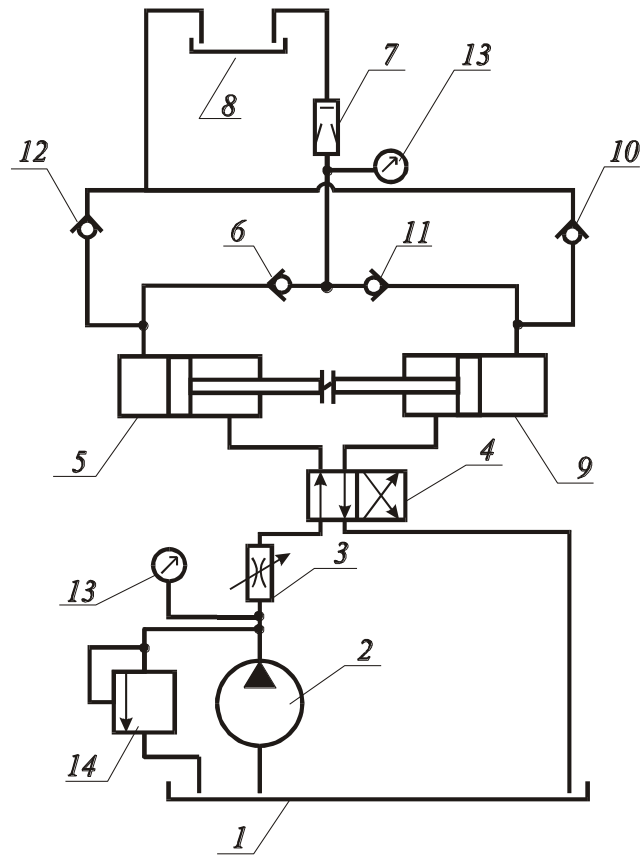


Рис. 14.2. Гідравлічна схема стенда для обробки олив та робочих рідин ГД:

- 1,8 - гідробак; 2 - насос; 3 - дросель, який регулюється;  
 4 - двопозиційний розподільник; 5, 9 - гідроциліндр;  
 6, 10, 11, 12 - зворотний клапан; 7 - ГД; 13 - манометр;  
 14 - запобіжний клапан

Принцип роботи стенда наступний. Олива чи робоча рідина з гідробака 1 за допомогою аксіально-поршневого насоса 2 через дросель 3, що регулюється, подається під тиском до двопозиційного гідророзподільника 4, який перебуває в першій позиції (як показано на рис. 14.2), відкіля поступає в штокову порожнину гідроциліндра 5, поршень якого, переміщуючись ліворуч, подає оливу чи робочу рідину, які знаходяться в поршневій порожнині, через зворотний клапан 6 до ГД 7, відкіля олива чи робоча рідина потрапляє до гідробака 8, який заповнено оливою чи робочою рідиною, які обробляються.

Одночасно поршень гідроциліндра 9, шток якого жорстко зв'язаний із штоком гідроциліндра 5, виштовхує оливу чи робочу рідину через гідророзподільник 4 до гідробака 1. При цьому олива чи робоча рідина, що обробляються, через зворотний клапан 10 потрапляє з гідробака 8 в поршневу порожнину гідроциліндра 9. Якщо поршень гідроциліндра 5 займе крайнє ліве положення, спрацьовують кінцеві вимикачі та гідророзподільник 4 переміщується у другу позицію. Після цього з гідробака 1 олива чи робоча рідина потрапляє до штокової порожнини гідроциліндра 9, а олива чи робоча рідина, що обробляються, з поршневої порожнини через зворотний клапан 11 подається до ГД 7, а потім в гідробак 8.

Одночасно поршнева порожнина гідроциліндра 5 через зворотний клапан 12 заповнюється оливою чи робочою рідиною, що обробляється, з гідробака 8, а зі штокової порожнини через гідророзподільник 4 олива чи робоча рідина зливаються до гідробака 1. Швидкість переміщення поршнів гідроциліндрів, тиск нагнітання та перепад тиску на ГД регулюються дроселем 3 та фіксуються манометром 13. Насос 2 від перенавантаження охороняється клапаном 4.

На цьому стенді були визначені закономірності диспергування за допомогою ГД частинок забруднень у відпрацьованій оливі И-Г-А-32, яка мала 16-й клас чистоти за ГОСТ17216-71. Перепад тиску оливи на ГД складав від 0,3 МПа до 0,9 МПа. В якості критерію ефективності диспергування було прийнято коефіцієнт  $K_j$  протизношувальних властивостей оливи у зв'язку з гранулометричним складом забруднень, що входять до неї [14]:

$$K = \frac{\delta_5 \cdot 5}{\delta_{5-10} \cdot 10 + \delta_{10-25} \cdot 25 + \delta_{25-50} \cdot 50 + \delta_{50-100} \cdot 100 + \delta_{100-200} \cdot 200 + \delta_{\text{вол}} \cdot 400}, \quad (14.4)$$

де  $\delta_5$  – число частинок забруднень розміром 5 мкм та менше в 100 см<sup>3</sup> оливи.

Результати цих випробувань показали, що при гідродинамічному диспергуванні при кожному перепаді тиску існує максимальне значення числа циклів  $N$ , перевищення якого не приводить до подальшого зменшення розмірів частинок, тобто настає стаціонарний стан гранулометричного складу, який відомий під назвою “рівновага Хьюттига”. При цьому при максимальних значеннях числа циклів кількість частинок 5мкм та менш збільшується у залежності від перепаду тиску на ГД в 3,8-4,6 разів (видима частина в окулярі мікроскопа), а число частинок розміром більш 5мкм знижується в 5,5-6,3 разів.

На рис. 14.3 в якості прикладу наведені гістограми кількості частинок розміром 5 мкм та менше, а також від 5 до 10 мкм до та після диспергування при різних перепадах оливи на ГД, відповідно.

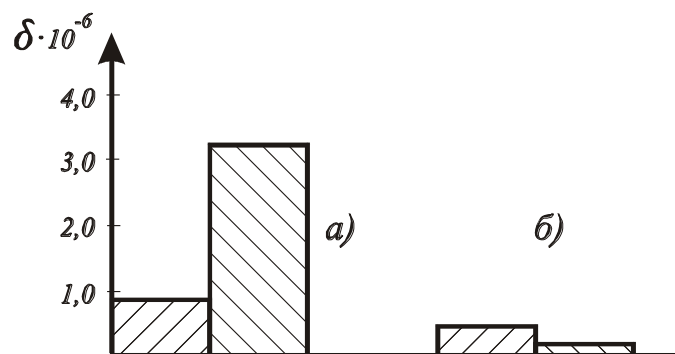


Рис. 14.3. Кількість частинок забруднень 5мкм та менше (а) та 5-10 мкм (б) в 100 см<sup>3</sup> відпрацьованої оливи И-Г-А-32 у початковому стані ( $\Delta p=0$ ) та після диспергування

Комп’ютерна обробка отриманих результатів дозволила установити, що змінення коефіцієнта  $K_j$  при гідродинамічному диспергуванні описується експоненціальною залежністю

$$K_j = A \cdot e^{BN}, \quad (14.5)$$

де  $A$  і  $B$  – безрозмірні коефіцієнти, величина яких залежить від перепаду тиску на ГД (табл. 14.1).



Таблиця 14.1

Величина коефіцієнтів А і В в рівнянні 14.5

Коефіцієнт	$\Delta p=0,3\text{МПа}$	$\Delta p=0,5\text{МПа}$	$\Delta p=0,7\text{МПа}$	$\Delta p=0,9\text{МПа}$
А	0,298	0,268	0,358	0,383
В	0,156	0,272	0,321	0,392

Антифрикційні та протизношувальні властивості моторних олив та робочих рідин визначалися на машинах тертя СМЦ-2, ПТЛК та МАСТ-1. При цьому сполучення матеріалів зразків було таким: бронза БрАЖ9-4-сталь 38ХС, сталь ШХ-15-сталь ШХ-15, чавун ВЧ-сталь 18ХГТ, бронза БрАЖ9-4-сталь ШХ-15, БрАЖ9-4-чавун ВЧ (машина тертя СМЦ-2, схема випробувань “колодка-ролик”,  $V_{ск}=1,1\text{м/с}$ ), сталь ШХ-15-сталь ШХ-15 (машина тертя ПТЛК, схема випробувань “диск-диск”,  $V_{ск}=0,3\text{м/с}$ ) і сталь ШХ-15-сталь ШХ-15 (машина тертя МАСТ-1, схема випробувань – чотирикулькова).

Указані швидкості ковзання та сполучення матеріалів широко використовуються в двигунах внутрішнього згорання, а також в гідроприводах різного призначення.

Результати випробувань показали, що коефіцієнт тертя  $f$  та знос зразків менше при змазуванні їх обробленими ГД свіжими оливами та оливами, що працювали раніш. Наприклад, при випробуваннях на машині тертя СМЦ-2 після обробки за допомогою ГД свіжої оливи И-Г-А-32 підсумковий знос колодки та ролика зменшився у середньому в 1,4 рази, а величина  $f$  – в 1,15 рази.

Аналогічні результати були отримані на цій же машині при випробуваннях інших олив та сполучень матеріалів пар тертя.

Глибина канавки зносу дисків на машині тертя ПТЛК зменшилась у 1,65 рази, а на МАСТ-1 діаметр плями зносу куль знизилась у 1,3 та 1,22 рази при використанні, відповідно, оброблених свіжих олив та олив, що працювали раніш.

На рис. 14.4 в якості прикладу наведені гістограми відносної зносостійкості зразків при використанні оливи И-Г-А-32.

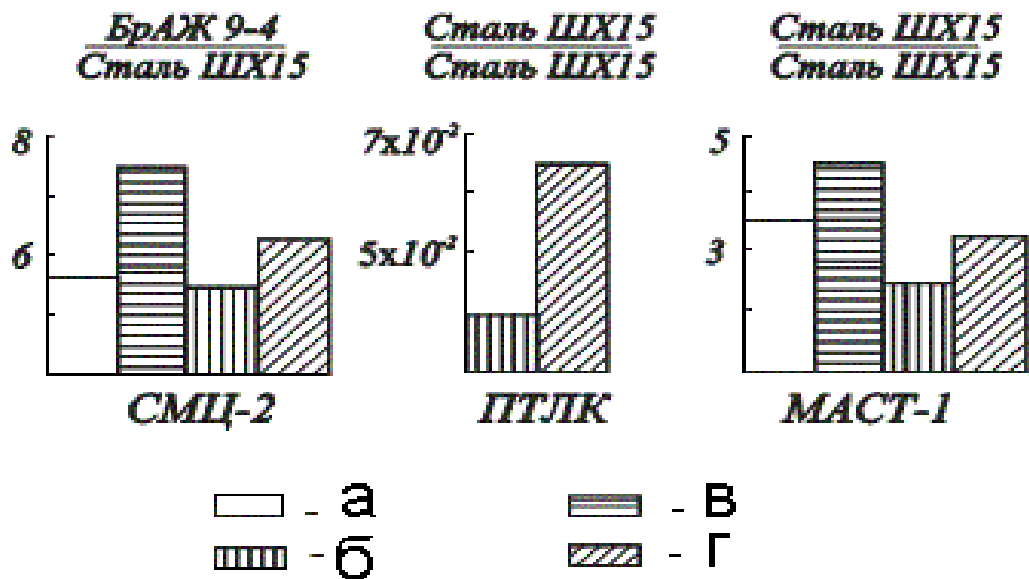


Рис. 14.4. Гістограми відносної зносостійкості зразків на машинах тертя:

а- свіжа олива; б – олива, що працювала; в – свіжа, оброблена ГД, олива; г - олива, що працювала, а потім була оброблена ГД

Як відзначалося вище, при гідродинамічному диспергуванні відбувається нагрівання оливи за рахунок її в'язкісного тертя. Дослідження показали (рис. 14.5), що чим вище тиск оливи перед ГД, тим більше її температура.

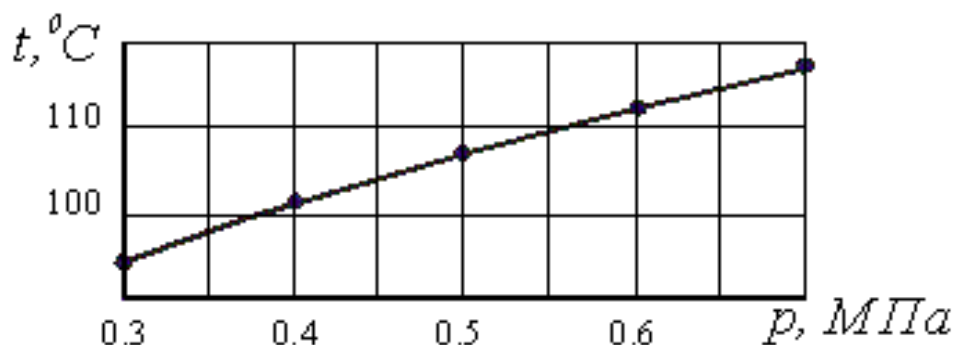


Рис. 14.5. Змінення температури в зоні сопла ГД в залежності від тиску оливи

Як видно з наведеного графіка, олива при гідродинамічному диспергуванні нагрівається до дуже значних температур: від  $93^{\circ}\text{C}$  при  $\Delta p=0,3$  МПа до  $117^{\circ}\text{C}$  при  $\Delta p=0,7$  МПа. В результаті цього з оливи виводиться вода та паливо, які забруднюють її під час експлуатації двигуна. Підтвердженням цього є результати таких досліджень.

До свіжої оливи М-14-В<sub>2</sub>, яка широко використовується у дизелях, штучно була введена вода в об'ємній концентрації 0,5%, після чого колба з обводненою пробєю оливи була поставлена на відстій. Остання порція оливи була розділена на п'ять частин, чотири з яких були оброблені ГД при перепадах тиску на ньому 0,3; 0,4; 0,5 та 0,6 МПа, а п'ята суміш оливи з водою була контрольною та використовувалася для порівняння. Через кожні 10 циклів N обробки відбиралися проби оливи для аналізу вмісту води.

