

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Андрій ЗАГОРУЛЬКО
(підпис)

_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 131 Прикладна механіка, освітньо-професійної програми «Комп'ютерний інжиніринг в механіці», на тему: Комп'ютерне моделювання зношування поверхні валу сальниковою набивкою.

Здобувача групи КМ-91-1 РОСЛЯКОВА Михайла Юрійовича.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Михайло РОСЛЯКОВ
(підпис)

Керівник: доцент, к.т.н., доцент Андрій ЗАГОРУЛЬКО _____
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра: 51 с., 24 рис., 16 джер.

Предмет дослідження – зносоконтактна задача.

Об'єкт дослідження – герметизація валу відцентрового насоса.

Мета роботи – визначення рівня зносу вала для різних типів сальникової набивки.

Сальникові ущільнення займають важливе місце в машинобудуванні, забезпечуючи надійну герметизацію між рухомими частинами механізмів. Оптимальний вибір сальникової набивки має вирішальне значення для ефективності та тривалості роботи таких ущільнень. У цій бакалаврській роботі досліджується проблема вибору найбільш ефективного типу сальникової набивки для сальникового ущільнення на валу.

У цій роботі була змодельована конструкція сальникового ущільнення на валу. Задача, пов'язана з контактом між сальниковою набивкою та валом. У нашій роботі був розглянутий випадок, коли відбувається знос вала. Задача була розв'язана з використанням програмного забезпечення ANSYS. Основними цілями було визначення деформації, напруження та контактного тиску на валу.

На основі отриманих результатів було встановлено, що вибір найбільш ефективного типу сальникової набивки для сальникового ущільнення на валу має вирішальне значення для його функціонування та тривалості. Результати аналізу, проведеного з використанням програмного забезпечення ANSYS, демонструють, що певні типи сальникової набивки можуть забезпечити кращу герметичність та знизити знос вала. Ці результати можуть бути використані в машинобудуванні для покращення якості та надійності ущільнень зі сальниковими ущільненнями.

З урахуванням отриманих результатів дослідження рекомендується звернути увагу на тип сальникової набивки, що показав найкращі результати у виміряному контексті. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення впливу інших параметрів, таких як тиск, температура та швидкість обертання, на ефективність

сальникового ущільнення. Додатково, можна розглянути можливість використання нових матеріалів для сальникової набивки з метою поліпшення його характеристик.

Надійні результати дослідження, отримані в цій бакалаврській роботі, сприятимуть подальшій розробці та вдосконаленню сальникових ущільнень, що є важливим напрямком у сучасному машинобудуванні.

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ, САЛЬНИКОВЕ УЩІЛЬНЕННЯ, ANSYS.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Огляд літератури	9
1.1. Знос поверхні валу	9
1.1.1. Причини та наслідки.....	9
1.1.2. Методи вимірювання та аналізу	10
1.2. Сальникова набивка	10
1.2.1. Конструкція та принцип роботи	11
1.2.2. Защільнювальні матеріали	12
1.2.3. Азбестовмісні набивки	13
1.2.4. Безазбестовмісні набивки.....	14
1.2.5. Умовні позначення сальникових набивок	15
1.3. Експериментальне дослідження процесу зносу.....	15
1.3.1. Методи вимірювання зносу поверхонь тертя	15
1.3.2. Визначення зносу за вмістом продуктів зносу в змащувальному матеріалі.....	17
1.3.3. Метод мікрометричних вимірювань	18
1.3.4. Метод штучних баз	18
1.3.5. Метод поверхневої активації	21
1.4. Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на знос.....	21
1.5. Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя.....	22
1.5.1. Вимірювання сили тертя	22
1.5.2. Вимірювання температури.....	23
1.6. Висновок	27
2. Моделювання процесу зносу	28
2.1. Комп'ютерне моделювання	28
2.2. Модель зносу	29
2.2.1. Приклад моделі зносу для манжетного ущільнення	30
2.2.2. Макромасштабна структурна модель	34

2.2.3.	Числовий алгоритм	35
2.3	Висновок	36
3.	Розв'язок задачі.....	38
3.1.	Створення моделі	38
3.2.	Результати моделювання.....	41
3.3.	Висновок	46
	Висновки	48
	Список використаних джерел	50

ВСТУП

Зношення поверхні валу є поширеною проблемою в різних галузях промисловості, таких як нафтогазова, виробництво електроенергії та виробництво. Знос валу може призвести до збільшення витрат на технічне обслуговування, зниження ефективності обладнання та навіть до збоїв системи. Однією з основних причин зносу вала є тертя вала об сальникову набивку, який є механічним ущільненням, що використовується для запобігання витоку рідини в насосах та іншому обладнанні. Таким чином, важливо розвинути краще розуміння зносу поверхні вала з сальниковою набивкою, щоб запобігти дорогим поломкам обладнання.

Сучасні методи прогнозування зносу поверхні валу часто є неточними та трудомісткими, що вимагає дорогих фізичних випробувань обладнання. Комп'ютерна модель зносу поверхні вала з сальниковою набивкою може забезпечити економічно ефективне вирішення цієї проблеми. Однак створення точної комп'ютерної моделі вимагає глибокого розуміння складних взаємодій між валом і сальниковою набивкою.

Метою цього дослідження є розробка комп'ютерної моделі зносу поверхні вала з сальниковою набивкою, яка може точно передбачити ступінь і місце зносу. Для досягнення поставленої мети в рамках цього дослідження буде поставлено наступні завдання:

- Проведено огляд літератури, щоб визначити існуючі моделі та дослідити знос поверхні валу та сальникової набивки.
- Зібрано дані про фізичні властивості та умови експлуатації обладнання.
- Розроблено числову модель вала і сальникової набивки з використанням відповідного програмного забезпечення.
- Перевірено модель за допомогою експериментальних даних.
- Проаналізовано результати та зроблено висновки щодо точності та практичності моделі.

Загалом, це дослідження сприятиме розумінню зносу поверхні валу з сальниковою коробкою та стане цінним інструментом для прогнозування та запобігання несправностей обладнання.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Знос поверхні валу

1.1.1. Причини та наслідки. Знос поверхні валу спричинений тертям і ковзанням валу по сальниковій набивці, що призводить до втрати матеріалу поверхні. Основними факторами, які сприяють зношенню поверхні вала, є зміщення, вібрація, високий тиск і висока температура. Наслідки зносу поверхні валу включають зниження ефективності обладнання, збільшення витрат на технічне обслуговування та навіть збої системи.

Сальники не відрізняються високою ціною, проте їх знос може стати причиною поломки дорогих вузлів і підшипників. Тому ці деталі, постійно піддаються впливу агресивного середовища, підвищеної температури і тертя, необхідно регулярно міняти. Сальники виходять з ладу з наступних причин:

- Розплавлення. Під впливом високої робочої температури і природного старіння матеріалу матеріал повністю або частково втрачає еластичність, його притиснення погіршується.
- Механічний знос. Тертя об рухомі деталі руйнує структуру робочих поверхонь, в результаті чого вони змінюють форму. Процес прискорюється при недостатній мірі мастила сполучення.
- Поява подряпин і рубців. Забруднене масло, пошкодження робочої поверхні валу або помилки при монтажі призводять до передчасного зносу сальникового ущільнення.
- Розрив набивки. При надлишковому тиску набивка розривається або на ній з'являються V-подібні тріщини.
- Пошкодження пружинного кільця. У результаті механічного впливу корозії металева пружина розривається або злітає з сальника. В результаті погіршується притиск набивки і деталь перестає виконувати свої функції.

Сальникові ущільнення не підлягають ремонту. При виході деталей з ладу їх необхідно замінити новими. На наближення моменту заміни вказують наступні ознаки:

- Сторонні звуки при роботі механізмів. Це говорить про твердині або забрудненні набивання сальника.

- Поява протікання в місцях сполучення функціональних деталей. Це можуть бути патьоки масла на стінках двигуна, витік антифризу з помпи охолодження. Зволікання з заміною сальників призводить до витоку мастила або охолоджуючої рідини. Через пошкоджений сальник в підшипники агрегатів може потрапити бруд і пісок, що призведе до серйозних поломок, які потребують недешевого ремонту.

1.1.2. Методи вимірювання та аналізу. Було розроблено різні методи для вимірювання та аналізу зносу поверхні валу, включаючи фізичні методи вимірювання, такі як профілометрія та мікроскопія, а також непрямі методи, такі як аналіз вібрації та тепловізор. Однак ці методи можуть бути трудомісткими, дорогими та не дати точних результатів. Тому існує потреба в розробці більш ефективних і точних методів вимірювання та аналізу зносу поверхні валу.

1.2. Сальникова набивка

Сальникова набивка — це механічне ущільнення, яке використовується для запобігання витоку рідини в насосах, компресорах та іншому обладнанні. Вона складається з камери, в якій розміщено набивний матеріал або ущільнювальне кільце, яке стискається до вала для створення ущільнення. Сальникова набивка також служить для відведення тепла і змащення вала.

Сальникове ущільнення є найпоширенішим типом сальникової набивки, що складається з плетеного або тканого набивного матеріалу, такого як графіт, PTFE або арамідні волокна. [1]

У механічних ущільненнях для ущільнення використовується комбінація обертових і нерухомих частин, тоді як у манжетних ущільненнях для ущільнення

використовується гумовий або пластиковий виступ. Вибір типу сальникової набивки залежить від конкретного застосування та умов експлуатації.

Сальникове ущільнення — зацілювач рухомих з'єднань деталей з метою герметизації щілин між рухомими і нерухомими деталями; забезпечується податливими елементами, що одягають на вал (шток), або набивками, що закладаються у виточки чи заглибини кришок, корпусів та інших деталей.

Найчастіше сальникові ущільнення використовуються у трубопровідній арматурі, а також в окремих механізмах промислової, транспортної та побутової техніки. [2]

Крім рухомих вузлів, сальникові набивки можуть використовуватись для зацілювання нерухомого обладнання, наприклад в трубних і кабельних проводках.

1.2.1. Конструкція та принцип роботи. Принцип побудови сальникового ущільнення полягає у тому, що на зовнішній стороні кришки чи корпуса в місці, де через них проходить шток або вал, створюється сальникова камера (сальникова коробка англ. Stuffing box), в яку вкладається ущільнювач — сальникова набивка. Сальниковий ущільнювач складається з корпуса, упорного кільця (грундбукса), натискної втулки, сальникового кільця (набивки) і стяжних шпильок або накидної гайки. [3]

Ущільнювання досягається притисканням сальникової набивки до рухомого вала (штоку). Між валом та грундбуксою забезпечується зазор 0,5–0,75 мм, а між валом і натискною втулкою – зазор 1–1,5 мм. Ці зазори запобігають можливості зносу вала у відповідних місцях. Грундбукса і натискна втулка зазвичай виготовляються з чавуну.

В деяких конструкціях сальниковий пристрій одночасно є опорою для вала (підшипником ковзання). Тоді зазор між валом і натискною втулкою робиться мінімальним. Натискна втулка оснащується пристроєм для подавання та розподілу мастила і виготовляється з бронзи або оснащується бронзовою вставкою. При відсутності зазору між валом і грундбуксою остання також виготовляється з бронзи.

Кожна марка сальникових набивок розрахована на вплив визначених тисків, температур і швидкостей ковзання, граничні значення яких регламентовані ДСТУ EN ISO 9222-1:2018 для конкретних умов експлуатації. [4]

Залежно від марки сальникової набивки в якості робочих середовищ можуть виступати повітря, азот, інертні гази, водяна пара, важкі і легкі нафтові продукти, вода питна та технічна, органічні продукти, рідкий і газоподібний аміак, лужні середовища, морська вода, вуглеаммонієві солі, різні види кислот.

ДСТУ EN ISO 9222-1:2018 поширюється на волокнисті та комбіновані сальникові набивки. Сальникові набивки виготовляються круглого, квадратного і прямокутного перетинів. А в залежності від особливостей технологічного процесу і способу виготовлення діляться на кручені, плетені і скатані сальникові набивки. Граничні відхилення розмірів перетину кручених, плетених і згорнутих набивок сальникових повинні знаходитися в межах вимог ДСТУ EN ISO 9222-1:2018.

