



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛТЕТ ПО МЕТАЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ
КАТЕДРА „ПРИЛОЖНА МЕХАНИКА“

инж. Анелия Николова Маждракова

ИЗСЛЕДВАНЕ ЕФЕКТИТЕ ОТ ЕЛАСТИЧНИТЕ ДЕФОРМАЦИИ И
НЕНЮТОНОВ ФЛУИД НА РАБИНОВИЧ ПРИ СМАЗВАНЕТО
НА ПЛЪЗГАЩИ ЛАГЕРИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

За придобиване на образователната и научна степен „доктор“

по научна специалност: 5.1. Машинно инженерство

(Приложна механика)

Научен ръководител: доц. д-р инж. Юлияна Яворова

Научно жури:

1. проф. д.т.н. инж. Климент Хаджов - председател
2. проф. д-р инж. Васил Александров - рецензент
3. доц. д-р инж. Александър Янков - рецензент
4. проф. д-р инж. Васко Тенчев
5. доц. д-р инж. Юлияна Яворова

София, 2017

Дисертационният труд е написан на 141 страници, съдържа 95 фигури и 10 таблици. Цитирани са 159 източника.

Номерата на фигурите, уравненията, таблиците и литературните източници в автореферата съответстват на тези в дисертацията.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на Разширен научен съвет на научното звено на катедра „Приложна механика“, състояло се на 18.05.2017г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 28.07.2017г. от 15.00 часа в Заседателна зала 210, сграда „А“ на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересувашите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности“, стая 406, етаж 4, сграда „А“ на ХТМУ.

ПРИЕТИ ОЗНАЧЕНИЯ

c	Радиална лагерна хлабина, [m]
d	Дебелина на еластичното покритие на втулката, [m]
E	Еластичен модул на покритието, [Pa]
e	Ексцентрицитет на радиалния лагер, [m]
h	Дебелина на масления слой в дадена точка, [m]
h_0	Дебелина на масления слой преди деформация, [m]
H	Безразмерна дебелина на масления слой $= h/c$
k	Коефициент на псевдопластичност, [Pa ⁻²]
L	Аксиална дължина на лагера, [m]
l	Дължина на масления слой в тангенциално направление, [m]
p	Хидродинамично налягане, [Pa]
r	Радиус на шийката, [m]
S	Число на Sommerfeld $= (r/c)^2 \eta \omega / p$
t	Време, [s]
u, v, w	Скоростни компоненти по направление на оси x, y, z , [m/s]
$U = \omega r$	Линейна скорост на точка от повърхността на шийката по направление на ос x , [m/s]
W	Поддържаща сила на масления слой, [N]
x, y, z	Декартови координати
$z_1 = z/(L/2)$	Текуща безразмерна аксиална координата
$\alpha = 2r/L$	Отношение диаметър-дължина на лагера
$\beta = c/r$	Относителна радиална лагерна хлабина
γ	Ъглово отклонение на линията на центровете, [rad]
$\dot{\gamma}$	Скорост на деформация, [s ⁻¹]
δ	Радиално преместване на точка от повърхността на еластичното покритие на втулката, [m]
$\varepsilon = e/c$	Относителен ексцентрицитет на лагера
η	Начален вискозитет на смазочния флуид, [Pa.s]
θ	Ъгъл, който се отчита от линията на центровете по посока на въртене на вала, [rad]
$\theta = x/r$	Текуща ъглова координата, мерена от линията на центровете
μ	Коефициент на Poisson за материала на покритието
ν	Кинематичен вискозитет на смазочния флуид, [m ² /s]
Π	Безразмерно налягане $= p.(c/r)^2 / 6\eta\omega$
ρ	Плътност на маслото, [kg/m ³]
τ	Тангенциално напрежение в масления слой, [Pa]
ψ	Нелинеен фактор на флуида $= k(\eta u/c)^2$
ω	Ъглова скорост на вала, [s ⁻¹]

УВОД

Повсеместното приложение в машиностроенето на плъзгащи хидродинамични (ХД) лагери - радиални и аксиални прави изучаването на ХД триене особено важна задача. Ето защо не случайно още с първите крачки в развитието на смазочната техника се появява и практическата необходимост от едно теоретично, базиращо се на хидродинамиката обяснение на процесите в лагерните възли, с оглед възможност за тяхното съзнателно управление.