Результати візуального огляду проб оливи, які були поставлені на відстій, показали, що вже через три години проба обводненої оливи, яка не диспергувалася, розшарувалася: верхній шар висотою близько 2,5 мм мав природний колір свіжої оливи, а середній шар висотою 14 мм – світло-жовтого кольору. Нижній шар висотою 12 мм має сірий колір, який характерний для присадок, які внаслідок своєї високої гігроскопічності виявилися в осаді. У колбі з обводненою оливою М-14-В<sub>2</sub>, яка була піддана гідродинамічному диспергуванню, олива мала такий же колір, як і свіжа без води, та навіть через два місяці відстою розшарування оливи та видалення з неї осаду не спостерігалось.

Одночасно з цим відновлюється й кінематична в'язкість оливи: якщо у свіжої вона була  $15,74$  мм<sup>2</sup>/с, то у обводненої оливи в'язкість склала  $15,08$  мм<sup>2</sup>/с, а після гідродинамічного диспергування –  $15,68$  мм<sup>2</sup>/с.

Результати аналізів проб на вміст води (рис. 14.6) показали, що якщо обводнену оливу піддати гідродинамічному диспергуванню при тиску перед ГД 0,3 МПа, то видалення води відбувається з відносно невеликою швидкістю, що обумовлено тим, що температура оливи ( $95^{\circ}\text{C}$ ), мабуть, є недостатньою для інтенсивного видалення води. Збільшення тиску перед ГД до 0,4 МПа, коли температура оливи в зоні перепони приблизно через 40 циклів обробки досягає стабільного значення (близько

104<sup>0</sup>С), приводить до повного очищення від води за 68 циклів, а при  $p = 0,5$  МПа (температура оливи близько 108<sup>0</sup>С) достатньо 49, а при  $p = 0,6$  МПа – 35 циклів ( $t = 112^0$ С) обробки для повного видалення води. У зв'язку з цим з точки зору мінімізації енерговитрат на роботу ГД оптимальним слід вважати тиск перед ГД  $p = 0,5$  МПа.

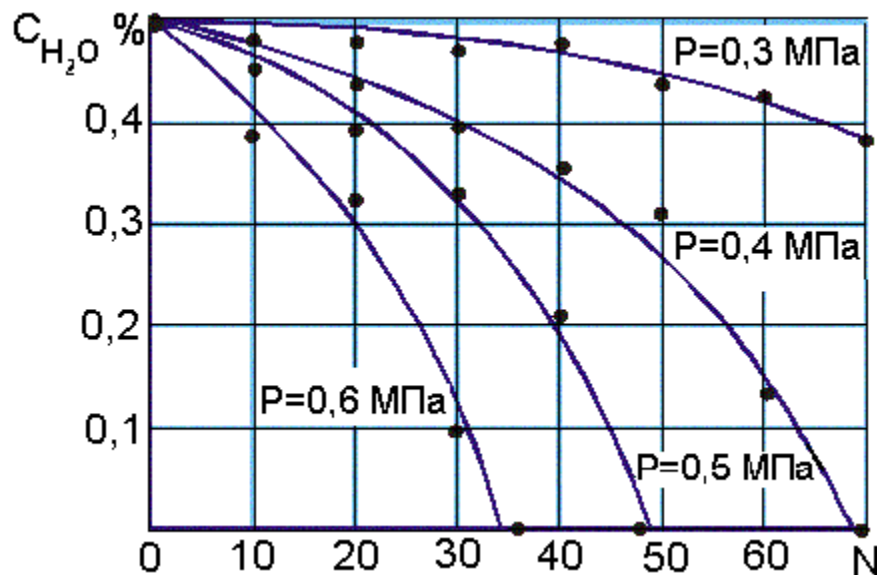


Рис. 14.6. Змінення вмісту води ( $C_{H_2O}$ ) в обводненій оливі М-14-В<sub>2</sub> у залежності від числа циклів диспергування

Отже, в реальних умовах експлуатації, коли в оливі міститься вода, тиск перед ГД повинен бути більше, ніж 0,3 МПа.

Аналогічним чином з моторної оливи при гідродинамічному диспергуванні видаляється паливо. Підтвердженням цього є результати наступних досліджень.

До свіжої оливи М-14-В<sub>2</sub> штучно було уведено дизельне паливо в об'ємній концентрації 12%. Після ретельного перемішування суміші пробірка з першою пробою була поставлена на відстій, а друга проба була піддана аналізу, при виконанні якого визначалися кінематична в'язкість суміші при 100<sup>0</sup>С і температура спалахування у відкритому тиглі. Після цього було приготовлено ще чотири суміші з паливом, три з яких були оброблені ГД при тиску 0,3; 0,4 та 0,5 МПа та числі циклів обробки  $N=70$ . Четверта суміш була контрольною та

використовувалася для порівняння. Через кожні десять циклів обробки проводився відбір проб суміші для аналізу. Крім того, дві проби після 20 та 50 циклів обробки при  $p=0,5$  МПа були поставлені на відстій.

Виявилось, що проби оливи з паливом помутніли та лише верхній її шар висотою 12 мм (загальна висота проби у пробірці близько 80 мм) має природний колір свіжої оливи. Але вже після двадцятиразового диспергування суміш оливи з паливом стала більш прозорою та практично набула початкового кольору. Після п'ятидесятиразової обробки олива за оптичною щільністю та кольором не відрізнялася від свіжої до уведення палива.

Результати аналізу проб сумішей оливи з паливом показали, що якщо початкова проба мала кінематичну в'язкість при  $100^{\circ}\text{C}$   $\nu=9,61$   $\text{мм}^2/\text{с}$  та температуру спалахування  $t_{\text{сп}}=165^{\circ}\text{C}$ , то по мірі збільшення числа  $N$  циклів диспергування величина цих показників лінійно підвищується, причому, чим вище тиск оливи перед ГД, тим інтенсивніше зростання  $\nu$  та  $t_{\text{сп}}$ . При цьому обробка проб при усіх тисках перед ГД приводить до відновлення кінематичної в'язкості та температури спалахування, практично, до рівня свіжої оливи, але при різних циклах обробки. Так, наприклад, при  $p=0,5$  МПа та  $N=50$  (оптимальний режим диспергування для видалення води з оливи) кінематична в'язкість склала  $14,72$   $\text{мм}^2/\text{с}$ , а температура спалахування –  $243^{\circ}\text{C}$  (у свіжій оливи без палива, відповідно,  $15,74$   $\text{мм}^2/\text{с}$  та  $245^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 14.7).

Це свідчить про те, що в результаті гідродинамічного диспергування з розрідженої оливи практично повністю видалено паливо.

Якщо прийняти до уваги, що згідно з технічними умовами на оливу М-14-В<sub>2</sub> кінематична в'язкість її при  $100^{\circ}\text{C}$  повинна, у середньому, бути  $14$   $\text{мм}^2/\text{с}$ , то, провівши на графіку (рис. 14.7) горизонтальну пунктирну лінію, яка відповідає цьому значенню в'язкості, можна зробити висновок: щоб в'язкість оливи досягала  $14$   $\text{мм}^2/\text{с}$ , необхідно її обробляти 43 рази при  $p=0,5$  МПа.

Таким же чином, провівши на графіку горизонтальну пунктирну лінію, яка відповідає  $200^{\circ}\text{C}$  (мінімально припустима температура спалахування у відкритому тиглі оливи), можна зробити висновок: щоб показник досяг  $200^{\circ}\text{C}$ , необхідно обробляти оливу при  $p=0,5$  МПа приблизно 23 рази.

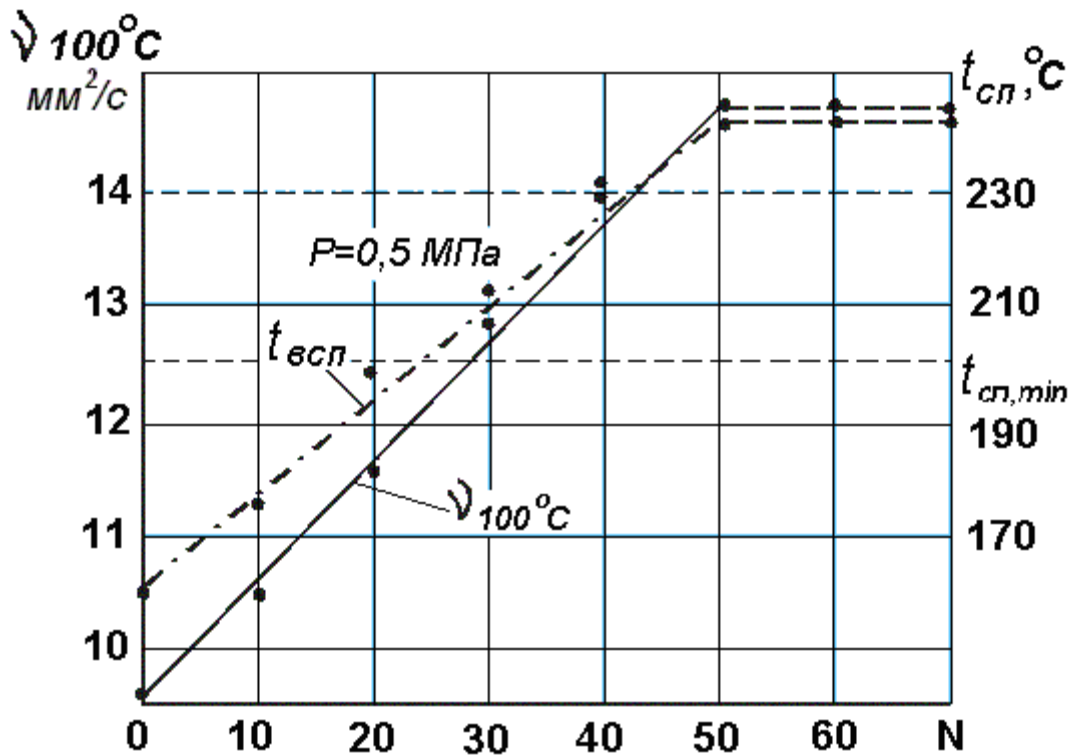


Рис. 14.7. Зміння в'язкості та температури спалахування суміші свіжої оливи М-14-В<sub>2</sub> з дизельним паливом в залежності від числа циклів обробки та тиску перед ГД

Приймаючи до уваги, що для повного видалення води з оливи тиск перед ГД повинен складати не менше 0,5МПа, то обробка розрідженої оливи при такому режимі диспергування з числом циклів  $N=23$  хоча й дозволить отримати мінімально припустиме значення температури спалахування, але за величиною кінематичної в'язкості ця олива не буде відповідати технічним умовам: через  $N = 23$  в'язкість буде дорівнювати приблизно 12 мм<sup>2</sup>/с. Якщо при  $p = 0,5$  МПа і  $N_{\text{обр}} = 43$ , то при величині  $\nu = 14$  мм<sup>2</sup>/с олива буде мати температуру спалахування приблизно 232°С, що на 13° нижче, ніж у свіжій оливі. Але при цьому тиску  $p$  та числу обробки  $N$  з оливи не буде в повній мірі видалена вода. Тому доцільно збільшити число циклів обробки до п'ятдесятьох при  $p = 0,5$ МПа, коли температура спалахування досягне 243°С (на 2° нижче, ніж у свіжої), кінематична в'язкість буде складати 14,5мм<sup>2</sup>/с, а вміст води в оливі буде дорівнювати нулю.

Таким чином, для забезпечення ефективного диспергування частинок забруднень в оливі та видалення з неї води та палива необхідно, щоб тиск складав не менше 0,5 МПа при числі циклів оброки 50.

Розглянемо результати стендових випробувань тракторного дизеля Д-21А.

До початку випробувань двигун був прироблений та мав стабільні показники потужності та економічності.

Випробування проводились у чотири етапи: на першому та третьому двигун працював без ГД, а на другому та четвертому – з ГД, який був установлений в горловину, куди заливається олива (рис. 14.8). Олива у ГД поступала під тиском 0,35 МПа через шланг з каналу, що підводить оливу до центрифуги. При цьому олива не фільтрувалася, тому що був знятий ротор центрифуги.

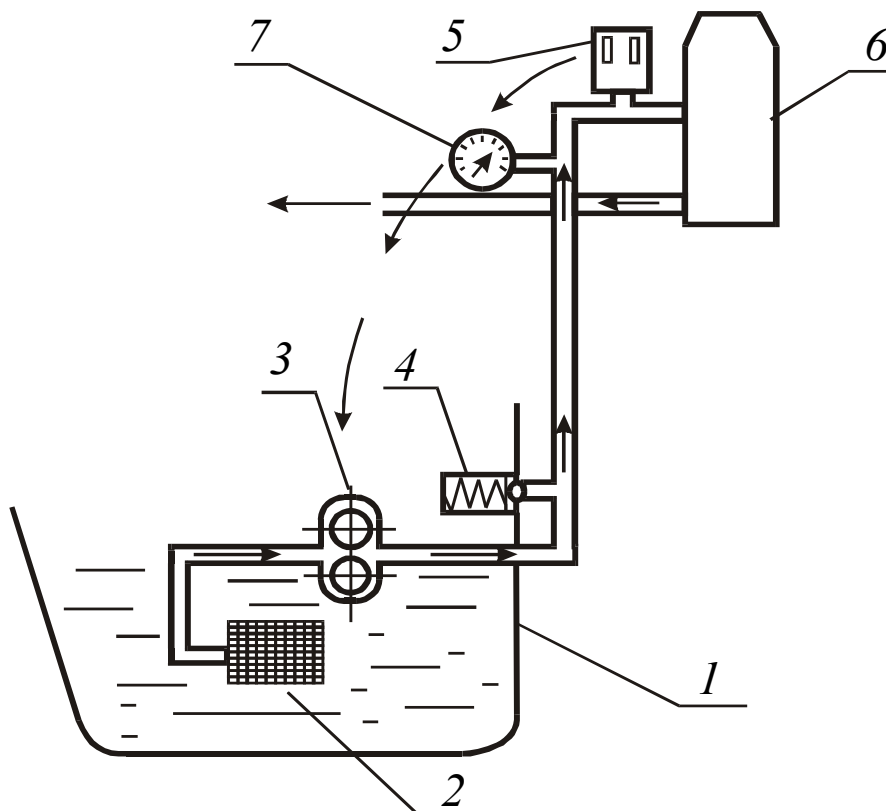


Рис. 14.8. Схема установки ГД в систему змащення тракторного дизеля Д-21А:

1 - піддон картера; 2 - сітка оливоприймача; 3 - насос;  
4 - редукційний клапан; 5 - ГД; 6 - центрифуга; 7 - манометр

Використовувалась олива М-10-Б<sub>2</sub>, яка відпрацювала раніш у дизелях Д-21А повний строк служби (240 маш.год). Вихідна характеристика цієї оливи наведена у табл. 14.2.