1.2.2. Защілювальні матеріали. Як набивки традиційно використовують повстяні матеріали, конопляне клоччя, азбестові матеріали. У сучасній техніці використовують набивки на основі фторопласту а також, тефлонового (PTFE), арамідного і вуглецевого волокна, виконані методом діагонального (діаплекс, мультифлекс) плетіння, з насиченням емульсіями PTFE та дрібнодисперсного графіту. [1]

Допустимі температури експлуатації:

- при використанні традиційних матеріалів до 80 °С;
- при використанні полімерних матеріалів не вище 250 °С;
- при використанні азбестових та вуглецевих матеріалів до 400 °С.

Перелічені вище набивки можуть експлуатуватися при тисках 0,6...4 МПа в залежності від температури та матеріалу для просочування. Просочування служить для покращення герметизації і зменшення коефіцієнта тертя у парі набивка—вал. Для просочування набивок використовують сало, парафін, бітум, графіт, рідке скло, солідол, віскозин та ін. За своєю структурою набивки можуть бути одно- і багатошарового, наскрізного плетіння сердечника.

1.2.3. Азбестовмісні набивки. Ці набивки в позначенні марки мають символ «А». Розрізняють такі марки азбестових сальникових набивок:

- АС – набивка сальникова плетена суха.
- АСС – набивка сальникова плетена, з сердечником з склоровінгу, суха.
- АПК-31 – набивка сальникова кручена, просочена жировим антифрикційним складом (на основі нафтових екстрактів) та дрібнодисперсним графітом.
- АП-31 – набивка сальникова плетена, просочена жировим антифрикційним складом (на основі нафтових екстрактів) та дрібнодисперсним графітом.
- АСП – набивка сальникова плетена з сердечником з склоровінгу, просочена жировим антифрикційним складом та дрібнодисперсним графітом.
- АСП-31 – набивка сальникова плетена з сердечником з склоровінгу, просочена жировим антифрикційним складом (на основі нафтових екстрактів) та дрібнодисперсним графітом.
- АПР – набивка сальникова плетена, з латунним дротом, просочена жировим антифрикційним складом та дрібнодисперсним графітом.
- АПР-31 – набивка сальникова плетена, з латунним дротом, просочена жировим антифрикційним складом (на основі нафтових екстрактів) та дрібнодисперсним графітом.
- АПРПС – набивка сальникова плетена, з латунним дротом, прогумована, суха, з дрібнодисперсним графітом.
- АПРПП – набивка сальникова плетена, з латунним дротом, прогумована, просочена антифрикційним складом та дрібнодисперсним графітом.
- АФТ – набивка сальникова плетена, просочена суспензією фторопластуз тальком.
- АГ, АГС та АГІ – набивка сальникова плетена, графітована, суха (С), додатково інгібування (І).
- АФВ – набивка сальникова плетена, просочена жирової змазкою з суспензією фторопласта і графіту.

- АФ-1 – набивка сальникова плетена, просочена суспензією фторопласту.
- ПАФС – набивка сальникова плетена, поліпропіленова з азбестовим сердечником, просочена суспензією фторопластузі слюдою.
- АР – набивка сальникова скатана, прогумована.
- АРС – набивка сальникова скатана, прогумована, з гумовим сердечником.

1.2.4. Безазбестові набивки. Безазбестові марки сальникових набивок:

- ВАТІ – набивка сальникова плетена з фторопластових графітонаповнених волокон (PTFE) з кутовим обплетенням з арамідного волокна, просоченого фторопластовою суспензією.
- ФФ – набивка сальникова плетена, фторлонова, просочена суспензією фторопласту.
- УС – набивка сальникова плетена з вуглецевих ниток, суха.
- ХХН – набивка сальникова плетена, бавовняна, просочена жировим антифрикційним складом дрібнодисперсним графітом.
- ЛП – набивка сальникова плетена з луб'яних волокон, просочена жировим антифрикційним складом та дрібнодисперсним графітом.
- ППФ – набивка сальникова плетена, фторопластова з сердечником з луб'яних волокон, просочена жировим антифрикційним складом.
- ХБП – набивка сальникова бавовняна плетена.
- ХБР – набивка сальникова скатана бавовняна прогумована.
- ХБС – набивка сальникова бавовняна суха.
- ХБРС – набивка сальникова скачана бавовняна прогумована з гумовим сердечником.

1.2.5. Умовні позначення сальникових набивок. Умовне позначення сальникової набивки містить марку набивки, розміри її поперечного перерізу і вказівку ДСТУ EN ISO 9222-1:2018. Приклад умовного позначення набивки сальникової крученої марки АПК-31 діаметром 3 мм: Набивка кручена марки АПК-31 з ДСТУ EN ISO 9222-1:2018. Те ж, для набивки сальникової багатошарової

плетеної марки АП-31 квадратного перетину розміром 18 мм: Набивка багат шарового плетіння марки АП-31 18x18 ДСТУ EN ISO 9222-1:2018.

Поставка сальникових набивок здійснюється в бухтах. Набивки однієї марки і одного типорозміру намотуються в бухти або бобіни по 5–30 кг в залежності від розміру перетину набивки і щільно перев'язуються, зазвичай запаковується в поліетиленовий мішок. Кожна бухта або бобіна має ярлик, що містить наступну інформацію:

- товарний знак або товарний знак і найменування підприємства-виробника;
 - найменування і марку продукції;
 - спосіб виготовлення (структуру);
 - розміри набивок сальникових;
 - масу бухти чи бобіни;
 - номер партії;
 - дату виготовлення;
 - штамп служби технічного контролю;
 - для набивок сальникових тропічного виконання маркування містить додатковий символ «Т» (наприклад, АП-31-Т 18x18 ДСТУ EN ISO 9222-1:2018);
- позначення Державного Стандарту– ДСТУ EN ISO 9222-1:2018.

1.3. Експериментальне дослідження процесу зносу

1.3.1. Методи вимірювання зносу поверхонь тертя. У сучасному машинобудуванні існує ряд різноманітних методів вимірювання зносу, які можна класифікувати за їх складністю та точністю вимірювань. Найпростіші методи передбачають вимірювання розмірів зношеної деталі традиційними засобами, тоді як більш складні методи базуються на використанні ядерно-фізичних процесів.

Область застосування конкретного методу вимірювання зносу залежить від поставленої мети досліджень, необхідної точності вимірювань, можливості вимірювання навіть незначного зношення, часу, необхідного для проведення

вимірювань зносу, можливості вимірювання зносу в умовах експлуатації без розбирання деталі, та, в ряді випадків, без зупинки машини. Крім того, враховуються затрати часу та матеріальних ресурсів, необхідних для проведення повного циклу підготовки до вимірювань зносу.

Для вимірювання зносу в машинобудуванні можна застосовувати як інтегральні, так і диференційні методи оцінювання.

У ряді випадків використовують також методи оцінювання зносу за вихідними параметрами виробу чи спряження.

Інтегральні методи вимірювання зношення можна поділити на дві категорії: А - методи вимірювання, що базуються на оцінюванні сумарного зносу; та Б - методи вимірювання, що базуються на аналізі продуктів зносу у змащувальному середовищі. До різновидностей методу А відносять вимірювання зношення за зміною маси або об'єму зразка, а також за заміром зазору в спряженні. До різновидів методів вимірювання, що базуються на аналізі продуктів зносу в змащувальному середовищі, відносять спектральний аналіз та дослідження за допомогою радіоактивних ізотопів.

Диференційні методи дозволяють визначати розподіл зносу по всій поверхні тертя та оцінювати вплив нерівномірності зносу на вихідні параметри виробу. Диференційні методи можна поділити на методи вимірювання, що базуються на мікрометрії, метод штучних баз та метод поверхневої активації. До методу вимірювання, що базується на мікрометрії, відносять вимірювання розмірів та профілографування. У машинобудуванні існує кілька різновидів методів штучних баз, серед яких можна виділити наступні: метод відбитка, метод лунок та метод зліпка. До різновидів методу поверхневої активації можна віднести метод активації частини ділянки та застосування вставок.

Методи вимірювання вихідних параметрів спряження можна поділити за вимірюванням коефіцієнта тертя, витрат мастила та температури. Вимірювання величини зносу за зменшенням ваги чи об'єму деталі, як правило, використовують для дослідження зразків, оскільки цей метод малопридатний для більшості деталей машин. Оцінювання зносу за зміною вихідних параметрів спряження може дати лише побічну уяву про величину зносу.

Для вимірювання зносу поверхонь тертя при роботі різних спряжень в умовах їх експлуатації або випробувань застосовуються основні методи, які розглянемо надалі. [5,6]

1.3.2. Визначення зносу за вмістом продуктів зносу змащувальному матеріалі. Цей метод визначення вмісту заліза, його окислів та інших домішок у змащувальному матеріалі, відомий також як метод визначення металевих домішок, базується на взятті проби з відпрацьованого мастила, де накопичились продукти зносу, що складаються з металевих частинок, оксидів металів та продуктів хімічної взаємодії металів з активними компонентами мастила.

Цей метод має перевагу у тому, що дозволяє уникнути розбирання агрегатів та вузлів. Його застосовують як у лабораторних умовах, так і при експлуатації для вимірювання інтегрального зносу. Точність методу характеризується чутливістю приладів до вмісту металевих домішок у мастилі, який складає 10^{-6} - 10^{-8} г/см³ мастила. Проте, лінійне зносу цим методом є важко оцінити.

При відборі проби необхідно забезпечити її репрезентативність та відповідність середньому вмісту продуктів зносу в мастилі. Наприклад, при взятті проби з картера двигуна, масло зливають та ретельно перемішують, щоб забезпечити однорідність проби.

Для аналізу складу проб мастила, в тому числі його вмісту заліза та інших складових, застосовуються різні методи. Хімічний аналіз базується на визначенні кількості заліза та інших продуктів зносу в попелі, отриманому в результаті спалення мастильної проби. Спектральний метод використовується для визначення вмісту механічних домішок в мастилі, використовуючи спектральний склад полум'я, яке утворюється при спалюванні мастильної проби. Однак, цей метод є досить складним, довготривалим та дорогим.

Радіометричний метод заснований на вимірюванні радіоактивності продуктів зношення, що містяться в мастилі. Продукти зношення накопичуються на фільтрі в результаті зносу радіоактивних деталей, які можуть містити радіоактивні ізотопи введені в розплавлений матеріал або нанесені на поверхню деталей у вигляді

радіоактивного покриття. Активаційний аналіз має спільні риси зі спектральним та радіометричним методами. Вміст продуктів зношення в мастилі визначається за їх радіоактивністю, яку вимірюють після опромінення мастильної проби нейтронами та аналізу спектрів гамма-випромінювання. Використання методу активаційного аналізу не пов'язане з радіаційною небезпекою.

1.3.3. Метод мікрометричних вимірювань. Метод мікрометричних вимірювань заснований на вимірюванні деталі до та після зносу з використанням мікрометра, індикатора та інших приладів, точність яких не перевищує 1-10 мкм. У більшості випадків для вимірювання зносу можна використовувати ті ж універсальні та спеціальні засоби, які застосовуються для контролю точності даної поверхні під час її виготовлення. Недоліком цього методу є те, що ним неможливо вимірювати зносу в процесі експлуатації машини.

1.3.4. Метод штучних баз. У машинобудуванні метод штучних баз є поширеним методом вимірювання зносу на поверхнях деталей. Застосування цього методу передбачає нанесення на поверхню деталі спеціальних заглиблень, які можуть мати форму конуса, піраміди тощо. Відбитки цих заглиблень зменшуються з кожним циклом роботи, що свідчить про зносу поверхні деталі. Із зменшенням розмірів цих заглиблень можна зробити висновок про величину зношення. Цей метод є ефективним для вимірювання зносу на поверхнях деталей, але вимагає певної підготовки деталі до нанесення заглиблень.

Застосовують різні варіанти цього методу. Метод відбитків (рисунок 1.1), який застосовується для визначення мікротвердості матеріалів.

Для утворення заглиблення використовується алмазна чотиригранна піраміда з квадратною основою та кутом 136° при вершині між протилежними гранями, що використовується у приладах ПМТ-3 та Віккерс.

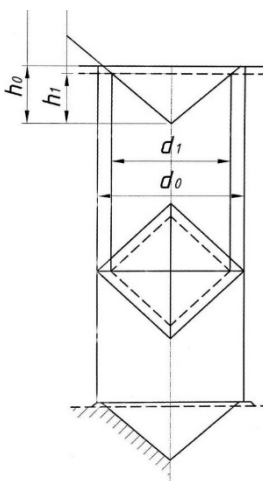


Рисунок 1.1 – Метод відбитків

Під час здійснення вимірювань піраміду тиску під навантаженням наводять на поверхню досліджуваного матеріалу, після чого замірюють діагональ відбитка. зносу матеріалу визначається за різницею відстаней між діагоналями відбитка до та після зносу матеріалу.

