

2 РЕЖИМИ ТЕРТЯ. ЗМАЩУВАЛЬНІ РЕЧОВИНИ І ЇХ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Довговічність підшипника залежить від режиму тертя його поверхонь. Для забезпечення надійної роботи підшипників у гідродинамічному режимі при малих значеннях коефіцієнта тертя визначають доцільні значення в'язкості μ , швидкості обертання ротора ω і питомого навантаження p_m проєктованих підшипників, використовуючи діаграму залежності коефіцієнта тертя $f_{тр}$ від безрозмірного параметра $\mu\omega/p_m$ (числа Герсі), що була запропонована Герсі і Штрибеком. Для ілюстрації зміни процесу тертя в підшипнику ковзання на рисунку 6 показана залежність коефіцієнта тертя $f_{тр}$ від числа Герсі $\mu\omega/p_m$, що характеризує режим роботи підшипника. Розрізняють рідинне, напіврідинне, граничне і сухе тертя [1,4,5].

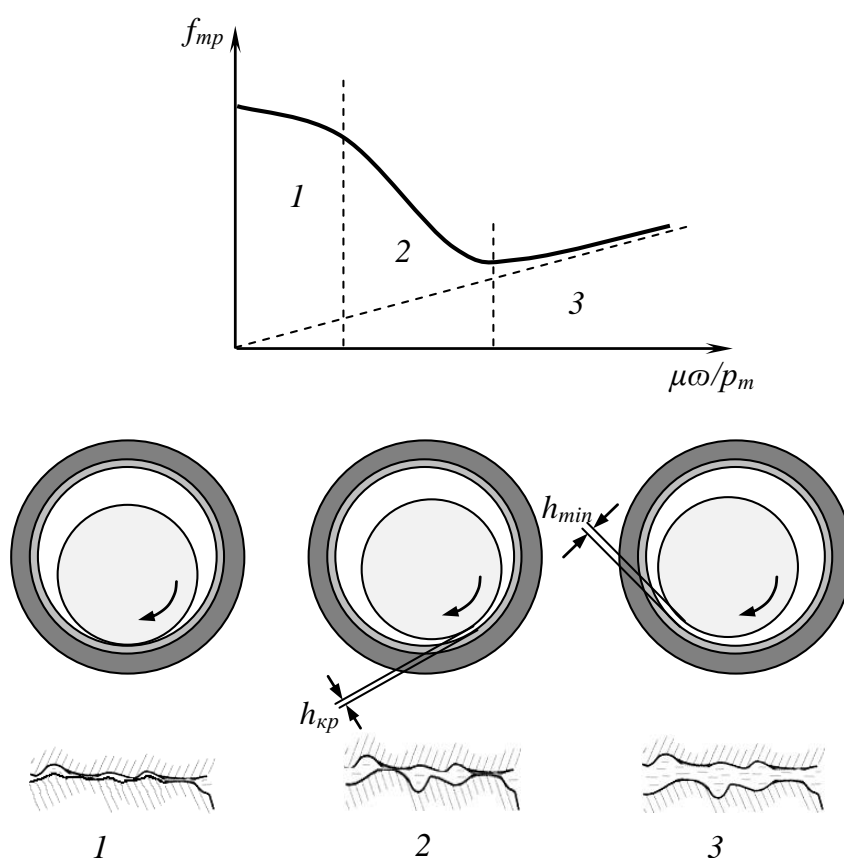


Рисунок 6 – Діаграма Герсі – Штрибека
1- зона граничного тертя; 2 – зона напіврідинного (змішаного) тертя; 3 – зона рідинного тертя

При *рідинному змащуванні* поверхні вала і підшипника розділені суцільною змащувальною плівкою; безпосереднє тертя між металевими поверхнями вала і підшипника відсутнє. Коефіцієнт тертя при рідинному змащуванні незначний ($0,005-0,00005$), втрати на тертя і тепловиділення в підшипнику невеликі. Зносу металевих поверхонь при цьому не відбувається, тому рідинне змащування є найсприятливішим для роботи підшипника [4,5].