Таблиця 14.2

Вихідна характеристика оливи М-10-Б<sub>2</sub> до випробувань

Кислотне число, мгКОН/г	Лужне число, мгКОН/г	Вміст механ. домішок органіч. походження, %	Вміст механ. домішок неорган. походження, %	ДСЗ* при 20 <sup>0</sup> С	ДСЗ* при 100 <sup>0</sup> С	Кінемат. в'язкість при 100 <sup>0</sup> С, мм <sup>2</sup> /с
0,66	0,58	0,62	0,37	0	0	14,3
* ДСЗ - диспергуючо-стабілізуєча здатність оливи.						

Під час випробувань двигун працював за номінальним режимом. При цьому періодично контролювалися показання гідрогальма, число обертів колінчатого вала, температура та тиск оливи, а також питома витрата палива. Кожні п'ять годин роботи дизеля проводився відбір проб оливи для фізико-хімічних аналізів, результати яких наведено на рис. 14.9 та 14.10.

З наведених графіків видно, що кислотне число оливи при роботі дизеля з ГД нижче, ніж при штатній системі змащення у середньому в 1,25 рази, а лужне число, навпаки, вище приблизно у 1,75 рази. При цьому вміст механічних домішок як органічного, так і неорганічного походження при роботі дизеля з ГД нижче.

Диспергуючо-стабілізуєча здатність (ДСЗ) оливи на протязі всього часу випробувань дизеля без ГД залишалась рівною нулю. Але умонтування до системи змащення ГД дозволило вже через п'ять годин роботи дизеля підвищити величину цього показника до 0,37 при 20<sup>0</sup>С та до 0,22 при 100<sup>0</sup>С. Після цього ДСЗ декілька знизилася та стабілізувалася відповідно на рівнях 0,2 та 0,1.

Результати спектрального аналізу (рис. 14.10) показали, що при роботі дизеля з ГД вміст продуктів зносу в оливі нижче: заліза в 1,25 рази, хрому в 1,12 рази, алюмінію в 1,34 рази.



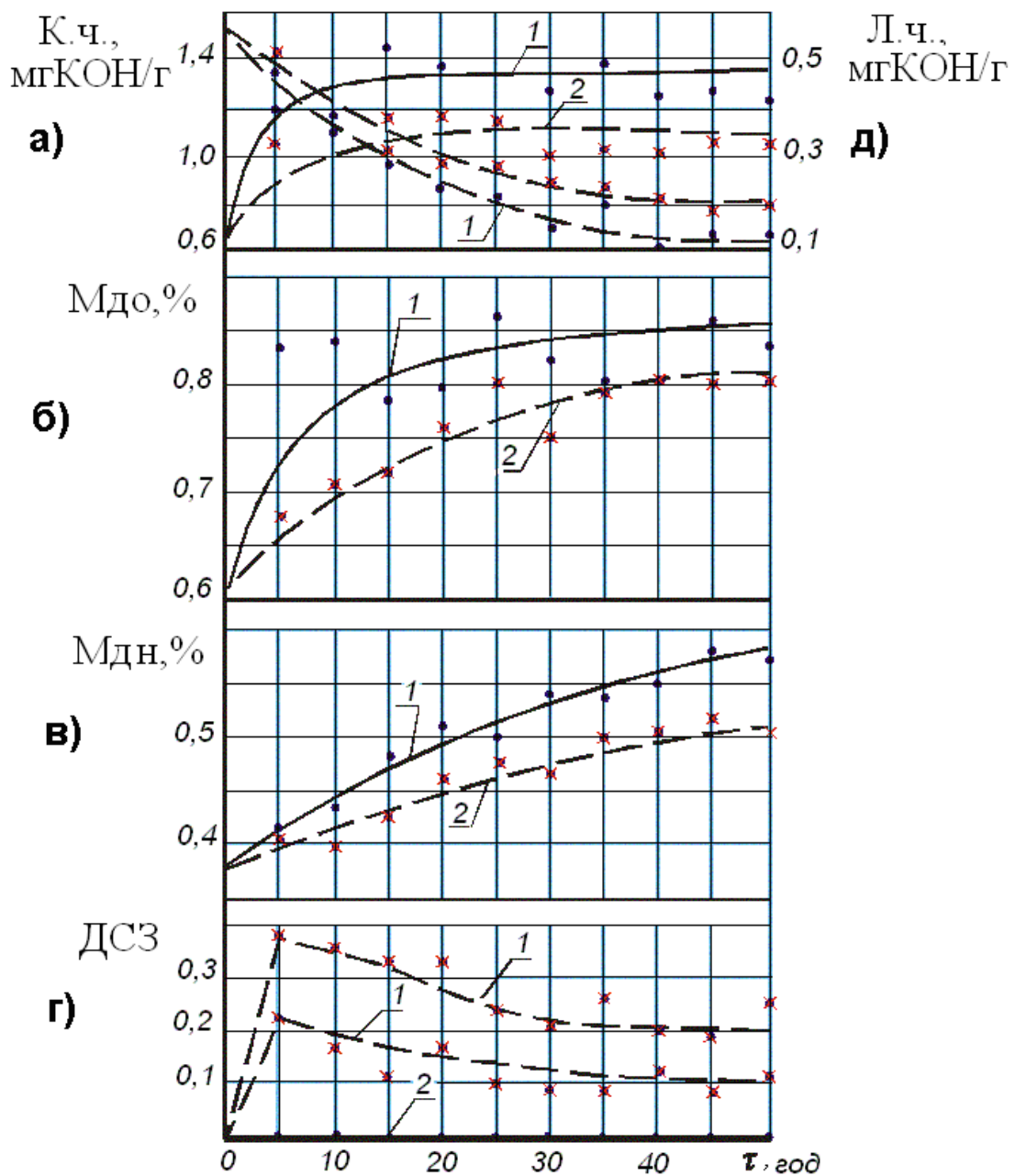


Рис. 14.9. Результати фізико-хімічного аналізу проб оливи М-10-Б<sub>2</sub> з системи змащення дизеля Д-21А:

а) кислотне число, мгКОН/г (К.ч.); б) вміст механічних домішок органічного походження, % (Мдо); в) вміст механічних домішок неорганічного походження, % (Мдн); г) диспергуючо-стабілізуюча здатність (ДСЗ); д) лужне число, мгКОН/г (Л.ч.); 1-без ГД; 2-з ГД

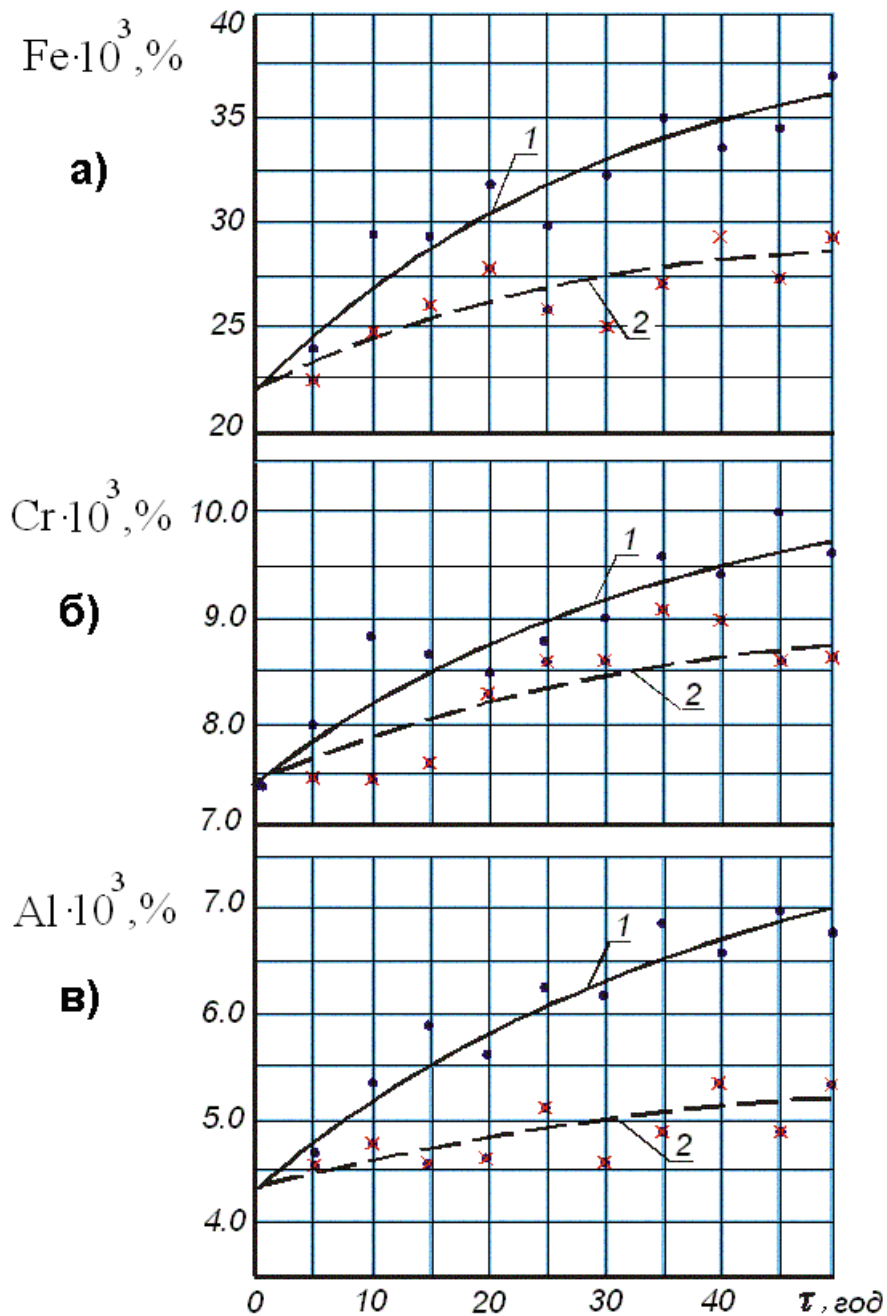


Рис. 14.10. Результати спектрального аналізу проб М-10-Б<sub>2</sub> з системи змащення дизеля Д-21А:

а) вміст в оливі заліза, % (Fe) ; б) вміст в оливі хрому, % (Cr);  
в) вміст в оливі алюмінію, % (Al) ; 1-без ГД; 2-з ГД

Таким чином, результати стендових випробувань тракторного дизеля показали, що використання ГД дозволяє частково поновити фізико-хімічні властивості олив, що працювали.

Експлуатаційні порівняльні випробування з використанням ГД проводилися в складі гідроприводів будівельних машин: скреперах Д-357 та екскаваторах ЕО-2621 (табл. 14.3).

Таблиця 14.3

Перелік будівельних машин, місця установки ГД та марки оливи, які використовувались в гідроприводах

Найменування машини та її номер	Місце встановлення ГД	Марка оливи	Примітка
Скрепер Д-357 №692	-	И-Г-А-32	Контрольний
Скрепер Д-357 №691	Після насосу НШ-50	-“-	
Екскаватор ЕО-2621 №459	-	М-10-Г <sub>2</sub>	Контрольний
Екскаватор ЕО-2621 №456	Після насосу НШ-32	-“-	
Екскаватор ЕО-2621 №688	-	-“-	Контрольний
Екскаватор ЕО-2621 №689	Після насосу НШ-100	-“-	

Примітка: перепад тиску на ГД складав 0,3 МПа.

Перед початком випробувань з усіх гідроприводів були злиті відпрацьовані оливи, системи ретельно промиті та заправлені свіжими оливами.

Експлуатаційні випробування проводились на різних будівельних об'єктах, при цьому завантаженість машин, що порівнювались, була практично однаковою. Періодично з працюючих гідросистем відбиралися проби оливи для фізико-хімічного аналізу. Одночасно з відбором проб за допомогою гідротестера проводилося визначення об'ємного к.к.д. насосів при номінальній частоті обертання колінчатого вала двигунів.

Оливи у контрольних скреперах експлуатувалися 1000 маш.год, екскаваторах - 960 маш.год (у відповідності до рекомендацій заводів – виробників машин), а в гідроприводах з ГД до того часу, поки хоча б один з показників якості оливи не

досягав межового значення, яке відповідає значенню цього ж показника через 1000 маш.год та 960 маш.год у контрольних машинах.

Результати експлуатаційних випробувань показали, що при використанні ГД у гідроприводах будівельних машин знижується інтенсивність зношування трибовузлів: за вмістом заліза в оливі в 1,25 рази, а за швидкістю падіння об'ємного к.к.д.  $\eta_v$  насосів в середньому в 1,34 рази (рис. 14.11). Одночасно на 1-2 класів за ГОСТ 17216-71 підвищується чистота оливи (табл. 14.4) та знижується швидкість її старіння (рис. 14.12). Результати розрахунків за рівняннями, які апроксимують змінення фізико-хімічних властивостей оливи, показали, що одночасно із зниженням інтенсивності зношування можуть бути в 1,7-2,4 рази продовжені строки використання оливи. Так наприклад, в гідроприводі скрепера строк служби оливи може бути збільшено до 1740 маш.год замість 1000 маш-год, а в екскаваторах ЕО-2621-у середньому до 2370 маш.год замість 960 маш.год.