Необхідно зазначити, що метод відбитків має ряд недоліків, серед яких можна виділити спучування матеріалу під час втискування піраміди, що може спотворювати форму відбитка, а також деяке відновлення заглиблення після зняття навантаження. Для усунення спотворень відбитка необхідно провести полірування, однак пружного відновлення відбитка уникнути не можливо.

Широкого застосування набув метод, який запропонували проф. М.М. Хрущов і Е.С. Беркович, його називають методом вирізаних лунок (рисунок 1.2).

Цей метод полягає в тому, що на досліджуваній поверхні різцем, який обертається, виготовляють лунку (рисунок 1.2). За зменшенням її розмірів при зношуванні роблять висновок про величину місцевого зносу. Метод лунок має ряд переваг порівняно з методом відбитків. За цим методом втискування індентора замінене на виготовлення лунки різанням, унаслідок чого явища спучування металу і пружного відновлення зведені до мінімуму. При ускладненні вимірювання зносу безпосередньо на деталізастосовують метод негативних відбитків (рисунок. 1.3).

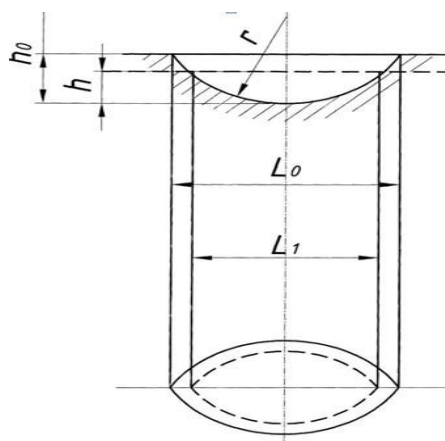


Рисунок 1.2 – Метод вирізаних лунок

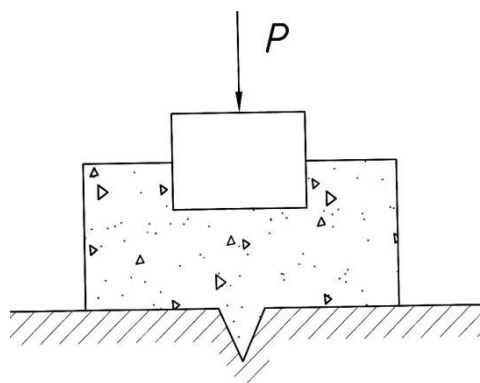


Рисунок 1.3 – Метод негативних відбитків

На поверхню наносять заглиблення (відбиток чи спеціальну риску). Потім з неї знімають зліпок за допомогою самотвердіючої маси або пластмаси. Висоту відбитка заміряють звичайними методами і порівнюють з розмірами, отриманими після зношення.

1.3.5. Метод поверхневої активації. Метод базується на вимірюваннях зносу на зниженні радіоактивності деталі. Для цього на заданій ділянці деталі створюється радіоактивний об'єм глибиною 0,05-0,4 мм шляхом опромінення зарядженими частинками, такими як дейтрони, протони та інші частинки.

Визначення величини зношення здійснюється за допомогою градувального графіка, шляхом порівняння зниження радіоактивності деталі зі зниженням радіоактивності зразка.

Метод поверхневої активації призначений для контролю зносу деталей у стендових та експлуатаційних випробуваннях без розбирання та зупинки машини.

1.4. Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на зносу

У першій половині ХХ століття А.К.Зайцев розробив та запропонував загальну та раціональну класифікацію лабораторних машин для вимірювання матеріалів на зносу. Згідно з цією класифікацією, всі лабораторні машини для вимірювання матеріалів на зносу поділяються на шість категорій.

Машини першої категорії відрізняються найбільшою точністю вимірювання та можливістю реєструвати параметри, що дозволяють слідкувати за процесом зносу та величинами параметрів процесу. Обов'язковими параметрами в цих машинах є сила тертя, температура поверхонь тертя, частота обертання та робота тертя. Величину зносу визначають за допомогою точного вимірювання або зважування до і після кожного досліджу.

Машини другої категорії є простішими, але більш досконалими лабораторними машинами для випробування матеріалів на знос при певному виді зносу. Умови досліджень вибирають враховуючи умови роботи матеріалів у конкретних вузлах тертя.

Машини третьої категорії призначені для швидкого та простого контролю заводської продукції.

Машини четвертої категорії є спеціалізованими машинами, які імітують умови роботи матеріалів у машинах.

Машини п'ятої категорії призначені для випробування готових деталей на знос.

Машини шостої категорії є стендами для випробувань якості роботи та зносу готових машин.

1.5. Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя

В установках, призначених для вивчення фрикційних властивостей матеріалів, використовують різноманітні методи визначення сили тертя, швидкості ковзання і температури.

1.5.1. Вимірювання сили тертя. У вимірюванні сили тертя використовують динамічний (пружинний) та маятниковий методи. Сучасні лабораторні установки використовують динамометри високої жорсткості, що оснащені електричними тензорезисторними силовимірювачами, що представляють собою дротяні датчики, наклеєні на пружний елемент вимірювача, який зазвичай є сталюю консольною балкою, так званою тензобалкою або кільцем. Дротяні перетворювачі та тензометри на їх основі мають декілька переваг, зокрема, малу інерційність, можливість автоматичної реєстрації показників, високу чутливість та дистанційність вимірювань. Однак, серед недоліків тензодатчиків можна виділити залежність показників від температури, оскільки нагрівання змінює опір перетворювачів.

Найпоширенішою стала схема, в якій дротяний (робочий) перетворювач вмикається в одне плече моста, а неробочий перетворювач (аналогічний робочому) – у сусіднє плече, що дозволяє значно зменшити температурну похибку вимірювання. Обидва перетворювачі наклеюють на такий же метал, як і вимірювальне (тензометричне) стальне кільце, або на балку. Схема тензометричного моста для вимірювання сил тертя зображена на рис. 1.4.

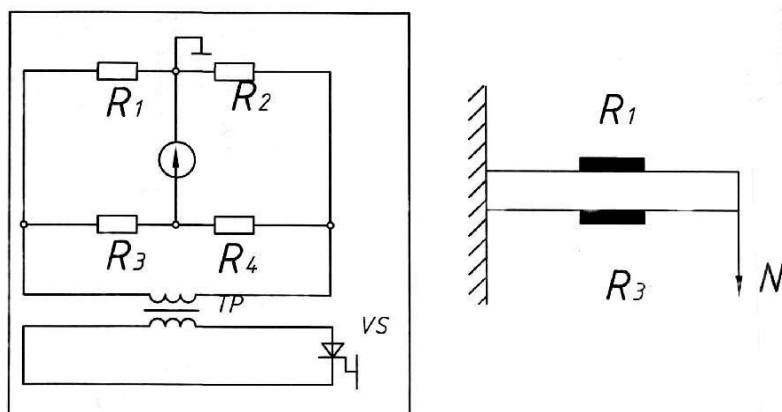


Рисунок 1.4 – Схема тензометричного моста для вимірювання сил тертя

При вимірюванні моменту тертя поряд із тензометричними системами застосовують гідродинамічні (манометричні) методи. Манометрична схема вимірювання моменту тертя зображена на рисунку 1.5

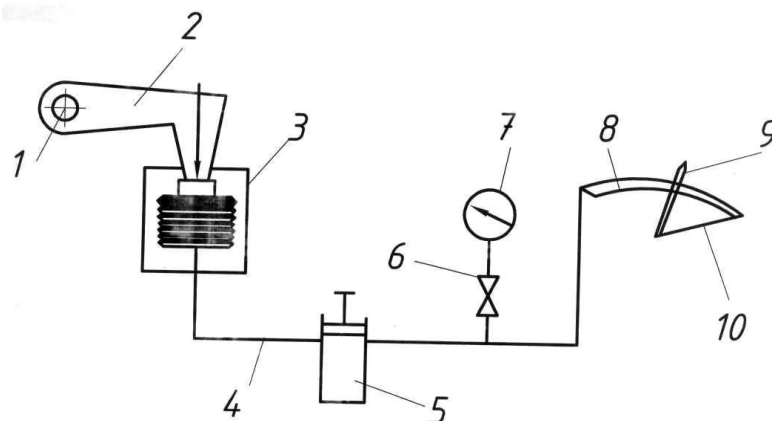


Рисунок 1.5 – Манометрична схема вимірювання моменту тертя: 1 – вал; 2 – важіль; 3 – мездоза; 4 – трубопровід; 5 – порошковий компенсатор; 6 – вентиль; 7 – манометр; 8 – трубка Бурдона; 9 – перо самописця; 10 – пружина

1.5.2. Вимірювання температури. У вимірюванні температури безпосередньо як фізичної величини є певні технічні обмеження. Оскільки безпосереднє вимірювання температури є неможливим, вимірювання здійснюється за допомогою перетворення температури на іншу фізичну величину, яка може бути об'єктом кількісного оцінювання.

У практичному застосуванні, для вимірювання температур поверхонь, які тертями взаємодіють, найбільш часто використовують контактні термоприймачі, такі як термопари. Найбільше застосовують штучні термопари. В них термометричним параметром є термоелектрорушійна сила (ЕРС).

Вимірювання температури відноситься до важливих завдань, які виникають у машинобудуванні та інших галузях техніки. За фізичними законами безпосереднє вимірювання температури як фізичної величини є неможливим. Тому, для визначення температури використовуються інші фізичні величини, які піддаються кількісному оцінюванню.

Одним із найбільш поширених засобів для вимірювання температури є контактні термоприймачі, або термопари, які дозволяють вимірювати температуру в діапазоні від -100 до 2500 °C з точністю від $\pm(0,1 \dots 25^\circ\text{C})$. Термопари мають інерційність, яка залежить від матеріалу термоприймача, його форми та розмірів. Зменшення розмірів гарячого спаю термопари позитивно впливає на точність вимірювань.

Проте, штучні термопари мають деякі недоліки. Одним із них є неможливість замірювати температуру безпосередньо на поверхнях тертя. Більш того, хромель-алюмелева термопара здатна реєструвати зміну температури в тисячні долі секунди, але це не є показником їх загальної точності. Таким чином, для визначення температури вимірювальні засоби потребують ретельної настройки та врахування деяких особливостей вимірювання, що можуть вплинути на точність отриманих результатів.

Природна термопара є практично безінерційною завдяки тому, що спай нагрівається від джерела, розташованого у самому спаї. Електродами природної термопари є самі елементи пари тертя. Однак, її недоліком є складність градуювання, що вимагає використання штучної термопари. Використання природної термопари можливо лише у випадку, коли контурна площа контакту близька до номінальної.

Похибки вимірювань можуть виникнути через стрибки струмів, що викликані спалахами температур та порушенням контакту при ковзанні. Для вимірювання температур біля поверхні тертя, а також температурних градієнтів у тонших об'ємах матеріалу, що тонші, ніж у випадку штучної термопари, застосовують метод напів штучної термопари. Цей метод передбачає відсутність постійного гарячого спаю. Термоелектрорушійна сила замірюється між одним з елементів пари тертя та привареним до нього електродом, виготовленим з іншого матеріалу. Недоліком цього методу, як і методу природної термопари, є складність градуювання та можливість вимірювання температури лише металевих матеріалів.

Для вимірювання температур при терті застосовуються різноманітні методи, включаючи термометри опору та спостереження за легкоплавкими індикаторами температури, кольорами мінливості та термофарбами. Професор Б.І. Костецький

розробив структурний метод дослідження температур при терті, який полягає у визначенні величини температури на основі структурних змін та мікротвердості матеріалів.

Найбільш перспективним напрямком розвитку методів вимірювання температури при терті є використання апаратури, що базується на реєстрації теплового випромінювання нагрітих поверхонь. Основною перевагою цього методу є низька інерційність. Для перетворення теплового випромінювання в електричний сигнал використовуються фотоопори, які мають дуже малий час відгуку - в діапазоні від 10^{-6} до 10^{-7} с.

Першим дослідником, який зареєстрував температуру тертя за допомогою інфрачервоного випромінювання, був Ф.П. Боуден. Він використовував сірчано-свинцевий фотоелемент для вимірювання інтенсивності випромінювання. Для проведення дослідів з вимірювання температури тертя використовувався зразок з прозорого матеріалу, який обертася.