Такава трактовка се дава в Хидродинамичната теория на смазването, която представлява всъщност главна теоретична основа на смазочната техника в широкия смисъл на това понятие. Целенасоченото управление на процесите на контакта, триенето и износването в отделните възли на машините се търси и чрез въвеждане на нови по-ефективни технически решения.

В тази насока особено сполучливи се оказват плъзгащите лагери, върху чиито триещи повърхнини се нанасят тънки покрития от по-меки антифрикционни материали. Радиалните деформации на тези еластични покрития изменят чувствително формата и дебелината на масления слой, което пък на свой ред променя разпределението на ХД налягане и повлиява стойностите на основните лагерни характеристики. Взаимното влияние на тези две свързани помежду си явления се изследва на базата на Контактнотехидродинамичната теория на смазването, наричана още Еластохидродинамика. Въпреки големия брой публикации в тази област, все още липсват достатъчно пълни разработки за лагери работещи в такива условия, особено по отношение на комбинираните задачи.

Остава актуална необходимостта от изучаване на комплексното влияние на отделни фактори, пренебрегвани напълно или частично в класическата ХД теория на смазването. Като пример може да се посочи обстоятелството, че в последните години като смазочни флуиди в лагерите се ползват все по-често масла с полимерни добавки, които модифицират свойствата им и подобряват тяхната ефективност. Наличието на тези включвания обаче променя характеристиките на маслата и води до ненютоново поведение.

Във връзка с гореизложеното, както и в пълно съответствие с актуалните тенденции, се представя настоящото изследване, чийто основен обект е движението на ненютонов смазочен флуид в радиален плъзгащ хидродинамичен лагер, върху чиято втулка има нанесено тънко антифрикционно покритие.

ГЛАВА 1

КЛАСИЧЕСКА ХИДРОДИНАМИЧНА ТЕОРИЯ НА СМАЗВАНЕТО И НЯКОИ НЕЙНИ ОБОБЩЕНИЯ - ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Тук са представени постиженията на класическата теория на смазването, както и на някои нейни обобщения, които по същество представляват разширения на теорията, при които се отчитат фактори напълно или частично пренебрегвани в нея като термични ефекти, еластохидродинамика, динамично натоварване, устойчивост и роторна динамика, турбулентни ефекти, инерционни сили на флуида, ненютонови ефекти, грапавости на повърхнините, свиваеми смазочни флуиди. Предвид особената им

значимост за работата по-специално внимание е обърнато на две от обобщенията – влияние на деформациите на лагерните повърхности и ненютонови ефекти на флуида. Представена е и една от най-съществените съвременни тенденции - получаването на многобройни нови, комплексни решения с отчитане на различни ефекти, присъщи на споменатите вече отделни направления в теорията.

Въз основа на направения обзор на литературните източници се обобщава:

- о Провежда се интензивна научно-изследователска работа в областта на хидродинамичната теория на смазването и свързаните с нея направления, но все още липсват някои комплексни решения за различните типове лагери.
- о Еластохидродинамичната теория има очевидна практическа значимост, но все още е недостатъчен броя на решените разнообразни комбинирани задачи за различните видове лагери и трибоконтакти, каквато се предвижда да бъде обект на разработка в настоящия дисертационен труд.
- о Подобно заключение може да бъде направено и за изследванията, свързани с процесите на хидродинамично смазване с ненютонови флуиди. Все още липсват по-подробни изследвания за флуидите, описвани с модела на Рабинович (кубичен модел), особено що се отнася до смазването на плъзгащи лагери с крайни размери в стационарна и нестационарна постановка.

Основната цел на дисертационния труд се дефинира като теоретично и експериментално изследване влиянието на реологичните свойства на смазочния флуид и деформируемостта на контактните повърхности върху процеса на хидродинамично смазване и някои характеристики на радиален плъзгащ лагер с крайни размери.

Във връзка с това в дисертационния труд се решават следните **задачи**:

- о Експериментално изследване на хидродинамичното налягане в плъзгащ лагер посредством специално конструиран стенд.
- о Експериментално изследване на смазочни масла с вискозитетно-индексна добавка, която придава ненютонови свойства на флуида.
- о Съставяне на механо-математичен модел.
- о Извод на диференциалното уравнение за разпределение на хидродинамичното налягане в масления слой на лагера в случай на установено движение на нютонов и на ненютонов смазочен флуид, описван с модела на Рабинович, при отчитане деформируемостта на покритието на лагерната втулка.
- о Решение на полученото уравнение за разпределение на налягането.