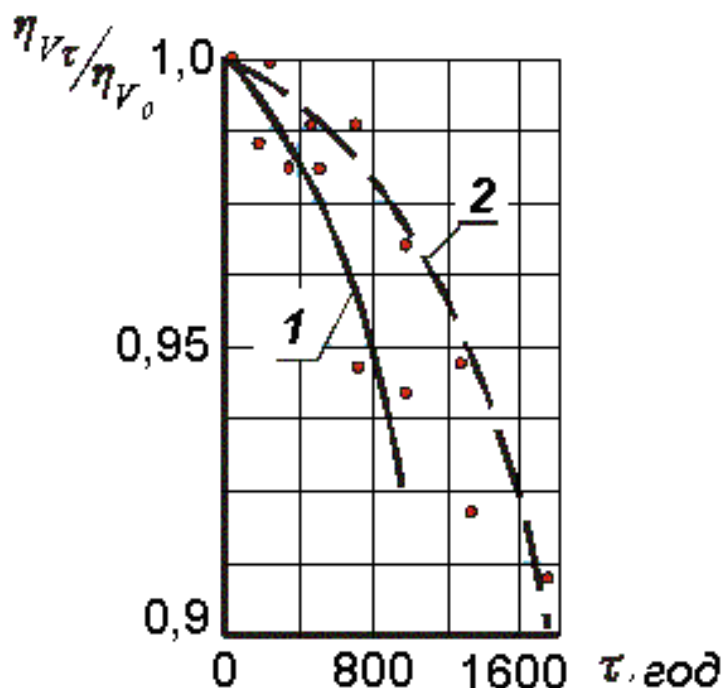


Рис. 14.11. Змінення відносного об'ємного к.к.д. насосів скреперів Д-357:

1-контрольного; 2—з ГД

Таблиця 14.4

Гранулометричний склад частинок та клас чистоти за ГОСТ 17216-71 оливи И-Г-А-32 з гідропривода скрепера Д-357

Напрацювання, маш.год	Число частинок в об'ємі 100 см <sup>3</sup> , шт.		Індекс забрудненості	Клас чистоти
	≤ 5мкм	>5мкм		
0	340670	1288334	2082	13
491/450	580592/868028	571691/208891	11972/3368	15/14
1000/983	1554582/2098174	835765/262627	17079/4191	16/14
-/1754	-/1989784	-/408945	-/6780	-/15

Примітка: у чисельнику наведені дані, що відносяться до гідропривода без ГД, у знаменнику - з ГД.

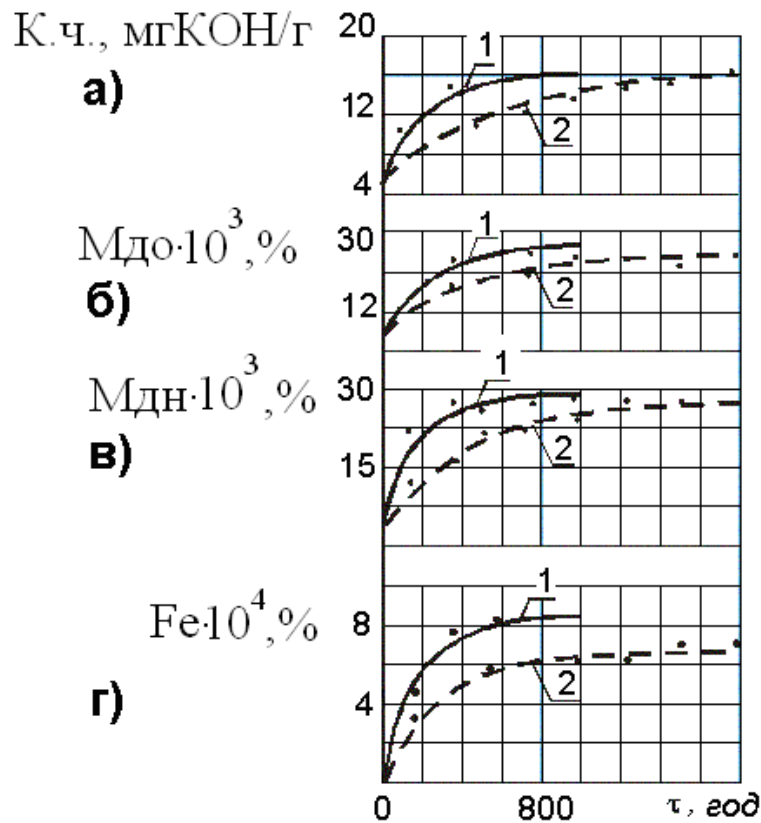


Рис. 14.12. Змінення фізико-хімічних властивостей оливи И-Г-А-32 при випробуваннях її у скрепері Д-357:

- а) кислотне число мгКОН/г (К.ч.); б) вміст механічних домішок органічного походження, % (Мдо); в) вміст механічних домішок неорганічного походження, % (Мдн); г) вміст заліза, % (Fe);  
1-без ГД; 2-з ГД

Використання ГД для обробки дизельного палива дозволяє зменшити швидкість зношування паливної апаратури дизелів [47].

Лабораторні випробування проводилися на машинах тертя 2070СМТ-1 та СМЦ-2 за чотирикульковою схемою та схемою “ролик-колодка” відповідно із зразків зі сталі ШХ-15, яка використовується при виготовленні прецизійних пар тертя паливної апаратури дизелів.

Результати випробувань на машині 2070 СМТ-1 (табл. 14.5) показали зниження моменту сил тертя і зменшення діаметру плям зношення при змащенні кульок диспергованим паливом на відміну від товарного. При випробуванні за схемою ”ролик-колодка” зношення зразків (табл. 14.6), які змащувались обробленим паливом, зменшилось приблизно у 1,38 рази, а коефіцієнт тертя у 1,3 рази.

Таблиця 14.5

Результати випробувань дизельного палива на машині тертя 2070СМТ-1 [47]

Стан палива	Момент сил тертя (умов. од.)	Діаметр плями зносу, мм
До диспергування	54,6	0,384
Після диспергування	29,5	0,278

Таблиця 14.6

Результати випробувань дизельного палива на машині тертя СМЦ-2 [47]

Стан палива	Коефіцієнт тертя	Знос колодки, г	Знос ролика, г	Підсумковий знос, г
До диспергування	0,0484	0,0682	0,0367	0,1049
Після диспергування	0,0377	0,0548	0,0208	0,0756

Вплив гідродинамічного диспергування палива на зношення трибовузлів реальної паливної апаратури досліджувався на спеціальному стенді, принципова схема якого наведена на рис. 14.13.

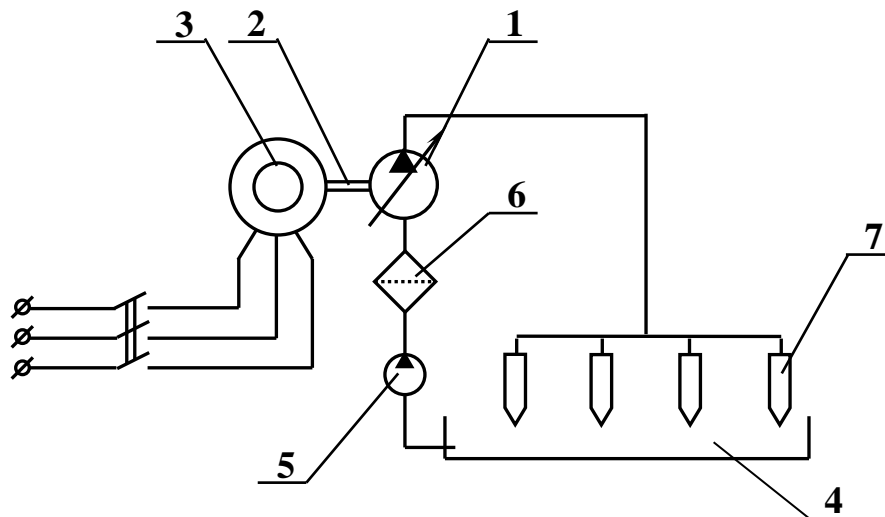


Рис. 14.13. Принципова схема стенда для випробування паливної апаратури на знос:

1 – паливний насос високого тиску; 2 – клинопасова передача; 3 – електродвигун; 4 – паливний бак; 5 – паливопідкачувальний насос; 6 – сітчастий фільтр грубого очищення; 7 – форсунки

Паливо подавалося з бака 4 паливопідкачувальним насосом 5 до паливного насоса високого тиску 1 (ПНВТ), звідти до форсунок 7 та зливалося у бак. Привод насосів здійснювався від електродвигуна 3 через клинопасову передачу 2. Для проведення випробувань на диспергованому паливі до цього стенда додавався ще один, який дозволяв обробляти паливо за допомогою ГД. Баки обох стендів сполучалися трубоприводом.

Випробування проводилися за прискореним методом, у стенді паливної системи не було передбачено тонкої фільтрації палива.

У процесі стендових випробувань контролювалося зношування плунжера, нагнітального клапана ПНВТ і голки форсунки. Величина зносу визначалася за втратою цими елементами маси за час випробувань. Маса їх вимірювалася на вагах ВЛР-200г-М з точністю до  $\pm 0,0001$  г. Крім того, проводилась перевірка щільності плунжерних пар до і після випробувань, що дало можливість безпосередньо також оцінити знос елементів паливної апаратури.

Під час випробувань тривалістю 150 год на товарному та стільки ж на диспергованому паливі проводився відбір його проб, які піддавалися аналізу для визначення зміни його якості.

Результати зважування деталей паливної апаратури (табл. 14.7) показали [47], що при роботі стенда на диспергованому паливі зношення плунжерів зменшується у 1,36 рази, клапанів – 1,88 рази, гілок форсунок – у 1,77 рази, а середня швидкість зношування зменшилася приблизно у 1,4 рази.

Таблиця 14.7

Зношення елементів паливної апаратури

Стан палива	Знос плунжера, г	Знос клапана, г	Знос голки, г
До диспергування	0,03363	0,00315	0,00057
Після диспергування	0,02478	0,00167	0,00037

Перевірка щільності плунжерних пар показала, що всі пари, які змащувалися у процесі випробувань диспергованим паливом, залишилися працездатними. Змащення пар недиспергованим паливом привело до втрати двома з них своєї працездатності за час випробувань, а ще дві знаходились у останній, найгіршій групі за витокami з них палива.

Крім того, аналіз проб палива показав, що при проведенні випробувань на диспергованому паливі за однакові проміжки часу у ньому накопичується менша кількість заліза, що входить до складу сталі ШХ-15. Наприкінці випробувань вміст заліза у паливі при застосуванні ГД був в 1,2 рази менший, ніж без нього.

Результати аналізів гранулометричного складу забруднень у пробах палива показали, що при застосуванні під час випробувань ГД кількість частинок забруднень розміром 5 мкм та менших більша, ніж без ГД, хоча і несуттєво, але кількість частинок інших розмірів зменшується досить відчутно у всіх діапазонах розмірів, визначених ГОСТ17216-71. Незначне збільшення кількості частинок розміром менше 5 мкм пояснюється тим, що більша їх кількість після диспергування досягає таких розмірів, які при аналізі визначити неможливо.

Для різних машин, умов експлуатації, а також паливних систем, систем змащення двигунів та гідроприводів розроблені різні конструкції ГД. Розглянемо деякі з них.



На рис. 14.14 наведена конструкція ГД із змінним соплом та регульованим зазором між торцем сопла та перепону. Такий ГД містить штуцер 1, до якого за допомогою різьбового з'єднання прикріплені змінне конічне сопло 2 та наконечник 3 з перепону 4 та прорізами 5. Наконечник фіксується від повертання на штуцері контргайкою 6.

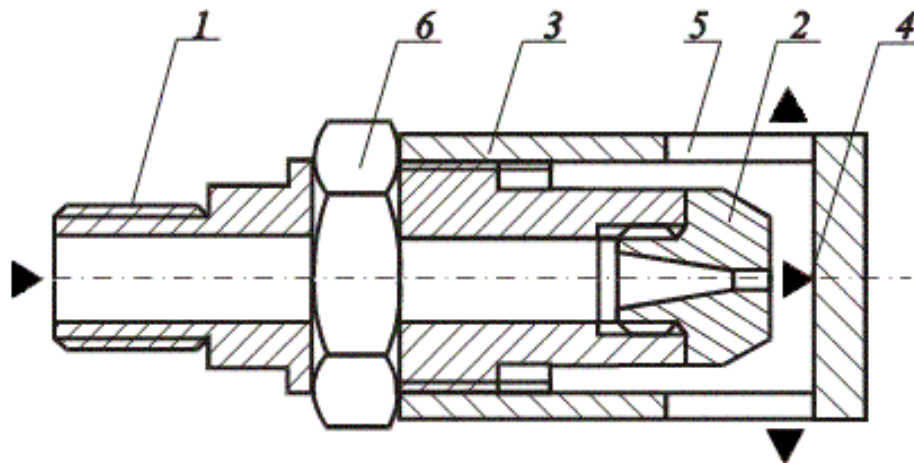


Рис. 14.14. Конструкція ГД з регульованим зазором між соплом та перепону:

1 - штуцер; 2 - сопло; 3 - наконечник; 4 - перепона; 5 - прорізь;  
6 - контргайка

Для тих випадків, коли робота ГД може вплинути на вихідні параметри робочих органів машини, наприклад, гідропривода (точність позиціонування, швидкодія та ін.) або буде супроводжуватися значними енергетичними витратами, розроблена спеціальна конструкція ГД (рис. 14.15)

В такому ГД олива чи інша рідина через канали підведення 1 та 2 надходить у сопло 3, розганяється до потрібної швидкості та ударяється у перепону, після чого через порожнину проточки 4 та канал відведення 5 олива зливається до гідробака. При подачі оливи під тиском, який перевищує зусилля настроювання пружини 6, в отвір 7 золотник 8 переміщається праворуч та перекриває собою канал підведення 1 оливи. При цьому диспергування її припиниться та робочі органи гідропривода будуть виконувати свої функції із заданими вихідними характеристиками.