Метод термовізуального вимірювання температур при терті є ефективним інструментом для дослідження процесів тертя. Суть методу полягає у реєстрації інфрачервоного випромінювання об'єкта дослідження та його подальшому перетворенні в електричні сигнали або видимі зображення. У процесі променевого теплообміну беруть участь лише тонкі поверхневі шари, товщина яких для провідників складає близько 1 мкм. Тому теплове випромінювання для твердих тіл можна розглядати як поверхневе явище.

Тепловізійна установка складається з оптичної головки та відеоконтрольного пристрою з амплітудним індикатором і індикатором яскравості. Інфрачервоне випромінювання поверхні тертя системи дзеркал оптичної установки фокусується на чутливому шарі фотоприймача (фотоопору), який перетворює інфрачервоне випромінювання в електричні сигнали. Блок-схема тепловізора зображена на рисунку 1.6.

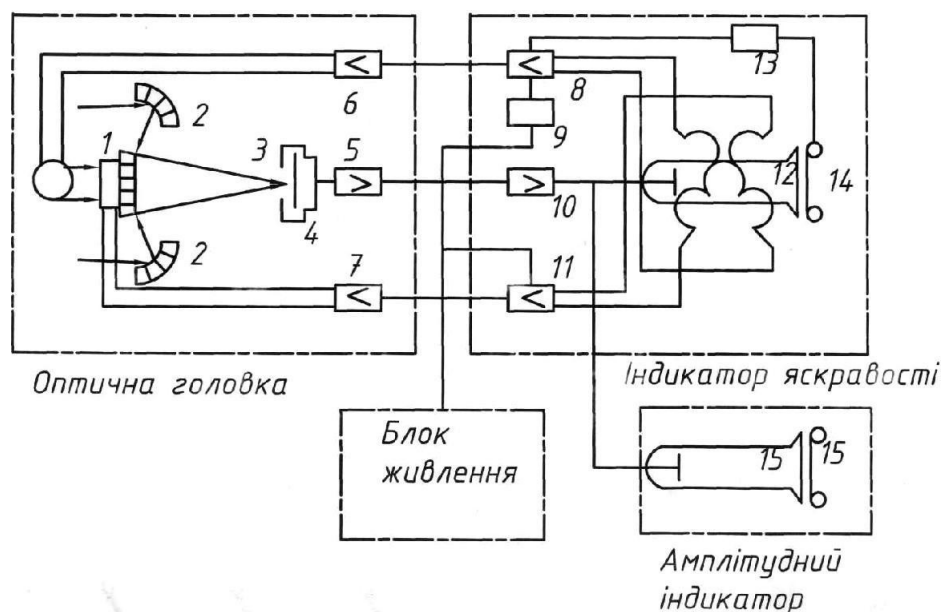


Рисунок 1.6 – Блок-схема тепловізійної установки: 1 – плоске дзеркало; 2 – параболічне дзеркало; 3 – фотоопір; 4 – охолоджувальний пристрій (рідкий азот); 5 – попередній підсилювач; 6 – скануючий пристрій по кадрах; 7 – скануючий пристрій по рядках; 8 – генератор кадрової розгортки; 9 – вузол формування і змішування рядкових і кадрових гасячих імпульсів; 10 – відеопідсилювач; 11 – генератор рядкової розгортки; 12 – електронно-променева трубка; 13 – вузол синхронізації роботи затвору фотоапарата; 14, 15 – фотоприставки; 16 – електронно-променева трубка амплітудного індикаторів

Тепловізійна установка складається з оптичної головки і відеоконтрольного пристрою амплітудного індикатора й індикатора яскравості. Інфрачервоне випромінювання поверхні тертя системи дзеркал оптичної установки фокусується на чутливий шар фотоприймача (фотоопору), який перетворює інфрачервоне випромінювання в електричні сигнали.

У процесі дослідження тертя використовується метод термовізуального вимірювання температур. Зазначений метод полягає в реєстрації інфрачервоного випромінювання об'єкта дослідження та його наступному перетворенні в електричні сигнали чи у видиме зображення. При цьому, променевий теплообмін відбувається лише у тонких поверхневих шарах, для провідників яких товщина шарів становить

близько 1 мкм. Тому, теплове випромінювання для твердих тіл можна розглядати як поверхневе явище.

1.6. Висновок

Існує низка причин, які призводять до зносу поверхні валу. Зазначений процес зносу виникає внаслідок тертя та ковзання валу по сальниковій набивці, що призводить до втрати матеріалу з поверхні. Основними факторами, що сприяють зношуванню поверхні вала, є зміщення, вібрація, високий тиск та підвищена температура. В результаті зносу поверхні вала виникають негативні наслідки, такі як погіршення продуктивності обладнання, збільшення витрат на технічне обслуговування та потенційні відмови системи.

Наукова спільнота розробила різноманітні методи для вимірювання та аналізу зносу поверхні вала, включаючи фізичні методи вимірювання, такі як профілометрія та мікроскопія, а також непрямі методи, наприклад, аналіз вібрацій та тепловізуальний аналіз. Проте, ці методи можуть бути трудомісткими, вимагати значних витрат та не завжди забезпечувати точні результати. Тому виникає необхідність розробки більш ефективних та точних методів вимірювання та аналізу зносу поверхні вала.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНОСУ

2.1. Комп'ютерне моделювання

Традиційно під моделюванням на ЕОМ розумілося лише імітаційне моделювання. Але останніми роками завдяки розвитку графічного інтерфейсу та графічних пакетів значного поширення набуло комп'ютерне структурно-функціональне моделювання, а також розпочалося використання комп'ютера з метою концептуального моделювання, наприклад для побудови систем штучного інтелекту. Отже, поняття «комп'ютерне моделювання» значно ширше за традиційне поняття «моделювання на ЕОМ».

Під комп'ютерною моделлю найчастіше розуміють: умовний образ об'єкта чи деякої системи об'єктів (або процесів), описаних за допомогою взаємозалежних комп'ютерних таблиць, схем, діаграм, графіків, малюнків, анімаційних фрагментів, гіпертекстів і т. ін., що відбивають структуру та взаємозв'язки між елементами об'єкта чи системи. Комп'ютерні моделі такого типу називають структурно-функціональними; окрему програму, сукупність програм чи програмний комплекс, що дає змогу виконанням послідовності обчислень з подальшим графічним відображенням їх результатів відтворювати (імітувати) процеси функціонування об'єкта (системи об'єктів), що функціонує під впливом різних, як правило випадкових, факторів. Такі моделі називають імітаційними моделями.

Комп'ютерне моделювання — метод розв'язування задачі аналізу або синтезу складної системи, що ґрунтується на використанні її комп'ютерної моделі. Сутність комп'ютерного моделювання полягає у відшуканні кількісних і якісних результатів із залученням наявної моделі. Якісні висновки, зроблені на підставі такого дослідження, дають змогу розкривати невідомі досі властивості складної системи: її структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність тощо. Кількісні висновки мають переважно характер прогнозу майбутніх чи пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему.

Предметом комп'ютерного моделювання може бути економічна діяльність фірми, банку, промислового підприємства; інформаційно-обчислювальна мережа; технологічний процес; будь-який реальний об'єкт чи процес, наприклад процес інфляції, і взагалі — будь-яка складна система. І хоча цілі комп'ютерного моделювання можуть бути різними, найчастіше воно, як уже зазначалося, становить центральну процедуру системного аналізу — сукупності методологічних засобів, що використовуються для підготовки та прийняття рішень економічного, організаційного, соціального чи технічного характеру.

Комп'ютерна модель складної системи має якомога повніше відбивати всі основні фактори й взаємозв'язки, що характеризують реальні ситуації, критерії та обмеження. До того ж модель має бути настільки універсальною (щоб охоплювати якнайширше коло близьких за призначенням об'єктів) настільки й простою (щоб сприяти виконанню необхідних досліджень із мінімальними витратами).

2.2. Модель зносу

Під час створення комп'ютерної моделі зносу поверхні вала з сальником вибір відповідного програмного забезпечення та чисельних методів має вирішальне значення для досягнення точних і надійних результатів. У цьому розділі ми опишемо підхід до моделювання, використаний у запропонованій нами моделі.

По-перше, ми вибрали метод скінченних елементів (FEM) як чисельний метод для нашої моделі. FEM є широко використовуваним чисельним методом для вирішення інженерних задач, включаючи аналіз механічних систем. Він заснований на дискретизації моделі на кінцеву кількість елементів, що дозволяє аналізувати складні геометрії та умови навантаження.

Далі ми вибрали програмний комплекс Ansys як платформу для нашої моделі. Ansys — це потужне програмне забезпечення для моделювання, яке забезпечує гнучкий і зручний інтерфейс для моделювання різних фізичних явищ, у тому числі механічного зносу. Він також має широкий спектр моделей матеріалів, що дозволяє моделювати різні матеріали та їх взаємодію.

Щоб включити вплив сальникової коробки, ми використали комбінацію FEM та емпіричних даних. Ми створили спрощену геометрію сальника та інтегрували її в модель як граничну умову. Ми використовували результати експериментальних досліджень для нашої моделі.

Крім того, ми зробили кілька припущень і спрощень у моделі, щоб зменшити обчислювальну складність і час виконання. Наприклад, ми припустили, що вал і сальник були ідеально циліндричними та осесиметричними, і що знос відбувався лише на поверхні вала, яка контактувала з сальником.

Загалом підхід до моделювання, використаний у запропонованій нами моделі, передбачав використання програмного комплексу Ansys у поєднанні з емпіричними даними та припущеннями. Такий підхід дозволив нам точно змоделювати вплив сальника на знос поверхні валу та отримати надійні результати для прогнозування та оптимізації зносу.

2.2.1. Приклад моделі зносу для манжетного ущільнення. Як правило, видалення матеріалу з поверхні описує процес зносу. Оскільки вал набагато твердіше, ніж манжетне ущільнення, що обертається, передбачається, що знос відбувається тільки на поверхні ущільнювальної кромки. Метод моделювання зносу в макромасштабі введений для прогнозування зносу манжетного ущільнення, що обертається. Пропонована модель зносу включає модифіковане рівняння зносу Арчарда та макромасштабну структурну скінченно елементну модель. Макромасштабна структурна скінченно елементна модель використовується для розрахунку загального нормального тиску, тоді як модифіковане рівняння зносу Арчарда використовується для прогнозування зносу манжетного ущільнення, що обертається.

Рівняння зносу Арчарда є формою рівняння зносу, що найчастіше використовується, і використовується багатьма дослідниками для розрахунку зносу ущільнень. [7-15]

Рівняння дається

$$V_w = \frac{K}{H} W_n S \quad (2.1)$$

де V_w — втрата об'єму, K — безрозмірний коефіцієнт зносу по Арчарду, H — твердість манжетного ущільнення, що обертається, W_n — нормальне навантаження, а S — відстань ковзання.

Модуль зносу k визначається як K / H , тому модель зносу можна переписати як

$$h_w = k p_n S \quad (2.2)$$

де p_n — повний нормальний тиск.

Зазвичай модуль зносу k оцінюється з урахуванням рівняння експериментально за певних умов змащення. Питомий модуль зносу вважається постійним під час моделювання, за умови, що умови змащення не змінюються. Але важко контролювати умови змащування і точно оцінювати питомий модуль зносу k . Що ще більш важливо, загальновизнано, що при обертанні валу зона ущільнення знаходиться в умовах змішаного змащення, а умови змащення змінюються при зміні умов експлуатації. Наприклад, товщина плівки збільшується зі збільшенням швидкості обертання валу. Отже, не слід нехтувати впливом змін умов змащування на знос ущільнення, і рівняння зносу Арчарда необхідно модифікувати відповідним чином.