ГЛАВА 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ХИДРОДИНАМИЧНОТО НАЛЯГАНЕ В РАДИАЛЕН ПЛЪЗГАЩ ЛАГЕР

Хидродинамичните плъзгащи лагери са предпочитани за опори на въртящи се валове и оси в множество приложения при различни обороти и натоварвания поради тяхната конструктивна простота, надеждност, ефективност и сравнително ниска цена.

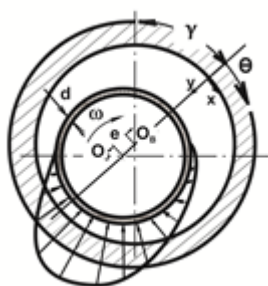
Областите, в които те съхраняват преимуществата си пред стандартизираните серийно произвеждани търкалящи лагери са: - при технологични изисквания за монтажа да бъдат двуделни (за колянени валове и др.); - лагери на особено тежки валове, за които се изисква индивидуално изработване на търкалящи лагери; - при големи динамични натоварвания, поради значителното демпфиране на масления слой; - лагери за особено точно и равномерно въртене; - при изисквания за много малки диаметрални размери на лагера; - при много висока честота на въртене; - при бавно въртящи се оси и валове; при неотговорни случаи и др.

За повишаване надеждността и дълготрайността на лагера е необходимо да се постигат минимални загуби от триене и съответно намаляване на отделената топлина при работата му. Това предполага спазване на режима и работните параметри, подходящи материали за контактните повърхнини, подходящ смазочен флуид и др.

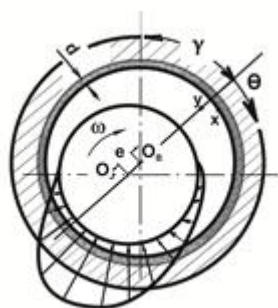
2.1. Режими на смазване

Плъзгащите лагери с течено смазване работят най-често в условията на хидродинамично триене. Както е известно, необходимите условия за създаване на ХД налягане в масления слой на лагера са наличие на клиновидно пространство и смазочен флуид в лагерната хлабина, както и достигната надкритична скорост на относително плъзгане между контактните повърхнини в нея.

На фиг. 2.4. е показано разпределението на налягането в лагера в радиално направление при режим на хидродинамично смазване и случай на плъзгащ лагер с антифрикционно покритие нанесено върху вала, а на фиг. 2.5 - с покритие върху вътрешната страна на втулката.



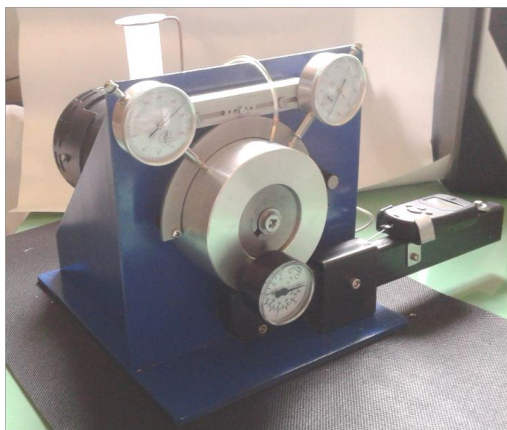
Фиг. 2.4. Разпределение на налягането в ХД плъзгащ лагер с покритие върху вала



Фиг. 2.5. Разпределение на налягането в ХД плъзгащ лагер с покритие върху втулката

2.2. Експериментална апаратура (стенд)

За провеждане на настоящия експеримент специално е разработена и реализирана експериментална установка - стенд за изследване на плъзгащ лагер (фиг. 2.6). Стендът е окомплектован с две лагерни втулки с различни покрития, полиуретан и алуминий съответно (фиг. 2.7.), посредством които се изследва ефекта на еластичните деформации върху разпределението на ХД налягане.