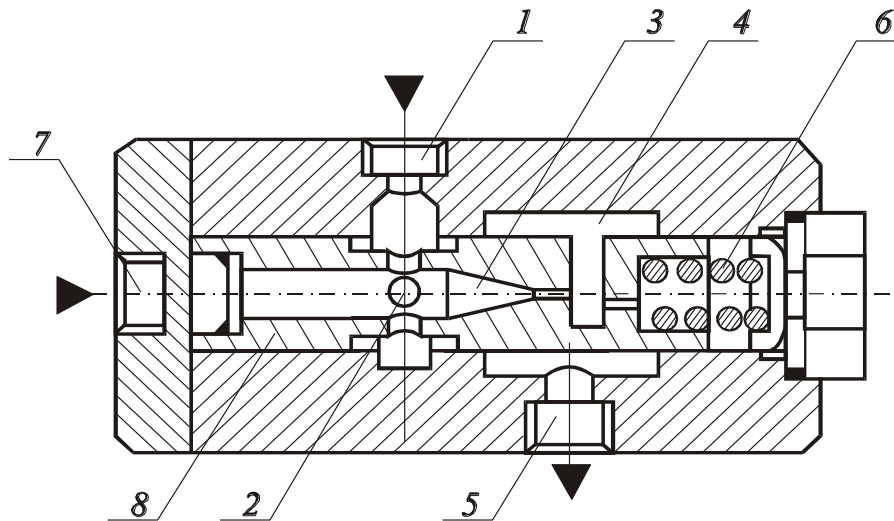


Рис. 14.15. Конструкція ГД з автоматичним управлінням процесу диспергування:

- 1, 2 - канали підведення; 3 - сопло; 4 - порожнина проточки;  
5 - канал підведення; 6 - пружина; 7 - отвір; 8 - золотник

На рис. 14.16 наведена елементарна схема включення такого ГД до гідропривода. З цієї схеми видно, що диспергування можливо лише при нейтральному положенні гідророзподільвача. У кожному з кінцевих його положень диспергування припиняється та вся витрата оливи поступає до робочого органу (гідроциліндра або гідромотора). Таким чином, диспергування відбувається періодично, конструкція ГД забезпечує автоматичне керування його роботою, не впливає на параметри робочого циклу гідропривода та не потребує додаткових енергетичних витрат на роботу ГД.

В гідроапараті, який наведено на рис. 14.17, ГД сполучається з перепускним клапаном. Функція останнього полягає в тому, щоб запобігти аварії системи у випадку засмічення сопла забрудненнями (дрантям, елементами ущільнень та ін.), а також для того, щоб обмежити максимальний перепад тиску на ГД, який складає 1,5МПа та перевищення якого приведе до значних енергетичних витрат, які неадекватні ефективності від диспергування.

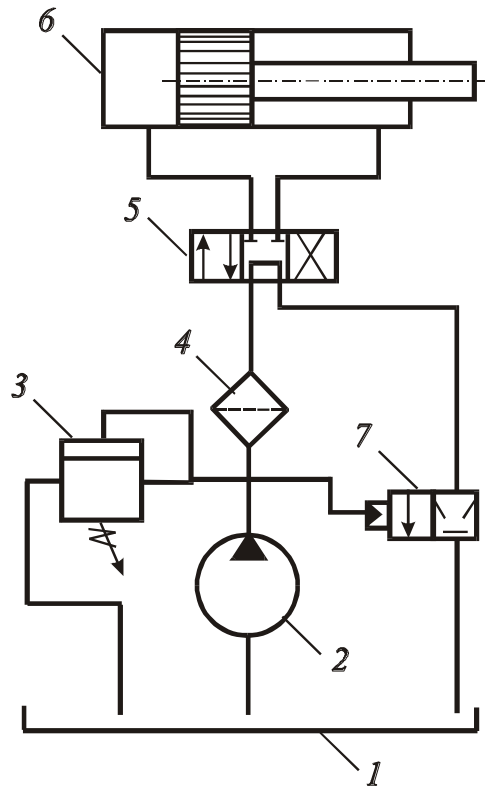


Рис. 14.16. Гідравлічна схема включення ГД з автоматичним управлінням процесу диспергування:

1 - гідробак; 2 - насос; 3 - запобіжний клапан; 4 - фільтр;  
5 - гідророзподілювач; 6 - гідроциліндр; 7 - ГД

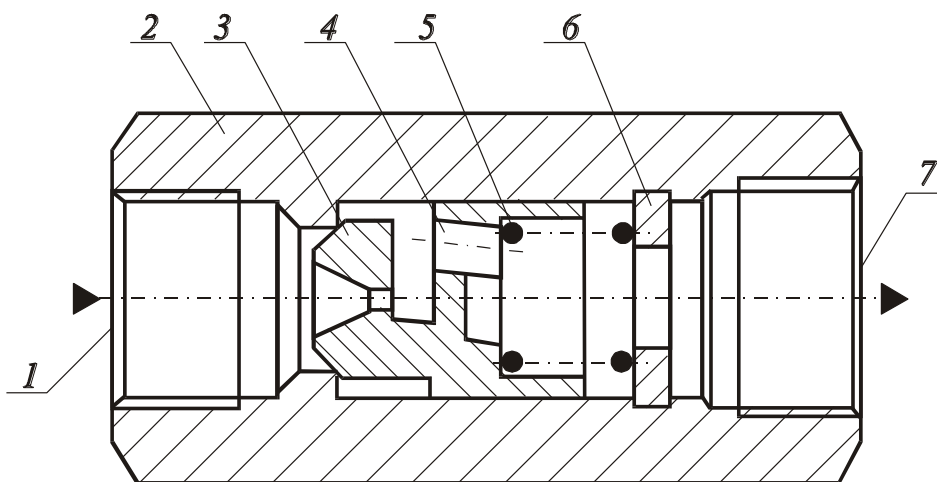


Рис. 14.17. Конструкція ГД з перепускним клапаном:

1 - вхідний канал; 2 - корпус; 3 - поршень з соплом; 4 - отвір;  
5 - пружина; 6 - стопорне кільце; 7 - вихідний канал

При перепаді тиску 1,5 МПа у вхідному каналі 1 стискується пружина 5, поршень 3 з соплом переміщується у крайнє праве положення, та олива через кільцеву щілину, що утворюється між корпусом та поршнем, міняючи сопло, через отвір 4 та вихідний канал 7 потрапляє в систему. Фіксація пружини відбувається стопорним кільцем.

На рис. 14.18 наведена конструкція ГД з перепускним клапаном та пристроєм контролю процесу диспергування.

Конструкція містить герметичний контакт, замикання якого відбувається при наближенні до нього постійного магніту 2, який зв'язаний з повідком 4, що входить в контакт з поршнем 1 ГД. При нормальній роботі останнього струмопровідні кінці герметичного контакту роз'єднані. При зростанні перепаду тиску на ГД до 1,5 МПа та вище поршень 1 переміщується праворуч, піднімає поводок 4 з магнітом 2. Під впливом магнітного поля кінці герметичного контакту замикаються, в результаті чого загоряється контрольна лампочка на пульті керування машиною, що є сигналом припинення диспергування.

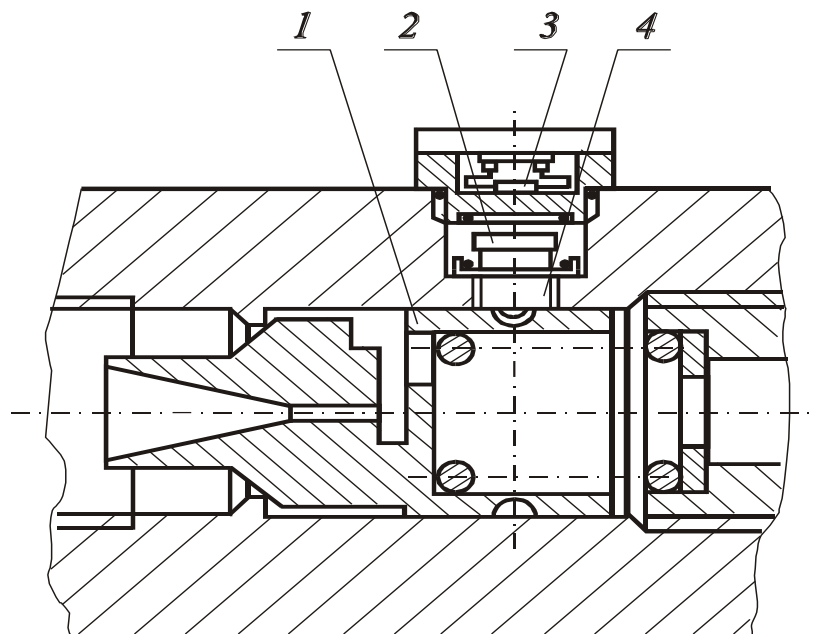


Рис. 14.18. Конструкція ГД з перепускним клапаном та пристроєм контролю процесу диспергування:

1 - поршень; 2 - магніт; 3 - герметичний контакт; 4 - поводок

Розроблені ще інші варіанти конструкцій ГД, про які можна дізнатися з [40].

Витрати енергії  $E$ , кВт·год, на роботу ГД можна визначити з виразу

$$E = \frac{\Delta p \cdot Q \cdot t_{\text{обр}}}{61,2}, \quad (14.6)$$

де  $\Delta p$  - перепад тиску на ГД;  
 $Q$  - витрата рідини через ГД;  
 $t_{\text{обр}}$  – час обробки рідини, год;

$$t_{\text{обр}} = \frac{G \cdot N}{60 \cdot Q}, \quad (14.7)$$

де  $G$  - ємність системи, гідробака і т.п.

Тоді:

$$E = 2,72 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p \cdot G \cdot N. \quad (14.8)$$

Діаметр сопла визначається з виразу

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\mu \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}}, \quad (14.9)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт витрат (табл. 14.8);  
 $H$  – напір.

Таблиця 14.8

Значення коефіцієнтів витрат

Кут конуса сопла	5 <sup>0</sup>	10 <sup>0</sup>	13 <sup>0</sup>	13 <sup>0</sup> 24 <sup>1</sup>	16 <sup>0</sup>	20 <sup>0</sup>	25 <sup>0</sup>
$\mu$	0,92	0,937	0,945	0,946	0,938	0,922	0,908

Вибір параметрів ГД включає в себе такі етапи:

- визначення місця установлення ГД, яке забезпечує при достатній ефективності його роботи нормальне функціонування виконавчих органів, наприклад, гідропривода;
- забезпечення потрібного перепаду тиску  $\Delta p$  на ГД та витрати (для моторних оливок, забруднених водою та паливом,  $\Delta p$  повинен бути не менше 0,5 МПа, але не більш 0,7 МПа);
- розрахунок діаметра  $d$  вихідного перерізу сопла за формулою (14.9).

Місце установлення ГД повинно вибиратися з урахуванням забезпечення максимальної ефективності його роботи при мінімальних енергетичних витратах на диспергування та незмінності технічних характеристик виконавчих органів машини. При цьому краще, щоб ГД постійно обробляв оливу чи іншу рідину, тому що при безупинній роботі якість, та, отже, ефект від диспергування вище.

Докладніше з практичними рекомендаціями щодо вибору місць установлення ГД у різні системи та відповідними гідравлічними схемами можна ознайомитися у [40].

## **14.2. Дозоване введення присадок у моторні оливи та робочі рідини**

Як відзначалося у розділі 5.5, одним з процесів, що супроводжує старіння оливок, є спрацьовування у них присадок, що у цілому ряді випадків стає причиною обмеження строків служби оливок.

Причини спрацьовування присадок розглянуті в розділі 5.5, а швидкість цього процесу, наприклад, для моторних оливок описується виразом [36]

$$\frac{dc}{dt} = -k \cdot C, \quad (14.10)$$

де  $C$  - лужність оливи;

t - час;  
k – константа спрацьовування.

Аналогічним чином виглядають рівняння, які описують спрацьовування і інших присадок.

З цього виразу можна отримати час спрацьовування присадок до граничного (бракувального) значення концентрації:

$$t_{\text{бр}} = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{C_0}{C_{\text{min}}} \quad (14.11)$$

З виразу (14.11) випливає, що збільшення строку служби оливи шляхом підвищення в них початкової концентрації присадок недоцільно. Наприклад, для збільшення строку служби оливи удвічі при значенні константи швидкості спрацьовування  $k = 1/50$  початкову концентрацію присадки необхідно збільшити в  $e^2$  рази, тобто в 7,3 рази, що з економічної точки зору недоцільно [36].

У зв'язку з цим з'явилися роботи, в яких теоретично та експериментально обґрунтовується доцільність дозованого введення присадок в оливи з метою підвищення їх строків служби та зносостійкості трибовузлів. В цих роботах підкреслюється необхідність підтримки концентрації присадки в заданому діапазоні шляхом періодичної та безупинної компенсації їх витрати внаслідок спрацьовування. Доцільно з кінетичної точки зору розбиття призначеної для даної оливи кількості присадок на якомога більше число частин та періодичне (по мірі падіння концентрації присадок до граничного припустимого рівня  $C_{\text{min}}$ ) додавання чергових доз [36,40 та ін.]. При розподілі початкової кількості присадки на  $n$  порцій час спрацьовування зростає до величини  $t_{\text{сп}}$ , яка визначається з рівняння [36]

$$t_{\text{сп}} = \frac{n}{k} \cdot \ln \left( \frac{C_0 - C_{\text{min}}}{n \cdot C_{\text{min}}} + 1 \right). \quad (14.12)$$

Цей час перевищує час спрацьовування присадок при одноразовому введенні в  $\left[ n / \ln(C_0 / C_{\text{min}}) \right] \cdot \ln \left( \frac{C_0 - C_{\text{min}}}{n \cdot C_{\text{min}}} + 1 \right)$  раз.

Найбільший приріст величини  $t_{cp}$  можна забезпечити, підтримуючи концентрацію присадок поблизу значення  $C_{min}$  шляхом безперервного дозованого введення присадок із швидкістю, яка буде дорівнювати швидкості спрацьовування при  $C = C_{min}$ . У цьому випадку час спрацьовування буде дорівнювати

$$t_{cp} = \frac{1}{k} \cdot \frac{C_0 - C_{min}}{C_{min}} . \quad (14.13)$$

Якщо концентрація присадки в оливі  $C_0$  в 3 рази перевищує мінімально припустиму концентрацію  $C_{min}$ , заміна одноразового введення присадок з оливою на безперервне дозування може забезпечити при таких же витратах присадок збільшення строку спрацьовування майже в 2 рази, а при  $C_0/C_{min} = 5$  час спрацьовування підвищується в 3 рази.