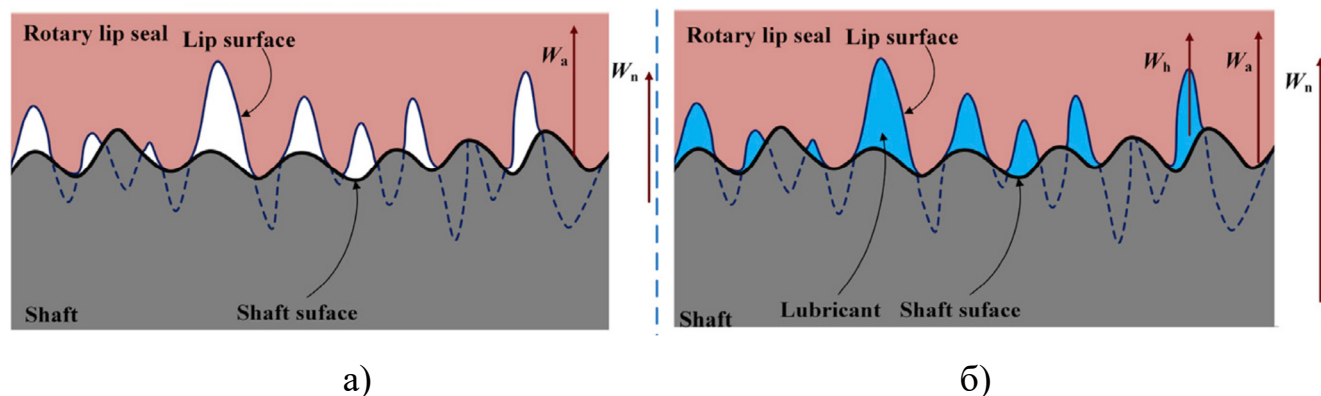


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення зони ущільнення в умовах (а) без мастила та (б) в умовах змішаного мастила.

В умовах без змащення, як показано на рисунку 2.1(а), нормальне навантаження W_n визначається контактним навантаженням W_a на шорсткості, тому легко оцінити модуль сухого зносу k_d , який є константою. Як зазначено нижче, коефіцієнти масштабування вводяться для характеристики умов змащення, і на основі модуля зносу в сухому стані модуль зносу та рівняння зносу Арчарда модифікуються для обліку умов зі змішаним змащенням.

$$k = \frac{W_n S}{V_w} \quad (2.3)$$

Зона ущільнення між манжетним ущільненням і валом показана на рис. 4(b). Загальне нормальне навантаження W_n на поверхню ротаційного манжетного ущільнення в умовах змішаного змащування можна виразити як суму контактного навантаження на нерівності W_a та гідродинамічного навантаження W_h , як визначено формулою

$$W_n = W_h + W_a \quad (2.4)$$

Коефіцієнт масштабування, γ_1 , вводиться для вираження коефіцієнта розподілу контактного навантаження нерівності, а коефіцієнт масштабування, γ_2 , вводиться для вираження коефіцієнта розподілу навантаження гідродинамічного навантаження. Коефіцієнти масштабування представлені як

$$\gamma_1 = \frac{W_a}{W_n} \quad (2.5)$$

$$\gamma_2 = \frac{W_h}{W_n} \quad (2.6)$$

Зв'язок між двома факторами масштабування є

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 1 \quad (2.7)$$

Варто зазначити, що запропонована модель змішаного змащення змінюється в часі, тому для розрахунку коефіцієнтів масштабування використовується середнє за часом контактне навантаження на нерівність і середнє за часом гідродинамічне навантаження зони моделювання. Потім коефіцієнти масштабування переписуються як

$$\gamma_1 = \frac{W_{a_avg}}{W_{n_avg}} \quad (2.8)$$

$$\gamma_2 = \frac{W_{h_avg}}{W_{n_avg}} \quad (2.9)$$

Варто зазначити, що середнє за часом гідродинамічне навантаження W_{h_avg} і середнє за часом навантаження на нерівність контакту W_{a_avg} розраховуються за допомогою моделі змішаного еластогідродинамічного змащення. Коли береться до уваги змішане змащування, об'єм зносу пов'язаний лише з контактним навантаженням нерівностей. Таким чином, коефіцієнт масштабування для нерівності контакту вводиться в рівняння зносу Арчарда. Модифікований модуль зносу в умовах змішаного змащення k_L визначається як $k_d\gamma_1$. Таким чином, модифіковане рівняння зносу Арчарда задається як

$$V_w = kW_{a_avg}S = k_d\gamma_1W_nS = k_LW_nS \quad (2.10)$$

За умови змішаного змащування глибину зносу h_w можна представити як

$$h_w = k_Lp_nS \quad (2.11)$$

де p_n – загальний нормальний тиск, отриманий за допомогою макромасштабної структурної скінченно елементної моделі.

Щоб проаналізувати знос ротаційного манжетного ущільнення, визначено дві швидкості зносу. Похідна глибини зносу за часом визначається як швидкість зносу за

часом k_t , а похідна глибини зносу за відстанню ковзання визначається як швидкість зносу k_s . У більшості випадків загальне нормальне навантаження та модифікований модуль зносу можна вважати постійними протягом ітераційного циклу. Таким чином, швидкість зносу та швидкість зносу задаються як

$$k_t = \frac{dh_w}{dt} = \frac{d(k_L p_n S)}{dt} = k_L p_n U \quad (2.12)$$

$$k_s = \frac{dh_w}{dt} = \frac{d(k_L p_n S)}{dt} = k_L p_n \quad (2.13)$$

Примітка: Базуючись на модулі зносу в сухому стані, модуль зносу модифікується коефіцієнтом масштабування для нерівності контакту, який є змінною, пов'язаною з умовами змащування та розрахованою за моделлю змішаного еластогідродинамічного змащення. Рівняння зносу Арчарда модифіковано та об'єднано з моделлю змащення для аналізу зносу ущільнення в умовах змішаного змащення.

2.2.2. Макромасштабна структурна модель. Для розрахунку загального нормального розподілу тиску представлено макромасштабну структурну скінченно елементну модель, рисунок. 2.2.

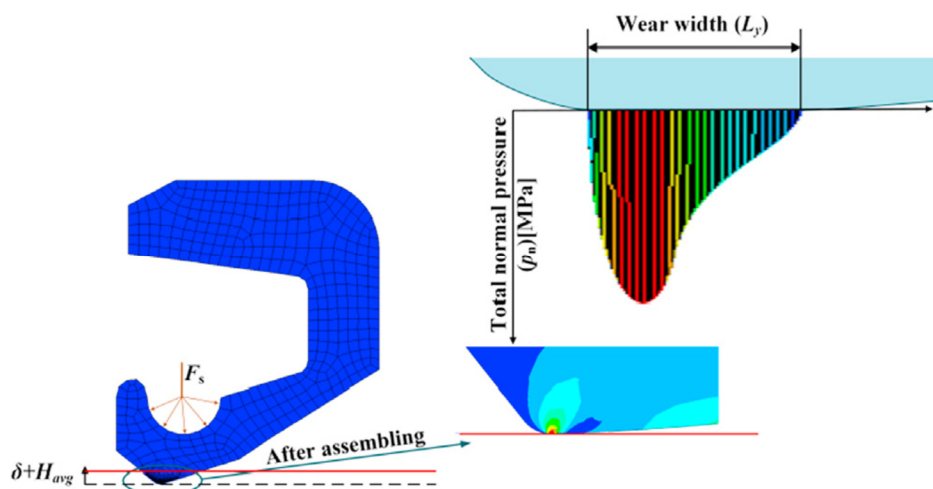


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення макромасштабної моделі структурного скінченно-елементного аналізу.

Оскільки твердість вала набагато більша, ніж у радіального манжетного ущільнення, передбачається, що деформація відбувається лише на валу.

Сила пружини апроксимується як постійна сила попереднього затягування F_S . Щоб розглянути вплив рідинної плівки зони ущільнення на знос ротаційного манжетного ущільнення, інтерференція вважається сумою інтерференції ущільнення-вала δ та середньої товщини мастильної плівки H_{avg} . Нормальний тиск, спричинений зазначеними вище перешкодами, можна розглядати як загальний нормальний тиск, викликаний контактом нерівностей і гідродинамічними ефектами.

2.2.3. Числовий алгоритм. Аналіз зносу радіального манжетного ущільнення на основі запропонованого методу багатомасштабного моделювання виконується за чисельним алгоритмом.

Мікромасштабна змішана модель еластогідродинамічного змащення демонструє сильний зв'язок між механікою рідини, механікою нерівності контакту, механікою деформації та ефектами термомеханіки. Отже, ітераційна обчислювальна процедура була розроблена та застосована для обробки цього взаємозв'язку. Рівняння Рейнольдса розв'язується методом скінченних різниць, а термомеханіка, механіка рідини, механіка контакту з нерівностями та механіка деформації обчислюються повторно, доки товщина мастильної плівки та середня температура не досягнуть сходження. Потім розраховується середня товщина мастильної плівки та коефіцієнти масштабування.

У макромасштабній моделі зносу середня товщина мастильної плівки використовується в структурному аналізі на основі скінченно елементної моделі, а коефіцієнт масштабування нерівності контакту використовується в модифікованому рівнянні Арчарда. Загальний нормальний тиск розраховується методом скінченно елементної моделі і використовується в модифікованому рівнянні зносу Арчарда. Модифіковане рівняння Арчарда застосовується для прогнозування зносу радіального манжетного ущільнення, яке потім використовується для розрахунку часу зносу та швидкості зносу.

На рисунку 2.3 зображена блок-схема числового алгоритму

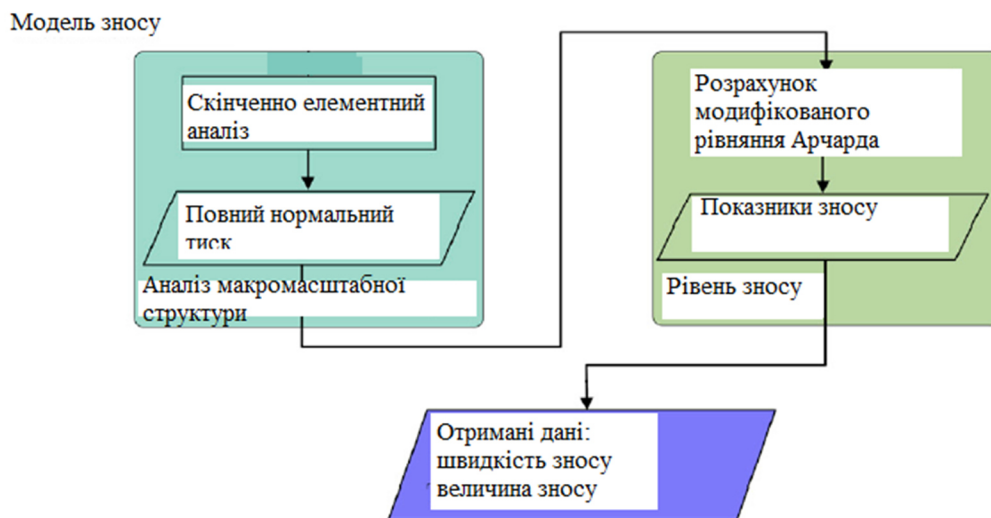


Рисунок 2.3 – Блок-схема числового алгоритму

2.3. Висновок

Під час подальшої розробки комп'ютерної моделі зносу поверхні вала з сальником, вибір відповідного програмного забезпечення та чисельних методів має вирішальне значення для досягнення точних та надійних результатів.

В першу чергу, для нашої моделі ми обрали метод скінченних елементів (FEM) як чисельний метод. FEM є широко застосовуваним чисельним методом для розв'язування інженерних задач, включаючи аналіз механічних систем. Цей метод ґрунтується на дискретизації моделі на скінчену кількість елементів, що дозволяє аналізувати складні геометрії та умови навантаження.

Для нашої моделі ми також обрали програмний комплекс Ansys як платформу. Ansys є потужним програмним забезпеченням для моделювання, яке надає гнучкий та зручний інтерфейс для моделювання різноманітних фізичних явищ, зокрема механічного зносу. Він також має широкий спектр моделей матеріалів, що дозволяє моделювати різні матеріали та їх взаємодію.

Для врахування впливу сальникової коробки ми використали комбінацію методу скінченних елементів та емпіричних даних. Ми створили спрощену геометрію

сальника та інтегрували її в модель як граничну умову. Для цього ми скористались результатами експериментальних досліджень.

У нашій моделі ми також зробили декілька припущень та спрощень, щоб зменшити обчислювальну складність та час виконання. Наприклад, ми припустили, що вал та сальник є ідеально циліндричними та осьово-симетричними, а знос відбувається лише на поверхні вала, що контактує з сальником.