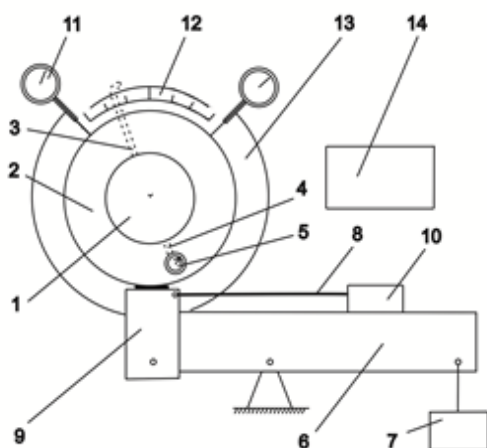
Фиг. 2.6. Експериментален стенд на плъзгащ лагер - общ вид



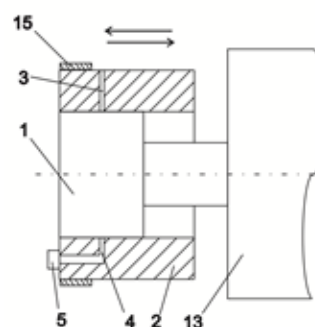
Фиг. 2.7. Експериментален стенд на плъзгащ лагер - сменяеми втулки

Основните компоненти на стенда включват: лагер, натоварваща система, електродвигател с регулируеми обороти и управляващ блок.

Опростена схема на експерименталната установка (общ вид) е показана на фиг. 2.8.



Фиг. 2.8. Схема на експерименталния стенд - общ вид



Фиг. 2.9. Схема на експерименталния стенд - надлъжен разрез с втулката

- 1 – вал на изпитвания лагер;
- 2 – втулка - метална или с вътрешно полимерно покритие;
- 3 – канал за подаване на маслото;
- 4 – канал към сензора за налягане;
- 5 – сензор за налягане;
- 6 – натоварващ лост;
- 7 – тежест;
- 8 – спица;

- 9 – рамо, контактуващо с втулката в единия край и лагерувано в другия;
- 10 – сензор за сила;
- 11 – два часовникови микрометъра;
- 12 – скала за ъглово отклонение;
- 13 – регулируем постоянен ток двигател;
- 14 – управляващ блок;
- 15 – спирателен мех-м от метална лента и пружина

Конструкцията на стенда позволява измерване на налягането и по дължината на лагера. За целта втулката е изработена с по-голяма дължина от тази на вала и това позволява изместването ѝ в аксиално направление (фиг. 2.9).

2.3. Експеримент

Работният флуид (масло AN46) се подава по гравитационен път в ненатоварената зона на лагера. Приема се, че температурата не се променя по време на експеримента. Експериментите са проведени за три различни стойности на натоварването (100, 135, 160 N) и пет стойности на оборотите (700, 1000, 1500, 2000 и 2500 rpm) при използване на двете втулки с различни покрития, респ. различна деформируемост.

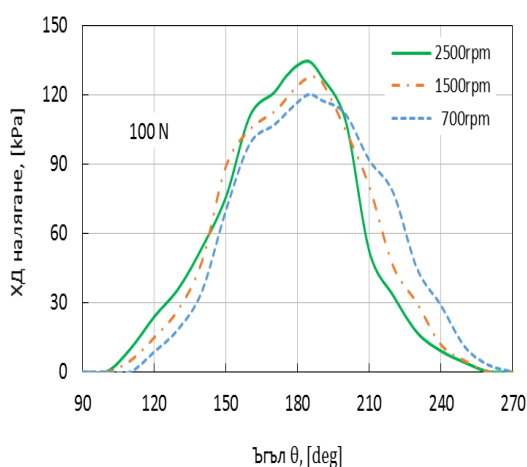
За осигуряване на по-голяма точност на експериментите се провеждат по две паралелни измервания за всеки от изследваните ефекти. При това не са установени чувствителни отклонения.