Обов'язковою умовою рідинного змащування є інтенсивна безперервна подача змащувальної речовини в підшипник. Тиск в масляній плівці, необхідний для сприйняття діючих на підшипник навантажень і запобігання контакту між металевими поверхнями, створюється при ексцентричному положенні вала в підшипнику внаслідок безперервного нагнітання змащувальної речовини в частину зазору, що звужується, валом, що обертається. Цей самопідтримний процес створення тиску в плівці змащувальної речовини носить назву гідродинамічного змащування.

Гідродинамічне змащування - вид змащувальної дії, при якій повне розділення поверхонь тертя здійснюється змащувальним матеріалом внаслідок тиску, що виникає в шарі рідини при відносному русі поверхонь, що обмежують змащувальний шар. Гідродинамічне змащування має місце в радіальних і осьових підшипниках ковзання різного призначення. Вперше ефект збудження гідродинамічного тиску в змащувальному шарі при обертанні вала в підшипнику ковзання встановив в своїх дослідях Б. Тауер в 1883 – 1885 р. Його результати стали основою для роботи О. Рейнольдса (у 1886 р.), в якій було досліджено рух в'язкої рідини, що не стискається, в тонкому зазорі між двома співвісними циліндрами. О. Рейнольдс уперше отримав диференціальне рівняння, що зв'язує тиск в змащувальному шарі з його товщиною, в'язкістю і швидкістю руху поверхні тертя, і дав розв'язок для деяких окремих випадків. Задачею течії рідини в змащувальному шарі займалися такі видні вчені, як А. Зоммерфельд, М. С. Жуковський, С. А. Чаплигін. Так з'явилася гідродинамічна теорія змащування, засновниками якої можна вважати Петрова, Тауера і Рейнольдса. Значний внесок у розвиток цієї теорії для підшипників ковзання вніс М. В. Коровчинський, а також інші трибологи.

При рідинному змащуванні підшипники ковзання мають здатність саморегулювання при коливаннях робочого режиму, таким чином, вони стійко працюють в широкому діапазоні режимів завдяки залежності в'язкості від температури $\mu(T)$. При підвищенні питомого навантаження зменшується зазор і коефіцієнт тертя $f_{тр}$, внаслідок чого температура в робочій зоні T зменшується і в'язкість μ зростає. В результаті режим роботи підшипника повністю або частково відновлюється. Якщо температура в робочій зоні підшипника підвищується, то в'язкість μ падає, зменшується коефіцієнт тертя $f_{тр}$ і встановлюється новий стан рівноваги. Таким чином, в'язкість μ у виразі $\mu\omega/p_m$ грає роль регулятора, який прагне відновити його первинне значення.

Коефіцієнт тертя $f_{тр}$ досягає мінімуму в той момент, коли змащувальний шар лише покриває шорсткість поверхонь – це критична товщина змащувального шару, подальше зменшення якої приводить до розриву змащувальної плівки і переходу до напіврідинного змащування.

При напіврідинному змащуванні суцільність плівки рідини порушена, і поверхні вала і підшипника торкаються своїми мікронерівностями на окремих ділянках. Цей вид змащування зустрічається при недостатній подачі змащувальної речовини або за відсутності механізму гідродинамічного

змащування, якщо товщина плівки змащувальної речовини недостатня для запобігання зіткненню мікронерівностей вала і підшипника Коефіцієнт тертя при напіврідинному змащуванні значно вищий, ніж при рідинному, і тепловиділення в підшипнику більше. Тому виникнення напіврідинного змащування, особливо в підшипниках, працюючих при великих частотах обертання, зв'язане з небезпекою перегріву і виходу з ладу.

Напіврідинне тертя є нестійким. Будь-який фактор, що знижує параметр, приводить до підвищення коефіцієнта тертя, отже, процес завершується граничним змащуванням.