Загалом, підхід до моделювання, який ми використали у запропонованій моделі, включав використання програмного комплексу Ansys у поєднанні з емпіричними даними та припущеннями. Цей підхід дозволив точно змоделювати вплив сальника на знос поверхні вала та отримати надійні результати для прогнозування та оптимізації зносу.

Рівняння зносу Арчарда є одним із найбільш поширених рівнянь зносу, яке часто використовується дослідниками для розрахунку зносу ущільнень.

3 РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

3.1. Створення моделі

Для розв'язання задачі обрана двовимірною моделлю радіального сальникового ущільнення. Задача зносу радіального сальникового ущільнення стосується двох контактних елементів: вала та сальника (рис. 3.1). Модель складається з фрагменту вала та розгорнутої набивки. Таким чином спрощується процес моделювання до лінійного переміщення елементів. Вал зазнає адгезійного зносу, що означає перенесення матеріалу з однієї поверхні на іншу через сили тертя та тісного контакту. Явище зносу в першу чергу спостерігається на поверхні вала тому умови моделі створені таким чином щоб поверхня набивки не зазнавала змін. При розрахунку ми повинні побачити зміни напруження та деформації з плином часу. [16]

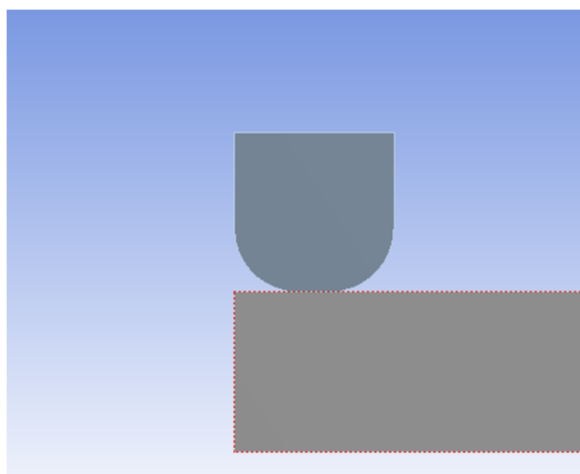


Рисунок 3.1 – Модель задачі

Мета полягає в тому, щоб зрозуміти процес адгезивного зносу, що виникає між валом і сальником, щоб в подальшому підвищити ефективність і довговічність ущільнення.

Для розв'язання задачі було взято 3 види сальникових набивок (таб. 1) та вал зі сталі (таб. 2)

Так як за умовою задачі набивка не деформується та не зношується то компонент набивки буде складатись з одного суцільного елемента (рис. 3.2).

Моделювання зносу є можливим завдяки вбудованій підпрограмі “ARCD” на базі Mechanical APDL. Модель зносу Арчарда має вигляд $\dot{W} = KP^mL^n$, де K – коефіцієнт зносу, P – показник тиску, L – показник швидкості, m та n – емпіричні нелінійні показники, які для випадку адгезивного зносу дорівнюють $m = n = 0,67$

Таблиця 1 – Параметри сальникових набивок

	Назва сальникової набивки	Модуль пружності, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Коефіцієнт тертя
1	Фтороплатові волокна із графітовим просоченням	75	0,44	0,07
2	Комбіноване плетіння фторопластових і арамідних волокон із силіконовим просоченням	50	0,41	0,12
3	Арамідні волокна із силіконовим просоченням	35	0,43	0,05

Таблиця 2 – Параметри валу

	Назва параметру	Одиниці вимірювання	Величина
1	Модуль пружності	МПа	$2 \cdot 10^5$
2	Коефіцієнт Пуассона	-	0,3
3	Твердість	МПа	83,3
4	Коефіцієнт зносу	Н/м	$11,6 \cdot 10^{-9}$

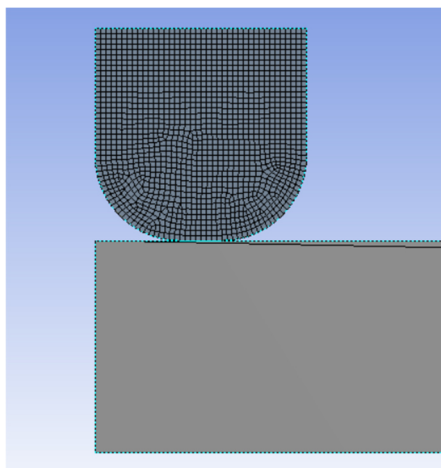


Рисунок 3.2 – Кінцево-елементна сітка

Граничні умови задані наступні. Закріплення на верхній грані фрагменту вала (рис. 3.3).

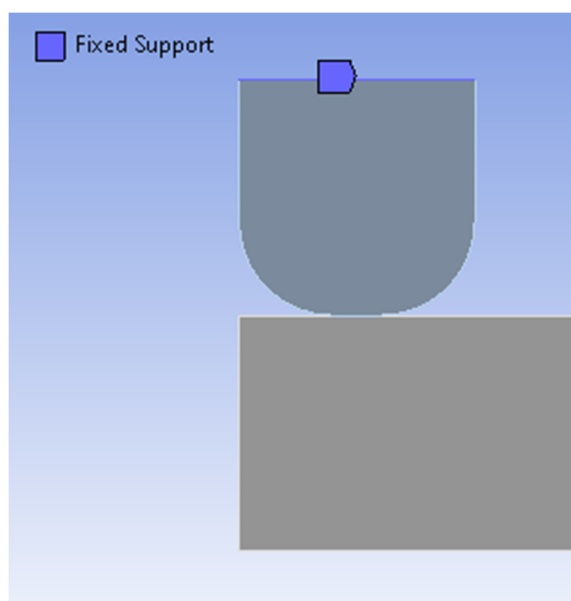


Рисунок 3.3 – Закріплення

Переміщення задані відповідно до умови обертання вала з частотою 3000 об/хв (таб. 3). Обертальний рух замінено зворотно-поступальним зі збереженням швидкості. Зважаючи на те, що коефіцієнт зносу достатньо малий, тому для видимого результату необхідно провести значну кількість циклів переміщення елемента валу відносно сальникової набивки. Таким чином моделювання було проведено для

невеликого проміжку часу (від 0 до 1 с.), а отримані результати мультипліковувались до рівня зносу при $1 \cdot 10^8$ с.

Таблиця 3 – переміщення по осям x і y

Час (с)	Переміщення по осі x (мм)	Переміщення по осі y (мм) (E=35)	Переміщення по осі y (мм) (E=50)	Переміщення по осі y (мм) (E=75)
0	0	0	0	0
$1 \cdot 10^{-6}$	0	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-1}$	-1200	- -	- -	- -
$2 \cdot 10^{-1}$	0	- -	- -	- -
...
$1 \cdot 10^8$	1200	- -	- -	- -

3.2 Результати моделювання

В якості результатів представлені графіки зміни з часом еквівалентного напруження, деформації та контактної тиску по ширині контактної ділянки для трьох видів набивок (рис. 3.4 -3.12).

1) Для першої набивки:

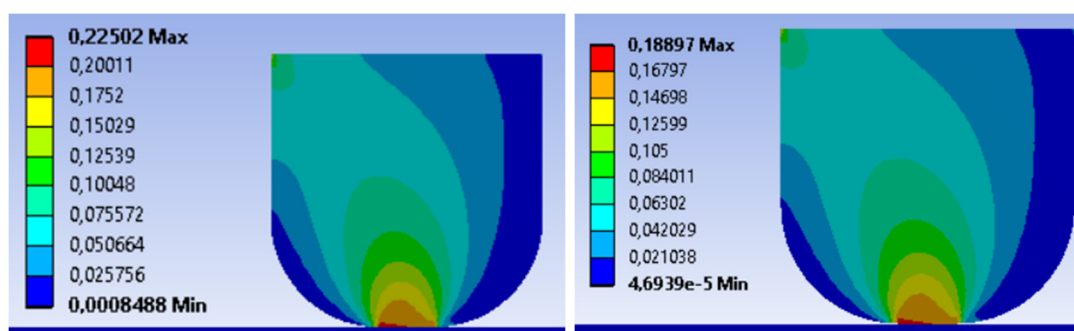


Рисунок 3.4 – Графік зміни еквівалентного напруження з часом для першої набивки ($\sigma_{max} = 0,22502$ МПа, $\sigma_{min} = 0,18897$ МПа)

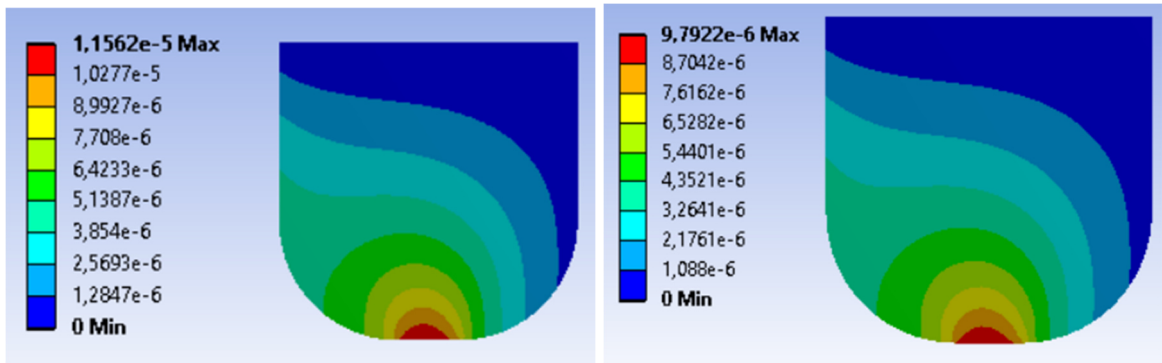


Рисунок 3.5 – Графік зміни деформації з часом для першої набивки ($\Delta_{max} = 1,1562 \cdot 10^{-5}$ мм, $\Delta_{min} = 9,7922 \cdot 10^{-6}$ мм)

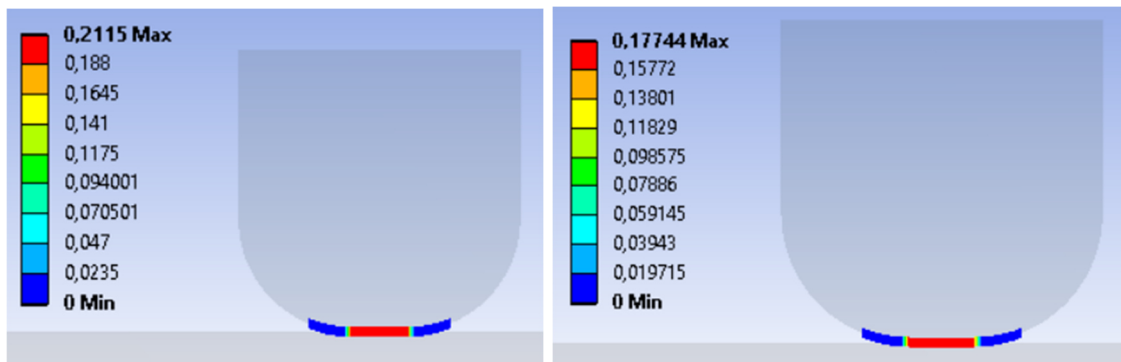


Рисунок 3.6 – Графік зміни контактного тиску з часом для першої набивки ($p_{max} = 0,2115$ МПа, $p_{min} = 0,17744$ МПа)

2) Для другої набивки

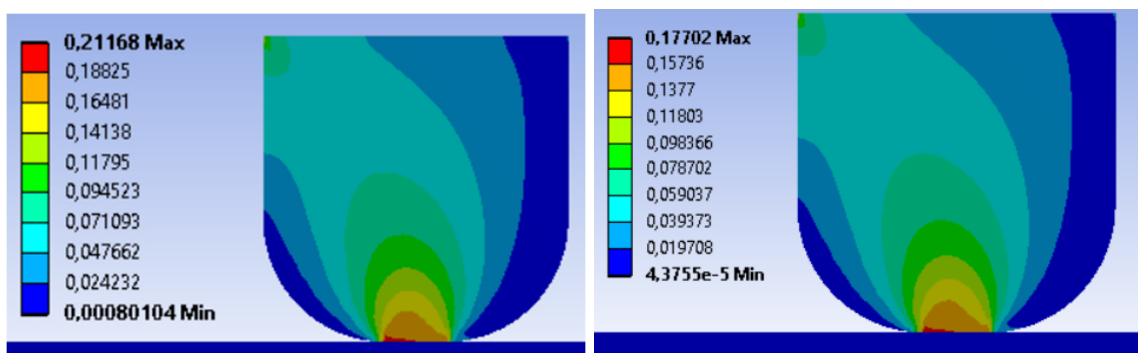


Рисунок 3.7 – Графік зміни еквівалентного напруження з часом для другої набивки ($\sigma_{max} = 0,21168$ МПа, $\sigma_{min} = 0,17702$ МПа)