Таким чином, дозоване введення присадок є перспективним методом підтримки їх концентрації на мінімально припустимому рівні, що дозволить подовжити строки служби олив до заміни та одночасно підвищити зносостійкість трибовузлів машин. Останнє цілком переконливо підтверджується результатами наступних досліджень.

В [36 та ін.] наводяться експериментальні дані, які свідчать про позитивний ефект в двигунах внутрішнього згорання при дозованому введенні присадок при навіть найпростіших способах введення. У відповідності до даних, які були отримані під час стендових та експлуатаційних випробувань тракторів з двигунами СМД-14 та Д-50, найбільш різко лужність моторної оливи знизилася у початковий період роботи двигунів після заміни олив (за 10 год біля 75% присадки). Зміна режиму змащування - подача в картер двигуна через кожні 90 - 120 маш.год. 0,5-0,9 кг присадки ВНИИ НП-360 дозволила значно збільшити в умовах стендових випробувань строк служби олив, а в експлуатаційних умовах з'явилася можливість робити сезонну заміну оливи, тобто лише два рази на рік. При цьому значно менше зношувалися деталі двигуна та знизилася забрудненість поршневої групи.

Дозоване введення присадок можна здійснювати як механічним шляхом (періодичне доління, безперервне



дозування механічними дозаторами та ін.), так і за допомогою спеціальних носіїв, подача присадок з яких відбувається шляхом поступового розчинення та дифузії. Використання таких носіїв спрощує реалізацію дозованого введення та виключає необхідність оснащення систем складними дозаторами механічного типу [36].

Існують багато пристроїв, які призначені для дозованого введення присадок різними шляхами під час експлуатації. Всі ці пристрої достатньо добре досліджені, ефективні, але більша частина їх має певні недоліки (в основному, складна конструкція, та, як наслідок, багата велика вартість, недостатня технологічність та ін.). Найбільш перспективним для двигунів внутрішнього згоряння та гідروприводів різного призначення є використання простого за конструкцією контейнера [48], який розроблено на кафедрі БКВРМ УкрДАЗТ та схема якого наведена на рис. 14.19.

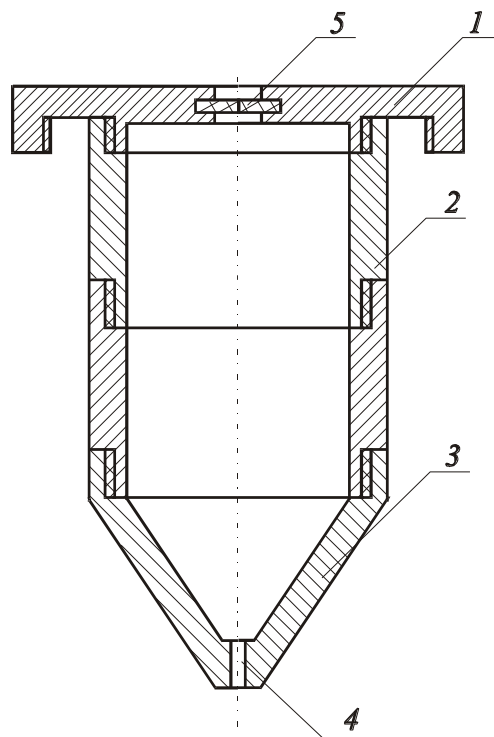


Рис. 14.19. Контейнер для дозованого введення присадок:

1 - кришка; 2 - корпус; 3 - конусна насадка; 4 - отвір капілярного типу; 5 - повстинний фільтр

Контейнер складається із кришки 1 та корпусу 2 з присадкою та конусною насадкою 3, яка має отвір 4 капілярного типу, через який вивільняється присадка. Для з'єднання з атмосферою кришка має повстинний фільтр 5. Корпус контейнера має модульну конструкцію, що надає можливість регулювати його об'єм у відповідності до тієї кількості присадки, яка необхідна для будь-якої системи. Окремі частини контейнера з'єднуються різьбою.

Дозоване введення присадки з такого контейнера можна здійснювати за рахунок двох механізмів: дифузії або гідродинаміки. Вирішальним у цьому питанні фактором є швидкість дозованого введення.

Якщо в результаті теоретичних або експериментальних даних необхідно подати до оливи невелику порцію присадки протягом тривалого часу, то доцільно використовувати для цього механізм дифузії, відповідно до якого кількість присадки, що повинна продифундувати через отвір 4, може бути знайдено з відомого закону Фіка

$$dm = -D \cdot \frac{dc}{dx} \cdot S \cdot dt , \quad (14.14)$$

де  $m$  - маса присадки, що продифундувала;

$D$  - коефіцієнт дифузії;

$dc/dx$  - градієнт концентрації;

$S$  - площа дифузії;

$t$  - час дифузії.

Якщо швидкість надходження присадки до оливи за допомогою дифузії недостатня, то дозоване введення необхідно робити за рахунок гідродинаміки. У цьому випадку кількість  $Q$  присадки, яку можна вивільнити через капіляр, визначається з відомого рівняння Пуазейля

$$Q = \frac{\pi \cdot n \cdot \Delta p \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot l} , \quad (14.15)$$

де  $n$  - кількість капілярів;  
 $\Delta p$  - перепад тиску на обох кінцях капіляру;  
 $r$  та  $l$  - відповідно радіус та довжина капіляру;  
 $t$  - час вивільнення присадки.

Розглянемо деякі результати експериментальних досліджень контейнера для дозованого введення присадок.

На машині тертя СМЦ-2 були проведені випробування для визначення протизношувальних та антифрикційних властивостей олив у свіжому стані та при дозованому введенні до них протизношувальної присадки ДФ-11. Ці випробування показали [48], що дозоване введення цієї присадки значно знижує коефіцієнт тертя (у середньому в 1,36 рази) та підвищує зносостійкість зразків (у середньому в 1,5 рази). На рис. 14.20 у якості прикладу наведені гістограми сумарної зносостійкості та коефіцієнтів тертя зразків (колодка-БрАЖ9-4, ролик-сталь 18ХГТ) при змащуванні їх оливою И-Г-А-32 з дозованим введенням присадки ДФ-11.

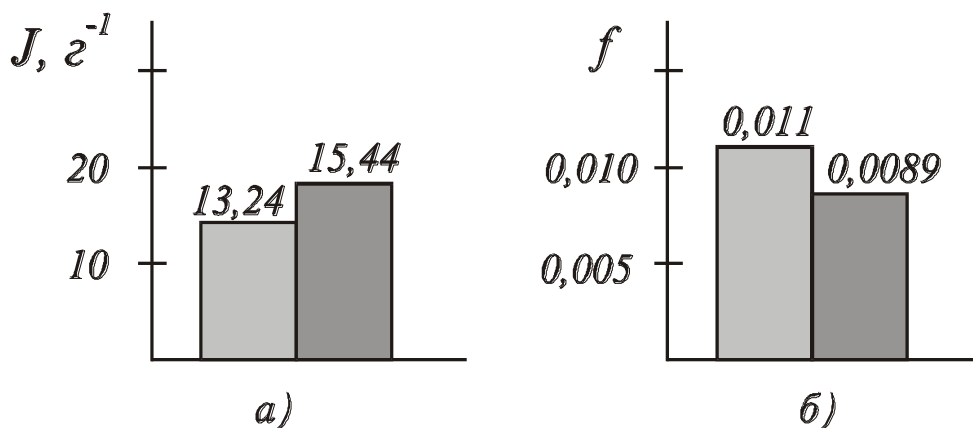


Рис. 14.20. Гістограми зносостійкості (а) та коефіцієнтів тертя (б) пари БрАЖ9-4 та сталь 18ХГТ

Розглянемо результати експлуатаційних випробувань верстатів, до гідроприводів яких були вбудовані контейнери (рис. 14.19) з присадкою ДФ-11 [48]. Для випробувань використовувалися плоскошліфувальні верстати моделей ЗБ722 та ЗД725, а також внутрішньошліфувальні верстати моделей

ЗА229 та ЗК227А. Ці станки мали приблизно однакову дату випуску та виконували технологічні операції, які забезпечували приблизно однакову механічну та теплову навантаженість елементів гідропривода.

На першому етапі випробувань визначалися закономірності спрацьовування присадки ДФ-11 в оливі И-Г-С-32, яка використовувалася у гідроприводах вищезазначених верстатів. Для цього проводився періодичний відбір проб олив, які піддавали аналізу методом ІК-спектроскопії для визначення вмісту присадки.

Результати аналізів показали, що в початковий період експлуатації має місце інтенсивне зниження концентрації присадки, а потім швидкість падіння цього процесу зменшується. Через 1000 год наявність присадки в оливі складала для різних гідроприводів від 0,06% до 0,12%, що значно нижче мінімально припустимого значення (0,4% [48]).

Обробка отриманих результатів на ПЕОМ програмним продуктом Excel 7.0 Microsoft показала, що спрацьовування присадки ДФ-11 підпорядковується експоненціальній залежності

$$C = C_0 \cdot e^{-Bt}, \quad (14.16)$$

де  $C$  - концентрація присадки у момент часу  $t$ ;

$C_0$  - початкова концентрація присадки, яка складає 0,84% для оливи И-Г-С-32;

$B$  - константа спрацьовування присадки, яка дорівнює 0,0023 для всіх верстатів, що випробувалися.

Якщо прийняти до уваги, що мінімально припустиме значення концентрації присадки ДФ-11 складає 0,4% [48], то виявиться, що час спрацьовування присадки ДФ-11 до мінімально припустимого рівня складає у середньому 300 год, що при нормативному строку служби оливи И-Г-С-32 в гідроприводах верстатів 1000 год у 3,33 рази менше.

Визначивши середню швидкість спрацьовування присадки ( $7,56 \cdot 10^{-4}$  %/год), були розраховані потрібний об'єм присадки для контейнера, а також параметри капілярів (кількість, довжина та діаметр), які забезпечують потрібну швидкість вивільнення, при якій

буде постійно підтримуватися мінімально необхідна концентрація присадки в оливі. Після цього були сконструйовані контейнери, які встановлювалися в гідробаках приводів верстатів.

Результати експлуатаційних випробувань показали, що при дозованому введенні протизношувальної присадки ДФ-11 має місце таке:

1. Наявність присадки в оливі на протязі всього часу випробувань (1000 год – верстати із серійною гідросистемою, тобто контрольні, та 2000 год – верстати з контейнерами) складала 0,4% та більше. В результаті цього порівняно з контрольними гідроприводами знизився знос трибовузлів: за швидкістю падіння об'ємного к.к.д. насосів в середньому у 2,6 рази, за наявністю заліза в оливі – у 1,66 рази (за 1000 год експлуатації), за концентрацією механічних домішок неорганічного походження – у 1,33 рази, за величиною коефіцієнта протизношувальних властивостей оливи – у 1,42 рази;

2. За рахунок зменшення зносу трибовузлів клас чистоти оливи виявився вище, ніж оливи з контрольних гідроприводів;

3. Знизилась швидкість окислення оливи, а отже, й наявність у ній механічних домішок органічного походження. Це обумовлено тим, що присадка ДФ-11, крім протизношувальних властивостей, виконує також антиокислювальні функції;

4. Строк служби оливи може бути збільшений з 1000 год мінімум до 1600 год, причому за цей час інші фізико-хімічні показники оливи із дозованим введенням ще не досягають відповідних значень оливи із контрольних гідроприводів через 1000 год.

На рис. 15.21 та 15.22 в якості приклада наведені результати експлуатаційних випробувань гідроприводів плоскошліфувальних верстатів моделі ЗБ722 [48].

На підставі вищенаведеного стає очевидним доцільність використання контейнеру для дозованого введення присадок у різні системи.

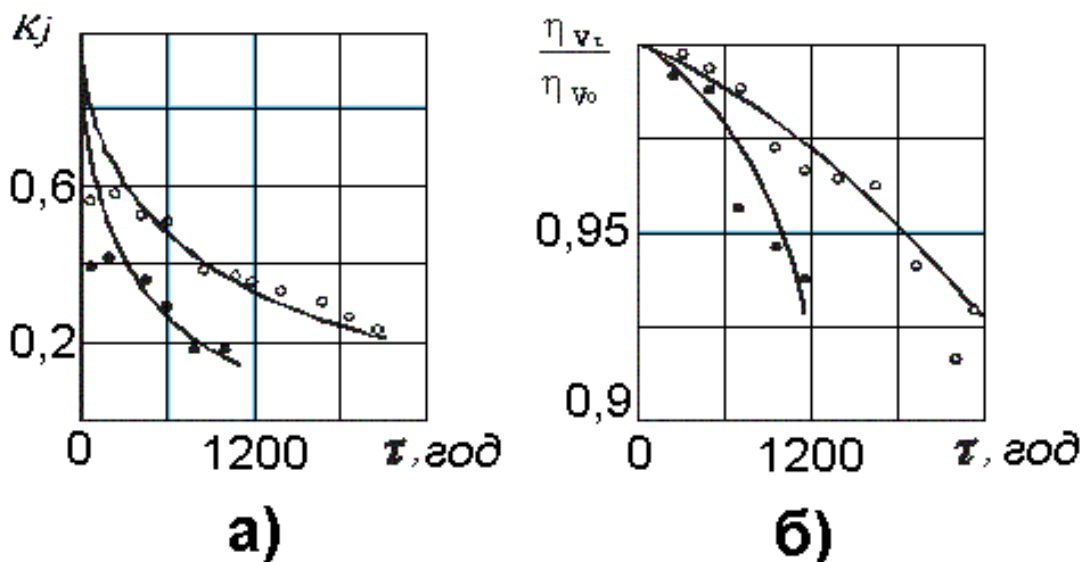
При виборі конструктивних параметрів контейнера, а отже його ємкості, необхідно враховувати об'єм оливи в системі, а також мати на увазі, що концентрація присадки повинна постійно

підтримуватися на мінімально припустимому рівні (наприклад, 0,4% для присадки ДФ-11).