При граничному змащуванні поверхні вала і підшипника торкаються одна одної повністю або на ділянках великої протяжності. Масляний шар, що розділяє поверхні тертя, відсутній. Змащувальна речовина знаходиться на металевих поверхнях у вигляді адсорбованої плівки, що може витримувати великий тиск та яка вимірюється мілімікронами. Завдяки цьому коефіцієнт тертя нижчий, ніж при сухому терті (без змащування), але значно більший, ніж при напіврідинному, і, тим більше, рідинному змащуванні.

Граничне змащування настає при недостатній подачі змащувальної речовини і зустрічається, наприклад, в підшипниках з періодичною або недостатньою подачею змащувальної речовини, але може виникнути також в підшипниках ковзання при порушенні механізму гідродинамічного змащування. У важконавантажених високооберткових підшипниках виникнення граничного змащування спричиняє перегрів, розплавлення заливки (вкладиша), захоплення і заїдання підшипника. При використуванні спеціальних матеріалів підшипники ковзання можуть працювати в режимі сухого тертя.

Сухе тертя має місце при відносному русі твердих сухих поверхонь. Такий режим тертя в чистому вигляді зустрічається рідко (наприклад, в підшипниках на газовому змащуванні), оскільки контактні поверхні завжди покриті тонким шаром змащувальної речовини, що в свою чергу при русі поверхонь викликає напіврідинне змащування.

Безрозмірна характеристика $\mu\omega/p_m$ може слугувати лише для орієнтовної оцінки роботи підшипника. Для точного розрахунку необхідно встановити зв'язок між конструктивними і геометричними параметрами опори: розмірами опори; зазором між поверхнями тертя; властивостями змащувальної речовини; навантаження; швидкості ковзання; способу тепловідведення. Це стає можливим тільки при розв'язанні системи рівнянь гідродинаміки, які будуть розглянуті надалі.

Розглянемо призначення і види змащувальних речовин.

Змащувальна речовина в підшипниках ковзання повинна знижувати втрати на тертя; сприяти відведенню тепла із зони тертя і зменшувати знос робочих поверхонь. Таким вимогам в тій чи іншій мірі відповідають рідкі змащувальні речовини - оливи, отримані з нафтопродуктів (мінеральні оливи) або синтезовані з неорганічних речовин (синтетичні оливи). У гідромашинах - це вода, в машинах хімічного виробництва - робоче середовище. У

підшипниках, що несуть мале навантаження і працюють з дуже великою швидкістю ковзання - газове або повітряне змащування.

За призначенням мінеральні оливи поділяють: моторні, трансмісійні, гідравлічні, індустріальні, турбінні, газотурбінні, циліндрові, приладові, компресорні, холодильні, ізоляційні. Усередині кожної групи олив їх підрозділяють за рівнем в'язкості і іншими експлуатаційними властивостями.

Для поліпшення їх експлуатаційних властивостей до них додають присадки:

а) в'язкісні присадки - підвищують в'язкість і покращують в'язкісно-температурні властивості оливи (можуть використовуватися полімерні сполуки);

б) депресорні - знижують температуру застигання, перешкоджають формуванню в оливі кристалічної парафінової решітки;

в) антиокислювальні - уповільнюють процеси окислення олив, підвищують їх термоокислювальну стабільність;

г) антикорозійні - усувають корозію металевих поверхонь двигунів і механізмів;

д) миючі - застосовують для зменшення лакових відкладень і осадів на деталях двигуна;

е) диспергуючі присадки (на відміну від миючих) представлені бензолловими сполуками, що мають в молекулі азотовмісну основну групу;

ж) протизносні та протизадирні - для підвищення міцності змащувальної плівки та покращення змащувальної здатності оливи, зменшення зносу, зниження руйнування поверхонь тертя (це сполуки сірки, фосфору та інші);

з) протиспінювальні присадки - зменшують спінення оливи, механізм дії яких заснований на зниженні поверхневого натягу оливи (цим полегшується видалення з оливи розчиненого в ній повітря) і руйнуванні піни.

Спосіб очищення, призначення і деякі інші дані вказують у маркуванні олив, а саме:

1. По властивостях: Л - легка (малов'язка); З - середня (малов'язка); Т - тяжка (високов'язка); П - поліпшена.