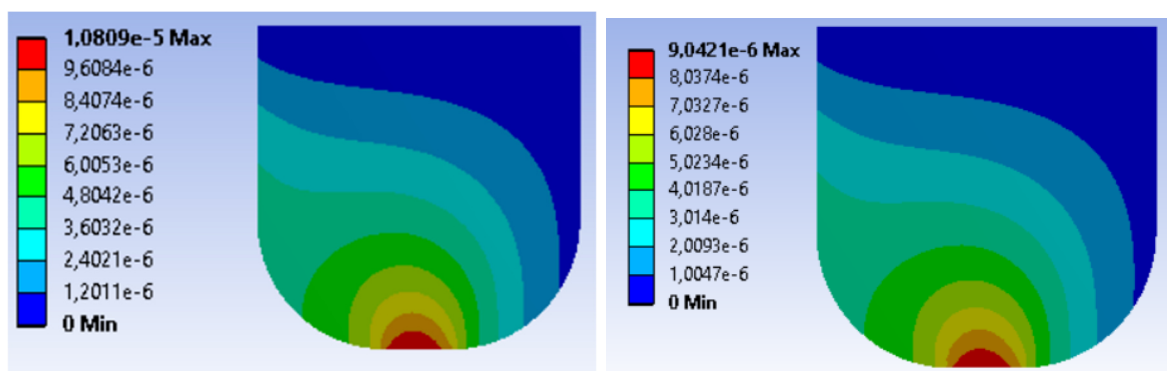


Рисунок 3.8 – Графік зміни деформації з часом для другої набивки ($\Delta_{max} = 1,0809 \cdot 10^{-5}$ мм, $\Delta_{min} = 9,0421 \cdot 10^{-6}$ мм)

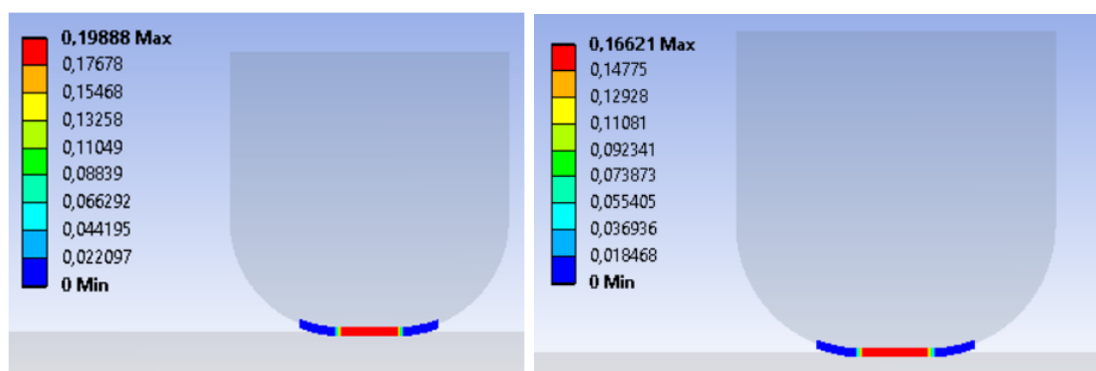


Рисунок 3.9 – Графік зміни контактного тиску з часом для другої набивки ($p_{max} = 0,19888$ МПа, $p_{min} = 0,16621$ МПа)

3) Для третьої набивки

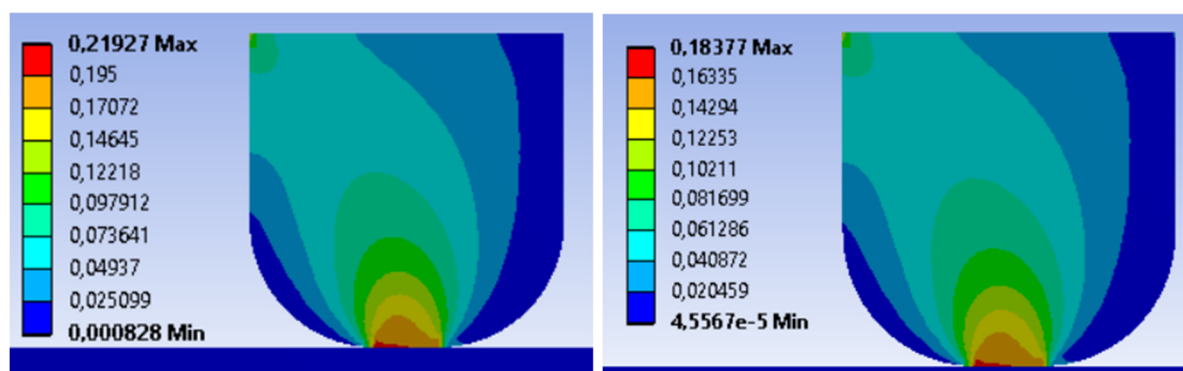


Рисунок 3.10 – Графік зміни еквівалентного напруження з часом для третьої набивки ($\sigma_{max} = 0,21927$ МПа, $\sigma_{min} = 0,18377$ МПа)

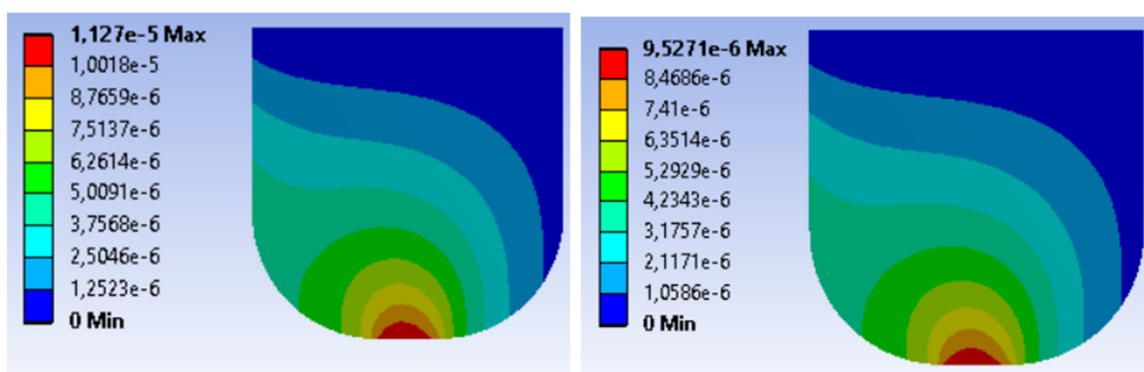


Рисунок 3.11 – Графік зміни деформації з часом для третьої набивки ($\Delta_{max} = 1,127 \cdot 10^{-5}$ мм, $\Delta_{min} = 9,5271 \cdot 10^{-6}$ мм)

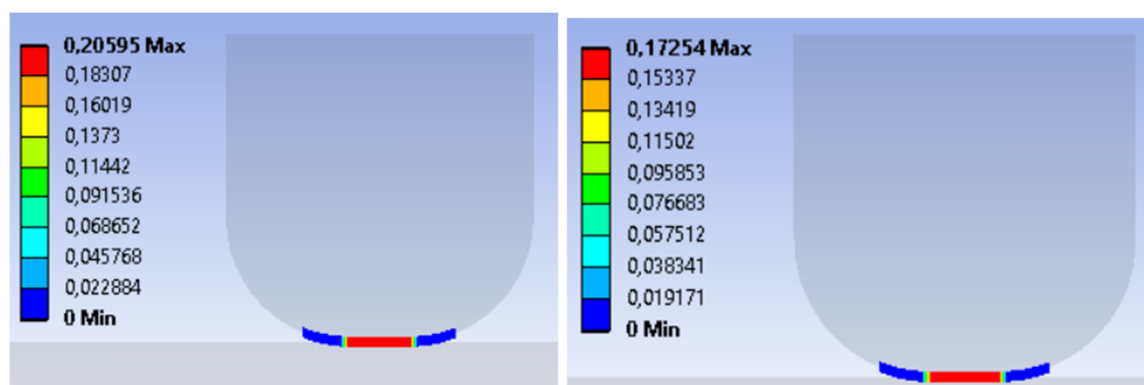


Рисунок 3.12 – Графік зміни контактного тиску з часом для третьої набивки ($p_{max} = 0,20595$ МПа, $p_{min} = 0,17254$ МПа)

Нижче приведені гістограми в яких порівнюються показники еквівалентного напруження, деформації та контактного тиску (рис. 3.13-3.15).

Можна відзначити, що в абсолютному значенні при одному й тому ж навантаженні найбільший рівень напружень, деформації та контактного тиску на поверхні валу, до і після процесу зносу, спостерігається для набивки із фторопластовими волокнами і графітовим просоченням. Найменший рівень – для набивки із комбінованим плетінням фторопластових і арамідних волокон і силіконовим просоченням.

Також для еквівалентного напруження, деформації та контактного тиску визначена ступінь зменшення від максимального до мінімального значення. Відмічено, що ступінь зменшення показників пропорційна коефіцієнту тертя зразків.

Зі збільшенням коефіцієнта тертя зростає ступінь зменшення показників. Так, наприклад, для набивки із найменшим коефіцієнтом тертя $f = 0.07$ різниця між максимальним і мінімальним значенням еквівалентного напруження складає 19.07%, а для набивки з найбільшим коефіцієнтом тертя $f = 0.12$ – ця різниця складає 19.57%.

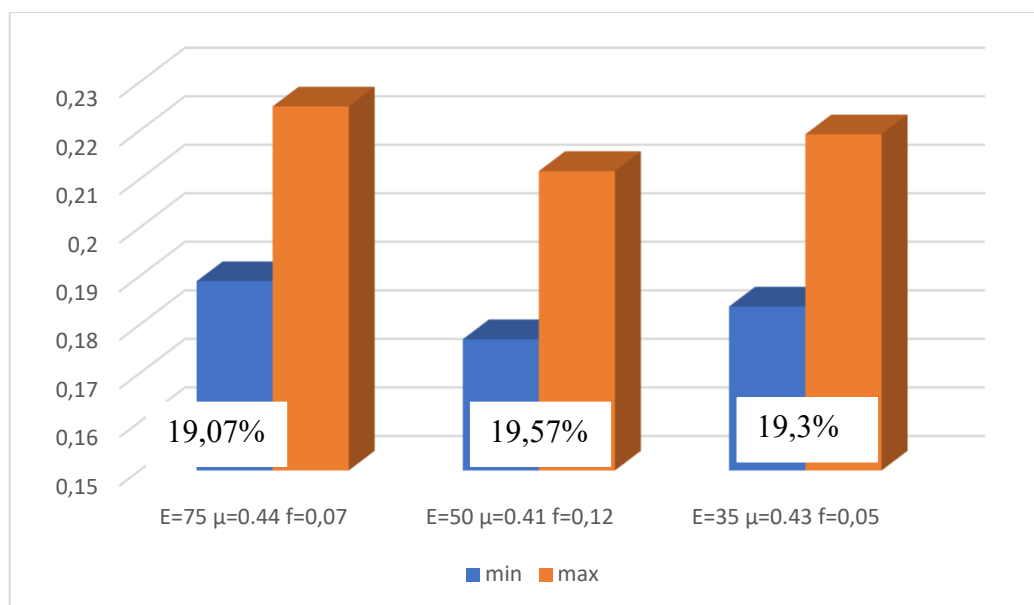


Рисунок 3.13 – Порівняння еквівалентного напруження (МПа) для трьох типів набивок