Крім того, для вибору параметрів капілярів (внутрішнього діаметра, довжини та кількості) необхідно у кожному конкретному випадку визначити швидкість спрацьовування присадки в оливі, керуючись методикою, яка наведена в [40,48]. В залежності від значення швидкості спрацьовування присадки обирається механізм дозованого введення: за допомогою дифузії або гідродинаміки. Необхідно також враховувати, що від механізму вивільнення залежить конструкція кришки контейнера: якщо введення присадки відбувається за рахунок дифузії, то у кришці контейнера відсутній повстинний фільтр.

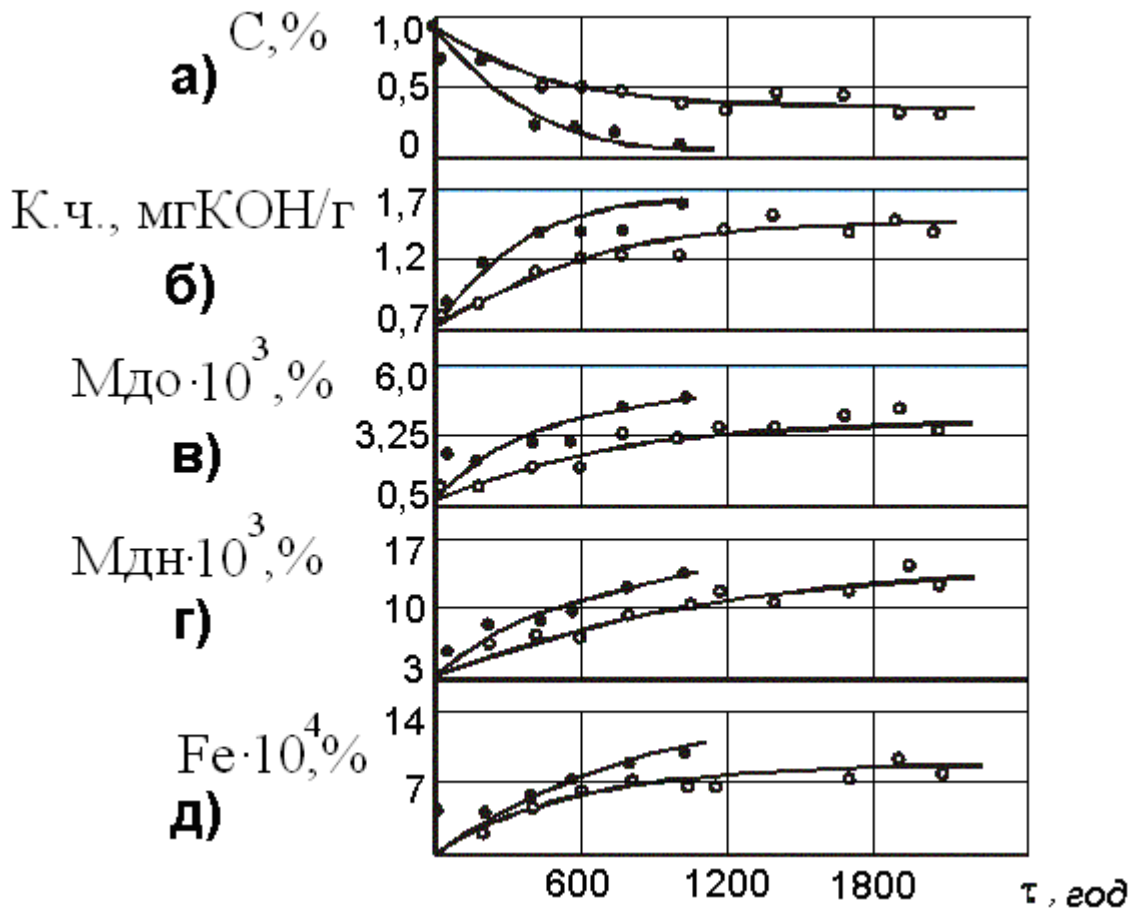
Контейнер слід виготовляти з оливостійкої пластмаси або металу, який не впливає на фізико-хімічні властивості присадки.

Установлення контейнера та наповнення його новою порцією присадки слід проводити під час чергової заміни оливи та фільтроелементів. Перед заповненням контейнера присадкою необхідно ретельно промити його внутрішню порожнину, а також капіляр, після чого продути стиснутим повітрям.



(-o-o-) - з контейнером; (-•-•-) – контрольний

Рис. 14.21. Змінення коефіцієнта  $K_j$  протизношувальних властивостей оливи (а) та відносного об'ємного к.к.д. насосів (б) гідроприводів



(-o-o-) - з контейнером; (-•-•-) - контрольний

Рис. 14.22. Змінення фізико-хімічних показників оливи в гідроприводах станків:

- а) вміст присадки, % (С); б) кислотне число, мгКОН/г (К.ч.);  
 в) вміст механічних домішок органічного походження, % (Мдо);  
 г) вміст механічних домішок неорганічного походження,  
 %·(Мдн); д) вміст заліза, %·(Fe)

Доцільно встановлювати контейнер на гідробаці між зливним та усмоктувальним трубопроводами, що забезпечить добре перемішування присадки, яка подається з контейнера. Можна також встановлювати контейнер у оливозаливну горловину. При цьому капіляри не повинні торкатися рівня оливи у баці (якщо вивільнення присадки відбувається за рахунок гідродинаміки).

Якщо ж процес вивільнення обумовлено гідродинамікою, то капіляри повинні бути занурені в оливу.

Радіус  $r$  капіляра, який необхідний для підтримки потрібної концентрації присадки в оливі на протязі всього його строку служби, визначається з рівняння

$$r = \sqrt[4]{\frac{8 \cdot Q \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot n \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot t}}, \quad (14.17)$$

де  $Q$  - кількість присадки;

$\eta$  - динамічна в'язкість присадки;

$l$  - довжина капіляра;

$n$  - число капілярів;

$\rho$  - щільність присадки;

$h$  - середня висота присадки у контейнері;

$t$  - час спрацьовування присадки в контейнері.

Якщо швидкість спрацьовування присадки при використанні оливи мала, то площу дифузії можна визначити з виразу (14.14). Але для отримання необхідної швидкості вивільнення, яка характерна для реальних умов експлуатації, площа дифузії виходить досить значна, тобто контейнер, що здійснює такий механізм вивільнення, буде мати великі габарити, тому при визначенні параметрів контейнера доцільно орієнтуватися на гідродинамічний механізм.

## **15. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Всі паливно-мастильні матеріали (ПММ) на основі нафти вибухо- та пожежонебезпечні, а їх пари – отрутні. Тому робітникам підприємств, які експлуатують техніку, необхідно добре знати основні екологічні властивості ПММ. До них відносяться ті властивості ПММ, які виявляються при контакті з людиною та довкілля, а також при транспортуванні, зберіганні,



заправленні та заміні. Найбільш важливі з цих властивостей – токсичність, вибухо- та пожежонебезпечність.

Особливо шкідливі для здоров'я людини етиловані бензини. Вони здатні вразити шкіру людини, шлунково-кишковий тракт та органи дихання. Токсичні також деякі гальмові рідини та антифризи, які містять етиленгліколь. У зв'язку з цим особам, робота яких пов'язана з транспортуванням, зберіганням, контролем якості, заправленням, експлуатацією, технічним обслуговуванням та ремонтом техніки, необхідно суворо дотримуватись правил техніки безпеки.

Пари ПММ у певній концентрації з повітрям створюють вибухонебезпечну суміш. Для бензинів та дизельних палив вибухонебезпечною вважається суміш, яка мстить 1-6% парів цих продуктів.

Нафтопродукти розподіляються на дві групи: ті, що легко спалахують та мають температуру спалахування до 40<sup>0</sup>С та горючі з температурою спалахування більше 40<sup>0</sup>С, До першої групи відносяться усі бензини, до другої – дизельне паливо та легкі оливи. На усіх етапах транспортування, зберігання та використання ПММ з ними слід обережно поводитися.

Концентрація парів бензину в повітрі не повинна перевищувати 0,3 мг/л. При нетривалому вдиханні повітря, яке вміщує до 5-10 мг/л бензину, настає гостре отруєння. Характерні його ознаки - сильний головний біль, кашель, неприємні відчуття в гортані, подразнення слизуватих оболонок, непевність ходи, запаморочення, підвищена збудливість нервової системи, зниження температури тіла, частоти пульсу та артеріального тиску. Звичайно, при видаленні потерпілого з отруєної зони через деякий час ці явища зникнуть.

Концентрація парів бензину 35-40 мг/л небезпечна для здоров'я при вдиханні їх на протязі 5-10 хв. При більш високих концентраціях може наступити втрата свідомості та смерть. Серйозне отруєння можливо при попаданні бензину в організм при випадковому засмокуванні його ротом через шланг.

Більшість ПММ (особливо палива) мають високі діелектричні властивості. Тому при їх перекачуванні через трубопроводи при терті об стінки цистерн виникають

електростатичні заряди. При їх розряді створюється іскра, яка може викликати запалення та вибух. Для усунення цього цистерни, заправні станції, трубопроводи та ін. необхідно заземлювати для відведення електростатичних розрядів у землю.

Працівники, що зайняті транспортуванням, зберіганням, заправленням та експлуатацією нафтопродуктів, повинні періодично проходити медичний огляд, добре знати та виконувати інструкції з технічної та протипожежної безпеки.

Оливи та робочі рідини на нафтовій основі також є токсичними речовинами. З оливами, які вміщують присадки, треба поводитися з особливою обережністю, тому що до складу присадок входять: сірка, хлор, цинк, свинець та інші елементи. При порушенні правил роботи з оливами вони можуть викликати алергію, екзему, фолікулярні ураження шкіри, дерматити та ін.

Ряд робіт з ПММ слід виконувати в спеціальному одязу та взутті, при необхідності мати при собі засоби індивідуального захисту (окуляри, рукавички, маски і т.п.). в місцях, де є небезпека випаровування ПММ, не можна знаходитися у взутті з металевими підківками та набійками або в одязі з металевими пряжками. Заборонено використовувати інструмент, який може викликати утворення іскри. Перед початком роботи необхідно перевірити справність електрообладнання та освітлювальних приладів на робочому місці. Випадково проліті у процесі роботи ПММ слід засипати сухим піском та обпилюваннями, а потім видалити з робочого місця.

Забороняється працювати з ПММ під час грози, при відсутності або несправності заземлення, знаходитися під лініями електропередач. Не можна працювати в закритих приміщеннях, де зберігаються ПММ та де відсутня система приточно-витяжної вентиляції. Використані обтиральні матеріали та промащені ганчірки треба зберігати в герметичних ящиках, які добре закриваються.

Заповнені або порожні бочки треба піднімати та транспортувати тільки спеціальними підйомно-транспортними механізмами, а якщо їх немає, то припускається перекочування бочок. Однак це повинні робити не менше двох чоловік, використовуючи щити, міцні канати та ін. Заборонено переносити бочки на спині та перекочувати їх, штовхаючи за край.

Бочку масою більше 100 кг треба вантажити по покатах за допомогою міцних мотузкових канатів. Кут нахилу повинен бути менше 30°.

При перевезенні в кузові автомобіля або причепа заповнені бочки слід установлювати в один ряд зливальними пробками вгору. Щоб бочки не падали, не перекочувалися, не ударялися одна об одну, їх необхідно закріплювати. Заборонено відкривати та закривати пробки, ударяючи по них молотком або іншим інструментом.

Неприпустимо заглядати та опускати в люки резервуарів для визначення рівня ПММ та відбору проб, прати спецодяг у бензині, змащувати машини під час їх роботи, залишати без догляду працюючі зливні та наливні пристрої.

Пішохідні доріжки на території нафтоскладу повинні бути рівними, у нічний час освітлені, а взимку – відчищені від снігу, льоду та посипані піском.

Входити до приміщення, в якому зберігаються ПММ у тарах, можна лише після провітрювання. Оскільки пари ПММ важкіші за повітря, то вони накопичуються у нижній частині приміщення. Тому тут особливо необхідно дотримуватися обережності. Після закінчення кожної робочої зміни слід оглянути тару, що зберігається на складі, та при необхідності усунути течі ПММ та інші недоліки, які можуть викликати пожежу.

При зливанні та наливні ПММ люки резервуарів необхідно відчиняти обережно, перебуваючи при цьому з підвітряного боку. Зливні рукава слід опускати повільно, щоб не було ударів наконечника об стінки резервуара. При заповненні ємності необхідно слідкувати, щоб наконечник рукава був занурений в ПММ. Якщо паливо заливається у пусту ємність, то швидкість її заповнення повинна бути невеликою до тих пір, поки наконечник не зануриться в рідину.

При вмиканні електроживлення перекачувальних пристроїв слід надягати гумові рукавички. Стояти при цьому треба на гумовому килимку або на підставці.

Якщо ПММ перекачують бензиною помпою з приводом від двигуна внутрішнього згорання, то його вихлопна труба

повинна мати іскрогасник, а випускний колектор - пристрій, який забезпечує запобігання викиду полум'я.

Після закінчення заливання труби або рукава треба виймати з горловини тільки після повного зливу з них ПММ. Люки та горловини треба зачиняти обережно та щільно, слідкувати за станом прокладок та кріпильних деталей.

При заправленні ПММ необхідно постійно слідкувати за справністю роздавальних колонок. Видачу палива у баки машин можна здійснювати тільки закритим способом. Забороняється використання кухлів, відер та лійок. Машини під заправлення повинні подаватися своїм рухом з невеликою (до 5 км/год) швидкістю. Інтервал між машинами, що заправляються, повинен бути 3 м від тієї, що заповнюється, та не менше 1 м між тими машинами, що чекають заправлення. Заборонено заправляти машини, які не мають протипожежних засобів.