2. За способом очищення: А - адсорбційного очищення; В - вилужена (оброблена лише розчином лугу); Г - гідроочищена; К - кислотного очищення; С - очищена із застосуванням селективних розчинників; П - з присадками.

3. За призначенням: Д - дизельна; І - індустріальна; М - моторна; Т - турбінна, трансформаторна; П - приладова.

Зразок маркування: Тп-22 - турбінна з присадкою, в'язкість $\nu = 22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Синтетичні оливи можна поділити на чотири основні групи.

Оливи на основі ефірів карболових кислот і багатоатомних спиртів відрізняються пологою в'язкісно-температурною кривою, зберігають

змащувальну здатність в широкому діапазоні температур $t = -65^{\circ} \dots + 120^{\circ}$, розчиняються в нафтових оливах.

Гліколі одержують як побічний продукт при гідратації окислу етилену. Вартість гліколів нижча вартості інших синтетичних олив. Вони мають добрі змащувальні властивості і малий температурний коефіцієнт в'язкості (ТКВ) в діапазоні $-70 \dots + 200^{\circ}\text{C}$. Гліколі застосовують в авіаційних приладах, двигунах, компресорах і т.п. З нафтовими оливами гліколі змішуються погано.

Силікони представляють собою кремнійорганічні сполучення. Відмітна особливість - полого в'язкісно-температурна залежність, найменший ТКВ в порівнянні з рештою синтетичних і багатьох нафтових олив. По змащувальній здібності вони поступаються мінеральним оливам. Термічна і хімічна стабільність зберігається в широкому діапазоні температур $-70 \dots + 200^{\circ}\text{C}$. Основне застосування - гідравлічні передачі, амортизатори.

Фторуглероди і хлорфторвуглеці мають високу термічною стійкістю до 300°C , температура застигання $-10 \dots -300^{\circ}\text{C}$. Вони мають великий ТКВ, тому поступаються іншим синтетичним і мінеральним оливам. Особливість цих олив - вони негорючі, стійкі в кислотах і лугах. Область їх застосування - в спецкомпресорах, вакуумних і інших машинах хімічної промисловості.

Тваринні і рослинні оливи дуже дефіцитні (касторове, гірчичне), тому їх застосовують у вигляді домішок до мінеральних олив.

Консистентні мастила застосовуються рідко, в опорах, що несуть велике навантаження при малій швидкості ковзання, коли не можна забезпечити рідинний режим змащування.

Вода застосовується для змащування підшипників з натуральної і пластифіцированої деревини, пластиків, текстолітів.

Повітряне і газове змащування застосовується в невеликих підшипниках, які несуть мале навантаження при великій швидкості обертання вала - порядку декількох десятків тисяч обертів за хвилину. За таких умов рідке змащування приводить до великих втрат на тертя. Оскільки в'язкість газу значно нижче за рідину, втрати на тертя при газовому змащуванні виявляються вельми малими. Застосовуються в підшипниках високооберткових роторів газових турбін, вертикальних валів центрифуг і інших.

Розглянемо основні властивості змащувальної речовини.

В'язкість - характеризує здатність змащувальної речовини, чинити опір зсуву під дією прикладеної сили. В'язкість рідини визначається співвідношенням, яке експериментально встановив І. Ньютон. Якщо простір між двома горизонтальними паралельними пластинами заповнений рідиною і менша верхня пластина рухається з постійною швидкістю, тоді як нижня залишається на місці, то виконується рівність

$$T = \mu S \frac{V}{h}, \quad (1)$$

де T - сила, необхідна для підтримки рівномірного руху пластини, S - площа поверхні і V - швидкість верхньої пластини, h - товщина плівки рідини між пластинами і μ - коефіцієнт пропорційності, який називається абсолютною (динамічною) в'язкістю. У системі одиниць СІ абсолютна в'язкість вимірюється в пуазах ($[Пз]=[Па\cdot c]$). Назва «пуаз» дана на честь французького фізика Жана Пуазейля.