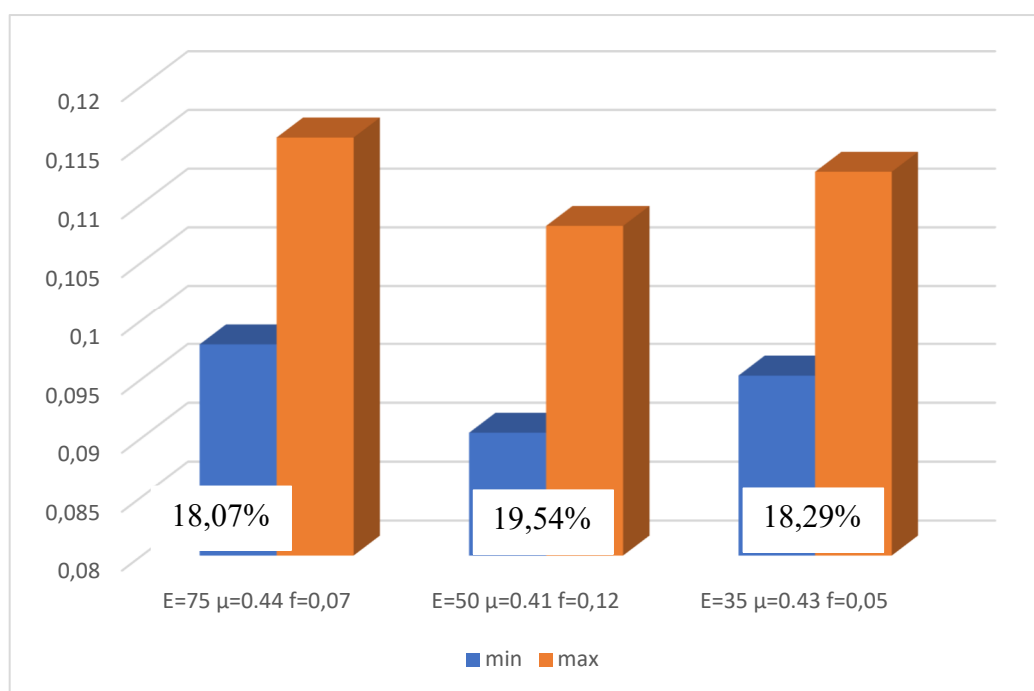


Рисунок 3.14 – Порівняння деформації (10^{-4} мм) для трьох типів набивок

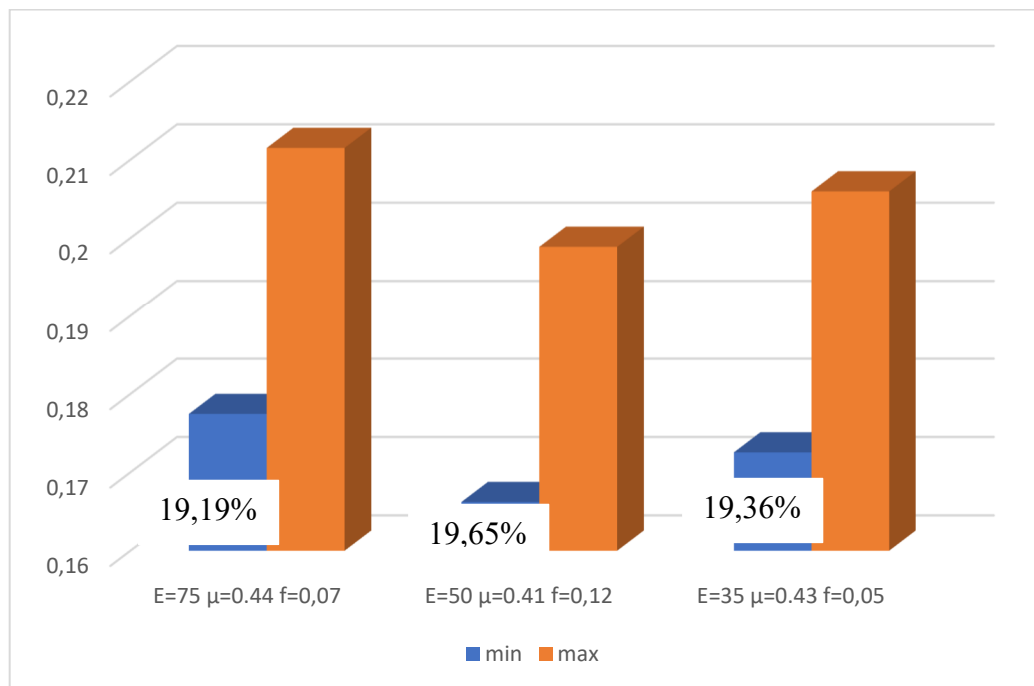


Рисунок 3.15 – Порівняння контактного тиску (МПа) для трьох типів набивок

3.2. Висновок

Модель Арчарда має ряд переваг. Вона є досить простою для розуміння та реалізації. Вона базується на емпіричних спостереженнях та прямо пов'язує знос з прикладеною силою та часом. Це дозволяє швидко оцінити знос і прогнозувати термін служби деталей. Модель Арчарда застосовується для оцінки зносу в різних галузях, таких як машинобудування, металургія, гірництво тощо. Вона може бути застосована до різних матеріалів та геометрій деталей.

Також модель Арчарда має ряд недоліків. Вона ґрунтується на спрощених припущеннях, таких як однорідність матеріалу, постійний коефіцієнт тертя та сталий тиск. У реальних умовах ці припущення можуть не виконуватись, що може призвести до неточностей в прогнозуванні зносу. Також недоліком можна вважати обмежену точність. Модель Арчарда є емпіричною та базується на спостереженнях. Вона не враховує складні фізичні процеси, що відбуваються під час зносу, такі як пластична

деформація, термічні ефекти тощо. Це може обмежити її точність при оцінці зносу в деяких ситуаціях.

За результатами можемо побачити, що деформація, еквівалентні напруження та контактний тиск прямопропорційні коефіцієнту Пуассона. Тому найбільші еквівалентні напруження, деформація та контактний тиск у нас виникають при використанні набивки з фтороплатових волокон із графітовим просоченням (модуль пружності, $E = 75$ МПа, коефіцієнт Пуассона, $\nu = 0,44$, коефіцієнт тертя $\mu = 0,07$). Відповідно найменші – при використанні набивки з комбінованим плетінням фторопластових і арамідних волокон із силіконовим просоченням (модуль пружності, $E = 50$ МПа, коефіцієнт Пуассона, $\nu = 0,41$, коефіцієнт тертя $\mu = 0,12$). З коефіцієнтом тертя прямо пропорційно пов'язана ступінь зниження рівня напружень, деформації та контактного тиску.

Попри свої обмеження, модель Арчарда може бути корисною при проектуванні та прогнозуванні термінів служби деталей. Вона може допомогти інженерам враховувати знос та планувати обслуговування або заміну деталей.

Використання моделі Арчарда може бути початковим кроком для подальшого вдосконалення моделей зносу. Вона може служити базовою основою для розробки більш складних моделей, які враховують додаткові фактори та процеси, що впливають на знос.

Загалом, модель Арчарда має свої переваги у вигляді простоти та універсальності, але також має обмеження у вигляді спрощених припущень та обмеженої точності. Використання цієї моделі може бути корисним для початкової оцінки зносу та прогнозування термінів служби деталей, а також для подальшого розвитку більш складних моделей зносу.

ВИСНОВКИ

Досліджено причини зносу поверхні вала, зокрема тертя, ковзання, зміщення, вібрацію, високий тиск та підвищену температуру. Встановлено, що знос поверхні вала має негативні наслідки, такі як погіршення продуктивності, збільшення витрат на обслуговування та можливі відмови системи.

Оглянуто різні методи вимірювання та аналізу зносу поверхні вала, зокрема фізичні методи (профілометрія, мікроскопія) та непрямі методи (аналіз вібрацій, тепловізуальний аналіз). Зазначено, що ці методи можуть бути трудомісткими та не завжди забезпечують точні результати, тому необхідна розробка більш ефективних методів.

У цій бакалаврській роботі запропоновано комп'ютерну модель зносу поверхні вала з сальником з використанням методу скінченних елементів (FEM) та програмного комплексу Ansys. Зазначено, що цей підхід дозволяє отримати точні та надійні результати.

Проаналізовано модель зносу Арчарда як одну з поширених моделей зносу. Визначено її переваги (простота реалізації, здатність прогнозувати термін служби деталей) та недоліки (спрощені припущення, обмежена точність).

За отриманими результатами можна зазначити, що спостерігається пряма пропорційність між деформацією, еквівалентними напруженнями та контактним тиском, а коефіцієнт Пуассона є фактором, що впливає на ці величини. За модулем пружності та коефіцієнтом тертя не спостерігається пряма залежність. Тому при використанні набивки з фтороплатових волокон із графітовим просоченням (модуль пружності, $E = 75$ МПа, коефіцієнт Пуассона, $\nu = 0,44$, коефіцієнт тертя $\mu = 0,07$) спостерігаються найбільші еквівалентні напруження, деформація та контактний тиск. За аналогією, найменші значення цих параметрів спостерігаються при використанні набивки з комбінованого плетіння фторопластових і арамідних волокон із силіконовим просоченням (модуль пружності, $E = 50$ МПа, коефіцієнт Пуассона, $\nu = 0,41$, коефіцієнт тертя $\mu = 0,12$).

Незважаючи на свої обмеження, модель Арчарда може бути корисною для проектування та прогнозування термінів служби деталей. Вона може сприяти врахуванню зносу та плануванню обслуговування або заміни деталей інженерами.

Використання моделі Арчарда може бути першим кроком у поліпшенні моделей зносу. Вона може служити базовою основою для розробки більш складних моделей, які враховують додаткові фактори та процеси, що впливають на знос.

Загалом, модель Арчарда має свої переваги у вигляді простоти та універсальності, але також має обмеження, пов'язані з спрощеними припущеннями та обмеженою точністю. Використання цієї моделі може бути корисним для початкової оцінки зносу та прогнозування термінів служби деталей, а також для подальшого розвитку більш складних моделей зносу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Anne Bolvari, Sherry Glenn, Rob Janssen, Chris Ellis "Wear and friction of aramid fibre and PTFE filled composites"
2. ДСТУ EN 12266-2:2009. Арматура трубопровідна промислова. Випробування.
3. Гермомеханіка. Розділ "Теорія і конструкції сальникових ущільнень" [Текст] : конспект лекцій для студ. спец. 8.080303 "Динаміка і міцність" денної форми навчання / В. А. Марцинковський, А. В. Загорулько, С. М. Гудков. — Суми : СумДУ, 2009. — 92 с.
4. ДСТУ EN ISO 9222-1:2018 Кресленики технічні. Ущільнювачі для рухомого з'єднання. Частина 1. Загальне спрощене подання (EN ISO 9222-1:1995, IDT; ISO 9222-1:1989, IDT)
5. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Донбас, 2004. — Т. 1 : А — К. — 640 с. — ISBN 966-7804-14-3.
6. Хоменко І. М. Технологічні критерії граничного зносу машин. Чернігів: Чернігівський держ. техн. ун-т, 2005. — 191 с. — ISBN 966-7496-17-1
7. Di Liu, Shaoping Wang, Chao Zhang "A multiscale wear simulation method for rotary lip seal under mixed lubricating conditions."
8. Bekesi N, Varadi K. Wear simulation of a reciprocating seal by global remeshing. *Period Polytech - Mech Eng* 2010;54(2):71.
9. Bekesi N, Varadi K, Felhos D. Wear simulation of a reciprocating seal. *J Tribol* 2011; 133(3), 031601.
10. Stormorken H. Wear and friction of PTFE seals. *Wear* 1999;224(2):175–82.
11. Weber D, Haas W. Wear behaviour of PTFE lip seals with different sealing edge designs, experiments and simulation. *Seal Technol* 2007;2007(2):7–12.
12. Wang Z, Draper D, Hodapp T. Radial lip seal simulation using ANSYS non-standard procedures. In: *International ANSYS conference, Pittsburgh; 2006.* p. 1–12.
13. Xin L, Gaoliang P, Zhe L. Prediction of seal wear with thermal–structural coupled finite element method. *Finite Elem Anal Des* 2014;83:10–21.

14. Li X, Peng G, Wang Q, Liu Y. A numerical analysis method of hydraulic seals for downhole equipments. *Adv Mech Eng* 2013;2013(3):833–9.
15. Frolich D, Magyar B, Sauer B. A comprehensive model of wear, friction and contact temperature in radial shaft seals. *Wear* 2014;311(1):71–80.
16. Розрахунок напружень у сальниковому ущільненні [Текст] / В. А. Марцинковський // *Машинознавство : Науково-технічний і виробничий журнал; Внесений ВАК до Переліку наукових фахових видань України у галузі "Технічні науки", "Фізико-математичні науки (механіка деформівного твердого тіла)"; Мова видання: українська / Засновник: Товариство з обмеженою відповідальністю «КІНПАТРИ ЛТД»*. — 1999. — № 4. — С. 41-44.