Як відмічалось у підрозділі 10.5, до складу бензинів входять антидетонатори, які є дуже отруйними рідинами. Тому усі роботи, що зв'язані з транспортуванням, зберіганням та заправленням цих бензинів, необхідно виконувати особливо обережно. Ці бензини використовують тільки за призначенням. Їх не можна використовувати для миття рук та деталей, прання одягу, спалювати у паяльних лампах та ін. Категорично забороняється продувати ротом жиклери карбюратора. Для цього необхідно використовувати компресор або насос. Не припускається розливати бензин, переповняти ємності, припускати підтікання або підкапування. Заправні агрегати та колонки повинні мати таблички з написами "Етилований бензин. Отрута". При заправленні оператор зобов'язаний одягати рукавички. Якщо бензин потрапив на одяг або на відкриті ділянки шкіри, то його видаляють ватою, яка змочена у неетилованому бензині або керосині, після чого шкіру промивають гарячою водою з милом, а одяг перуть.

При попаданні в організм етиленгліколь уражає центральну нервову систему та нирки. Аналогічно впливають на організм гальмові рідини. Смертельна доза етиленгліколю складає всього 50 г (тобто біля 100 г антифризу). При попаданні його, а також гальмової рідини, у шлунок слід негайно надати постраждалому

допомогу: ретельно промити шлунок 2%-м розчином питної соди, штучно викликати блювоту, укрити та зігріти його.

Категорично забороняється обігріватися у кабіні машини при працюючому двигуні, особливо на режимі холостого ходу, коли робоча суміш збагачена, тому що у кабіну поступово проникають відпрацьовані гази, що створює небезпечну для здоров'я концентрацію. Отруєння оксидом вуглецю відбувається непомітно для людини та часто має смертельний наслідок. До прибуття лікаря потерпілого слід перенести на свіже повітря, тепло укрити та напоїти чаєм або кавою. При зупинці подиху необхідно робити штучний подих до появи ознак життя.

При ремонті деталей двигуна з них спочатку слід зняти за допомогою органічних розчинників відкладення, у яких міститься отрутний свинець, та лише після цього приступити до ремонту. Місця, які забруднені етилованим спиртом, необхідно обробляти 3%-м водним розчином хлораміну або хлорним вапном (1 частина сухого вапна на 2-5 частин теплої води).

При отруєнні ПММ потерпілого треба вивести з небезпечної зони на чисте повітря та викликати лікаря. До його прибуття необхідно забезпечити потерпілому покій та дати валеріанові краплі. При різкому ослабленні подиху, настанні непритомного стану йому слід надати чистий кисень та дати понюхати нашатирний спирт, а при необхідності терміново зробити штучне дихання. Якщо в результаті отруєння у потерпілого роздратована слизова оболонка очей, їх слід промити 2%-м розчином питної соди або чистою водою.

Деякі види дизельного палива легкого фракційного складу, так же, як бензини, пожежонебезпечні. Тому необхідно дотримуватися обережності при експлуатації не тільки бензинових двигунів, але й дизелів.

Слід ретельно оберігати ПММ від контакту з відкритим полум'ям, іскрами, гарячими частинами машини, у тому числі з вихлопними колекторами та трубами. Категорично заборонено палити у приміщеннях, де зберігаються ПММ та машини. Необхідно мати укомплектований інвентар та періодично перевіряти його готовність до роботи.

ПММ слід огороджувати заборами висотою не менше 2 м та віддаленими від будівель на відстані не менше 5 м. Територія нафтоскладу повинна бути завжди відчищена від сміття, сухої трави та листя, виробничих відходів.

Резервуари з ПММ треба забезпечити первинними засобами пожежогасіння: хімічними вогнегасниками ОП-3 або ОП-5, бочкою з водою місткістю 200 л, ящиком з піском об'ємом 1 м<sup>3</sup>, носилками, металевими лопатами та пожежними відрами.

При виникненні вогню слід терміново припинити роботу по прийманню та видаванню ПММ. Якщо загоряння відбулося на підлозі, необхідно накрити вогнище азбестом, повстиною або засипати піском. Використовувати воду для гасіння вогню категорично заборонено, тому що ПММ легше води, в результаті чого паливо, що зайнялося, спливе на її поверхню та полум'я ще збільшиться.

Якщо паливо запалилося з яких-небудь причин у резервуарі, необхідно відчинити кришку люка, а вогонь гасити хімічним або вуглекислим вогнегасником. Щоб погасити полум'я від палива, що зайнялося при заправленні машини, її слід негайно вивести з заправної станції та гасити вогонь азбестом, повстиною, ковдрою та ін. Якщо зайнявся двигун, необхідно також відігнати машину від місця заправленні, припинити подачу палива до системи живлення двигуна або вимкнути запалення, після чого гасити вогонь вогнегасником або іншими способами, що забезпечують відсутність доступу повітря до вогнища.

Охорона природи та раціональне використання природних ресурсів – найважливіші економічні та соціальні завдання. В значній мірі вирішення їх залежить від діяльності організацій та підприємств, які випускають машини.

Відомо, що ПММ є токсичними речовинами, які здатні впливати на довкілля. Значна кількість забруднень потрапляє в атмосферу в результаті спалювання палива в двигунах машин. Найшкідливіші з цих забруднень – окис вуглецю – вуглеводні та диоксид азоту. Кількість цих речовин в масових частках розраховують множенням величини витрати палива на відповідні коефіцієнти, які визначають викид двигунами машин шкідливих речовин (табл. 15.1).

Таблиця 15.1

Значення коефіцієнтів, що визначають викид шкідливих речовин

Шкідлива речовина	Значення коефіцієнта	
	Для бензину	Для дизельного палива
Оксид вуглецю	0,6	0,1
Вуглеводні	0,1	0,03
Диоксид азоту	0,04	0,04

Наведені значення коефіцієнтів для кожного підприємства, що експлуатує техніку, можуть змінюватися в бік збільшення або зменшення у порівнянні з даними табл. 15.1, тому що вони залежать від ряду факторів: від структури та складу парку машин, типу двигуна, правильності регулювання паливної апаратури, кваліфікації машиніста та ін.

Для кожного режиму роботи машини існує склад горючої суміші, який забезпечує мінімальний склад шкідливих речовин (табл. 15.2). Тому одна з актуальних задач технічної служби – експлуатація машин в умовах найвигіднішого складу горючої суміші. З метою зниження забрудненості довкілля машиністи машин та ремонтні служби зобов'язані регулювати двигуни машин, що експлуатуються, на чистоту вихлопу. Особи, які порушили правила експлуатації машин, несуть адміністративну, карну та матеріальну відповідальність. До інших заходів по охороні навколишнього середовища та використанню природних ресурсів з урахуванням виробничої діяльності підприємств, які експлуатують техніку, відносяться:

дотримання діючих норм та правил скидання стічних вод у ріки та інші водойми;

встановлення систем для повторного використання води на пунктах мийки та технічного обслуговування машин;

обладнання складів ПММ, пунктів технічного обслуговування машин, а також котельних на рідинному паливі засобами збору та обробки стічних вод та відходів, які містять в собі нафтопродукти;

проведення планово-попереджувального ремонту водопровідних та каналізаційних мереж та споруд.

Таблиця 15.2

Концентрація шкідливих речовин у відпрацьованих газах на характерних режимах [16]

Шкідлива речовина	Концентрація, %			
	Холостий хід	Постійна швидкість	Прискорення від 0 до 40 км/год	Уповільнення від 40 км/год до 0
Оксид вуглецю	0,5-8,5	0,3-3,5	2,5-5,0	1,8-4,5
Вуглеводні	0,03-0,12	0,02-0,6	0,12-0,17	0,23-0,44
Діоксид азоту	0,005-0,01	0,1-0,2	0,12-0,19	0,003-0,005



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Трение, износ и смазка. (Трибология и триботехника) / А.В.Чичинадзе, Э.М.Берлинер, Э.Д.Браун и др.; Под ред. А.В.Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
2. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трибология. Принципы и приложения. - Гомель: ИММС НАНБ, 2002.- 310с.
3. Боуден Ф.П., Трейбор Д. Трение и смазка. - М.: Машиностроение, 1960. – 151 с.
4. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхностей и контактов деталей машин. - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.
5. Основы трибологии /Под ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2001. - 664 с.
6. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машгиз, 1962. - 383 с.
7. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. - М.: Физматгиз, 1963. - 472 с.
8. Дерягин Б.В. Что такое трение? - М.: Изд-во АНССР, 1963. - 230 с.
9. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
10. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. - М.: Наука, 1977. - 230 с.
11. Лебедев П.Н. Избранные сочинения. - М.: Гостехиздат, 1949. – 84 с.
12. Рытов С.М. Теория электрических флуктуаций и теплового излучения. – М.: Изд. АНСССР, 1953.
13. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. - М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
14. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машины. - М.: Машиностроение, 1970. – 310 с.
15. Гаркунов Д.Н. Триботехника. - М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
16. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. - М.: Машгиз, 1959. – 403 с.

17. Справочник по триботехнике / Под ред. М.Хебды и А.В.Чигинадзе. Т.2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. - М.: Машиностроение, 1990. – 420 с.

18. Tribologia. Tribolotechnika / Redakcia naukova M.Szczerek, M.Wisniewski. Radom: Polckie Towarzystwo Tribologiczne, 2000. 728 s.

19. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. - М.: Машиностроение, 1986. - 360 с.

20. Гершман И.С., Буше Н.А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. - 1995. - №1. - Т16. – С. 61 - 70.

21. Основы трибологии ( трение, износ, смазка ): Учеб. для технических ВУЗов / Под ред. А.В.Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

22. Федоров В.В. Современный энергетический анализ процесса трения. Структурно- энергетическая интерпретация трения скольжения. –Калининград: КТУ, 2002. – 168 с.

23. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. - Ташкент: ФАН, 1979. – 186 с.

24. Александров Е.Е., Кравец И.А., Лысиков Е.Н. и др. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей. - Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. - 544 с.

25. Фукс Г.И. Проблемы граничной смазки // Сборник материалов, посвященных научной деятельности. - М.: Нефть и газ, 2001. -192с.

26. Зорин В.А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. - М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.

27. Хрущов М.М., Бабикиев М.А. Исследование изнашивания материалов. - М.: Наука, 1970. – 315 с.

28. Татенбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. - М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.

29. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трения и износ. - М.: Машиностроение, 1977. – 513 с.

30. Погодаев Л.В., Шевченко П.А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. - М.: Судостроение, 1984. – 264 с.

31. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. - М.: Машиностроение, 1971. – 139 с.

32. Воронков Б.Д. Износостойкие материалы в химическом машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1977. – 256 с.

33. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении. - М.: Наука, 1972. – 170 с.

34. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. –М.: Мир, 1973.-280 с.

35. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания //Трение и износ. - 1986. - №4. - Т. 1. - С. 622 - 637.

36. Венцель С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Химия, 1979. – 240 с.

37. Лышко Г.П. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости. – М.: Колос, 1979. - 256 с.

38. Папок К.К. Химмотология топлив и масел. – М.-Воениздат, 1980. – 192 с.

39. Руднев В.К., Венцель Е.С., Лысиков Е.Н. Эксплуатационные материалы для строительных и дорожных машин: Учеб. пособие. - Киев: Институт системных исследований образования Украины, 1993. – 236 с.

40. Венцель Е.С., Жалкин С.Г., Данько Н.И. Улучшение качества и повышение сроков службы нефтяных масел. – Харьков: УкрГАЗТ, 2003. – 168 с.

41. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Справочник / И.Г. Анисимов, К.М. Бадыштова, С.А. Бнатов и др. Под ред. В.М. Школьников. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр “Техинформ”, 1999. – 596 с.

42. Итинская Н.И., Кузнецов Н.А. Автотракторные эксплуатационные материалы. – М.:Агропромиздат, 1987.- 271с.

43. Конарчук В.Є., Лудченко О.А., Чигринець А.Д. Експлуатаційна надійність автомобілів: Підручник: - К.: Вища школа, 2000.- Ч.1, кн. 1. – 609 с.
44. Кисилев М.М. Топливо-смазочные материалы для строительных машин: Справочник. – М.: Стройиздат, 1988. – 272 с.
45. Башта Е.Т. Влияние кавитации на эксплуатационные свойства рабочих жидкостей авиационных гидросистем: Автореф. дисс...канд. техн. наук. – Киев, 1981. - 178 с.
46. Хайнике Г. Трибохимия / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. - 584 с.
47. Кравець А.М. Підвищення працездатності паливної апаратури тепловозних дизелів гідродинамічним диспергуванням палива: Автореф. дисс... канд. техн. наук. - Харків, 2004. - 175 с.
48. Євтушенко А.В. Підвищення зносостійкості підшипників ковзання стабілізацією протизношувальних показників змащувальних мастил: Автореф. дисс... канд. техн. наук. –Харків: УкрДАЗТ, 1999. - 166 с.
49. Беянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. –М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
50. Венцель Е.С. Гранулометрический состав загрязнений как один из факторов, определяющих противоизносные свойства масел //Трение и износ. - 1992. - №4. - Т. 13. – С. 683 - 688.
51. Павлов В.П., Заскалько П.П. Автомобильные эксплуатационные материалы. –М.: Транспорт, 1982. –205 с.



**Є.С. Венцель, Є.М. Лисіков, А.В.Євтушенко**

**Навчальний посібник**

**ОСНОВИ ТРИБОЛОГІЇ ТА ХІММОТОЛОГІЇ**

Відповідальний за випуск Венцель Є.С.

Редактор

---

Підписано до друку \_\_\_\_\_  
Формат паперу 60\*84 1/16. Папір писальний.  
Умовн.-друк. арк.                      Обл.-вид. акр.  
Замовлення №                      .Тираж                      . Ціна

---

Видавництво УкрДАЗТ, свідоцтво ДК №112 від 06.07.2000р.  
Друкарня УкрДАЗТу,  
61050, Харків – 50, пл. Фейербаха, 7

Таблиця 6.8.

Структура класів чистоти відповідно до стандарту NAS 1638 робочих рідин

Розмір частки, мкм	Клас чистоти													
	00	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5...15	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	32000	64000	128000	256000	512000	1024000
15...25	22	44	89	178	356	712	1425	2850	5700	11400	22800	45600	91200	182400
25...50	4	8	16	32	63	125	253	506	1012	2025	4050	8100	16200	32400
50...100	1	2	3	6	11	22	45	90	180	360	720	1440	2880	5760
Більше 100	0	0	1	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024