Таким чином, з одного боку, в'язкість, як внутрішнє тертя, є причиною виділення тепла і втрат енергії, а з іншого - вона дозволяє рідкій плівці змащувального матеріалу утримувати навантаження. У загальному випадку сила рідинного тертя визначається законом Ньютона:

$$T = \int \mu \frac{dv}{dn} dS, \quad (2)$$

де μ - динамічна в'язкість, $\frac{dv}{dn}$ - градієнт швидкості зсуву по нормалі до напрямку руху, S - площа зсуву.

Кінематична в'язкість $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ характеризує сили опору ковзанню під дією власних сил тяжіння.

Для сумішей нафтопродуктів кінематична в'язкість визначається як:

$$\nu_{см} = \frac{(n_1+n_2)\nu_1\nu_2}{n_1\nu_1+n_2\nu_2}, \quad (3)$$

де n_1, n_2 - вміст компонентів в частках від 1, ν_1, ν_2 - кінематичні в'язкості.

В'язкість обумовлена молекулярною будовою речовини, з пониженням температури олива загусає.

Температурою застигання оливи називається температура, при якій охолоджене в пробірці олива загусає настільки, що при нахилі пробірки на 45° рівень оливи в ній залишається нерухомим впродовж 1 хвилини.

З підвищенням температури в'язкість оливи зменшується, ступінь пологості залежності в'язкості від температури оцінюється індексом в'язкості (ІВ) і температурним коефіцієнтом в'язкості (ТКВ). Якщо $ІВ > 80 \dots 100$, то олива володіє добрими в'язкісно-температурними властивостями, при $ІВ \leq 50 \dots 60$ - незадовільними. Чим менше ТКВ, тим більше полого йде крива залежності в'язкості від температури.

Температурний коефіцієнт в'язкості обчислюється як:

$$TKB_{20-100} = \frac{(\nu_{20} - \nu_{100})100}{\nu_{50}(100 - 20)} = 1.25 \frac{\nu_{20} - \nu_{100}}{\nu_{50}}, \quad (4)$$

де $\nu_{20}, \nu_{50}, \nu_{100}$ - в'язкості оливи при $t=20, 50, 100$.

Для інтерполяції в'язкісно-температурної залежності в невеликому температурному інтервалі застосовується формула:

$$\mu(t) = A_t \cdot e^{\alpha_t t}, \quad (5)$$

де A_t , α_t - коефіцієнти, що характеризують пологість в'язкісно-температурної залежності.

В'язкість мастила в значній мірі залежить від температури і у меншій мірі від тиску. При збільшенні тиску до $0,5 \text{ МПа}$ збільшення в'язкості дуже мале і його можна не враховувати.

В'язкість оливи зростає з підвищенням тиску, що може помітно позначитися на характері течії мастила в шарі. Залежність в'язкості від тиску при $p \leq 300 \text{ МПа}$ для деяких олив виражається формулою:

$$\mu(p) = \mu_0 e^{\beta_p p}, \quad (6)$$

де μ_0 - в'язкість при атмосферному тиску; β_p - пьезокоефіцієнт, залежний від хімічного складу оливи і температури.

З підвищенням температури в'язкість оливи у меншій мірі залежить від тиску. При високому тиску в'язкість зростає настільки, що рідина втрачає свої властивості і перетворюється на пластичне або квазітверде тіло.

В'язкість оливи, що аеріровано повітрям, вища за в'язкість чистої оливи. При об'ємному змісті повітря до $D \leq 15\%$ в'язкість визначається як:

$$\mu_{см} = \mu(1 + \eta \cdot D), \quad (7)$$

де μ - в'язкість чистої оливи; $\eta = 0,015$ - емпірична константа; D - об'ємний зміст повітряних пузирів.

Вода, емульгована в маслі, збільшує коефіцієнт в'язкості. Наприклад, зміст 5% води в маслі збільшує коефіцієнт динамічної в'язкості емульсії на $15-20\%$.

Густина - це маса, що припадає на одиницю об'єму:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (8)$$

Залежність густини від температури визначається як:

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + R_V(t - 20)}, \quad (9)$$

де ρ_{20} - густина при температурі $t=20^{\circ}\text{C}$, R_v - температурний коефіцієнт об'ємного розширення.

Зміна густини оливи залежно від тиску при $p \leq 350 \text{ МПа}$ можна виразити формулою:

$$\rho_p = \rho_0 (1 + m \cdot p + n \cdot p^2), \quad (10)$$

де p - тиск; m і n - коефіцієнти, які залежать від температури оливи.

Стисливість характеризується коефіцієнтом об'ємного стиснення $\beta_{сж}$, який рівний відносній зміні об'єму $\Delta V/V$ при підвищенні тиску на Δp . Величина $E_V = 1/\beta_{сж}$ - називається модулем об'ємної пружності, із збільшенням температури E_V оливи знижується, а із збільшенням тиску - підвищується.

Нерозчинені гази значною мірою впливають на пружність газомасляної суміші. При незначному ($0,1-0,5\%$) змісті газу при атмосферному тиску стисливість суміші підвищується в сотні і тисячі разів.

Теплоємністю називається кількість теплоти, яким володіє тіло при даній температурі (вважаючи, що телосодержання $t = 0^{\circ}\text{C}$ равно 0). Іншими словами, це та кількість тепла, що необхідна для нагріву оливи від 0°C до деякої температури t . Для одиниці маси:

$$q_t = c_t t, \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right). \quad (11)$$

де c_t - питома теплоємність речовини. Теплоємність змащувальних олив залежить від температури, і звичайно лежить в межах $1,67-2,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$.

Теплопровідність - здатність оливи проводити теплоту, характеризується коефіцієнтом теплопровідності:

$$\lambda = -\frac{|\bar{q}|}{\text{grad } t}, \quad (12)$$

де $|\bar{q}|$ - тепловий потік.

Коефіцієнт теплопровідності - це кількість теплоти, що проходить в одиницю часу через одиницю площі ізотермічної поверхні при температурному градієнті рівному 1.

Змащувальна здатність - це здатність створювати на поверхні, що треться, тонкі, та міцні адсорбовані шари змащувальної речовини. Ефективність змащувальної дії оливи залежить від його властивостей,

природи твердих поверхонь і характеру взаємодії молекул змащувальної речовини і твердого тіла.

Тонка адсорбована плівка мастила поводитья як багат шарове кристалічне утворення високої пружності, здатна витримувати без руйнування великий нормальний тиск (модуль Юнга для адсорбованих плівок в 2 рази вищий, ніж для сталі). У тангенціальному напрямі потрібні вельми малі сили для руйнування адсорбованого шару. Адсорбований граничний шар руйнується від термічних і механічних дій.

Старіння змащувальної речовини. При контакті змащувальної речовини з повітрям відбувається окислення, внаслідок чого змінюються його фізичні і хімічні властивості. А саме - підвищується його в'язкість, густина, щільні продукти окислення випадають в осад. Поява осаду призводить до потемніння оливи, продукти окислення служать каталізатором для подальшого окислення.

Підвищення температури мастила приводить до істотного прискорення його окислення. При підвищенні температури на кожні 10°C понад 110°C реакція окислення швидшає приблизно в 2 рази, а понад 220°C до 275°C - в 42 рази. При $310-350^{\circ}\text{C}$ відбувається самозаймання мастила.

Здатність мастила протистояти окислювальній дії кисню називається стабільністю.

Корозійна агресивність мастил оцінюється втратою маси металу (у грамах) з 1 м^2 поверхні. Вода, що потрапляє в мастило, різко збільшує швидкість корозії, на її інтенсивність також впливають температура і характер продуктів окислення.

Вогнестійкість. Під час роботи агрегатів мастила нагріваються і найбільш летючі його фракції випаровуються. Вони утворюють з повітрям суміші, які спалахують від відкритого джерела вогню.

Температурою спалаху зневодненого мастила називається така температура, при якій суміш парів мастила, що випарувалися, з повітрям при піднесенні відкритого полум'я спалахує на 2-3 секунди, а потім гасне.

Температура, при якій спалахують від піднесеного джерела полум'я не тільки пари, але і нагріте мастило і горить не менше 5 секунд, називається температурою займання.

Низьку температуру займання мастилу надають світлі нафтопродукти (бензин, керосин, що потрапили в мастило). Нафтові оливи можуть займатися в середовищі повітря і кисню без піднесення відкритого полум'я.

Температурою самозаймання називається найкраща температура, при якій мастило спалахує без стороннього джерела запалювання.

Для турбінної оливи Тп-22 температура самозаймання при атмосферному тиску в кисні $310-350^{\circ}\text{C}$, на повітрі - $370-380^{\circ}\text{C}$.

Радіаційна стійкість. Радіаційне опромінювання мінеральної оливи спричиняє зміну його хімічного складу, прискорює процес окислення і виділення газів, підвищує в'язкість, збільшує випаровуваність, знижує температуру спалаху мастила, стрибкоподібно погіршує змащувальні і

охолоджуючі властивості. Мастило темніє, набуває червоно-коричневий відтінок, при великих дозах опромінювання може перетворюватися на желеподібні і навіть тверді продукти. При дозі опромінювання до 10^4 Дж/кг наявність радіоактивного випромінювання не викликає ускладнень при експлуатації нафтових турбінних олив.

Розглянемо основні критерії вибору змащувальної речовини. При виборі змащувального матеріалу слід в першу чергу враховувати робочу температуру, температуру атмосферного повітря, тиск і зазор між поверхнями, що труться, швидкість руху, матеріал і характер поверхонь, присутність вологи, допустимість витоків і тип змащувальної системи. Змащувальна речовина повинна утворювати суцільну плівку між деталями, що труться, витримувати тиск, що виникає в зазорі, чинити опір корозії і дії води, окисленню і карбонізації, не мати надмірної летючості, зберігати текучість при знижених температурах, витримувати великі швидкості поступального і обертального руху, не давати великого витoku, бути хімічно інертною, характеризуватися мінімальними втратами на рідинне тертя і забезпечувати економічну змащувальну дію, як відносно терміну заміни змащувальної речовини, так і відносно довговічності механічного обладнання. Також необхідно враховувати вимоги, що обумовлені експлуатацією машини. Змащувальна речовина повинна відводити тепло і при цьому не ускладнювати експлуатацію машини.

Всі розглянуті вище властивості олив враховують при виборі сорту змащувальної речовини. При цьому основними критеріями оцінки змащувальних матеріалів є два показники, які обумовлюють працездатність і довговічність опор ковзання: змащувальна здатність і в'язкість.

Вирішальним чинником, що обумовлює тривалу працездатність опори рідинного тертя, є середня температура в змащувальному шарі, яка багато в чому залежить від правильно обраного сорту змащувальної речовини. Для оцінки нижнього граничного значення в'язкості використовують критерій Зоммерфельда [1,4].

Критерій Зоммерфельда $[So]$, відповідає умовній межі між напіврідинним і рідинним змащуванням:

$$\begin{aligned} &\text{при } \frac{p_m \psi^2}{\mu \omega} < [So] - \text{рідинне тертя,} \\ &\text{при } \frac{p_m \psi^2}{\mu \omega} \geq [So] - \text{напіврідинне тертя.} \end{aligned} \tag{13}$$

При виборі сорту мастила, з умови рідинного тертя визначаємо найменше значення μ (чим більше в'язкість мастила, тим більше втрати на тертя в підшипнику) для певної температури t із умови:

$$\mu_t \geq \frac{p_m \psi^2}{\omega [So]}, \quad (14)$$

де $p_m = P/(ld)$ - питоме навантаження на підшипник, $\psi = \delta/r$ - відносний радіальний зазор підшипника, ω - частота обертання, $[So]$ - число Зоммерфельда, що визначається за таблицею при відомій геометрії підшипника (за діаметром d , відносною довжиною $\lambda = l/d$ і відносним зазором ψ).