2.4. Резултати

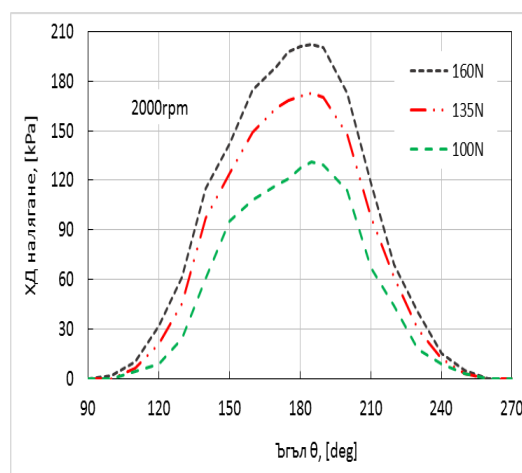
Представените резултати са получени при различни входни параметри и използване на двете втулки с различно деформируеми покрития, като се отнасят до определяне разпределението на ХД налягане в радиален плъзгащ лагер по кръговата координата и по неговата дължина.

2.4.1. Първа група резултати - вариране на оборотите

Представени са експериментални резултати за стойностите на ХД налягане по кръговата координата θ при постоянно натоварване 100 N и вариране на оборотите на вала - 700, 1500 и 2500 rpm - фиг. 2.10.



Фиг. 2.10. Разпределение на ХД налягане при вариране на оборотите и натоварване 100 N



Фиг. 2.14. Разпределение на ХД налягане при вариране на натоварването и обороти 2000 rpm

Пиковите на налягането са отчетени при $\theta \approx 185^\circ$, както за по-ниските, така и за по-високите обороти. Ефектите от нарастване на оборотите върху разпределението на налягането водят до нарастване на максималните стойности на ХД налягане (приблизително 8 - 11 %).

2.4.2. Втора група резултати - вариране на натоварването

Тази група резултати представя ефекта от вариране на натоварването (100, 135 и 160

N) при постоянни обороти на вала върху максималните стойности на налягането в лагера.

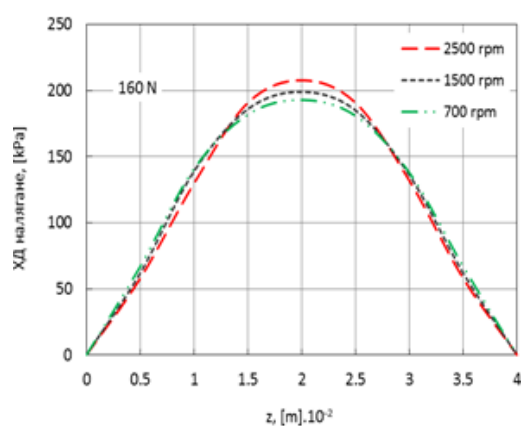
Наблюдава се нарастване на максималните стойности на налягането и оттам на профила на ХД налягане с увеличаване на натоварването от 100 до 160 N (приблизително 60 %) - фиг. 2.14. Пикът на налягането за всички разгледани случаи на натоварване е отново около $\theta \approx 185^\circ$.

Полученият профил на ХД налягане по кръговата координата има типичната си форма както при повишаване на оборотите така и при повишаване на натоварването.

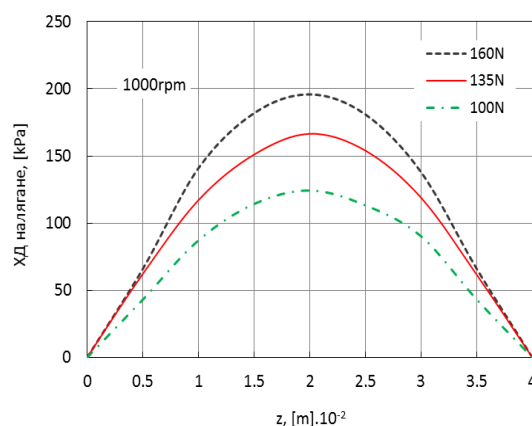
2.4.3. Трета група резултати - разпределение на ХД налягане по дължината на лагера

Тази група резултати показва изменението на профила на налягането по дължината на лагера, за което е използвана опцията на стенда за такова измерване. Получени са стойностите на ХД налягане по дължината на лагера при вариране на оборотите (700, 1500 и 2500 rpm) и зададено постоянно натоварване, както и при вариране на натоварването (100, 135 и 160 N) и при зададени постоянни обороти.

От резултатите се установява, че променливото натоварване в сравнение с променливите обороти дава по-осезаем ефект върху максималните стойности на налягането (поне в разглежданите интервали на вариране на параметрите).



Фиг. 2.17. Разпределение на ХД налягане в аксиално направление при вариране на оборотите



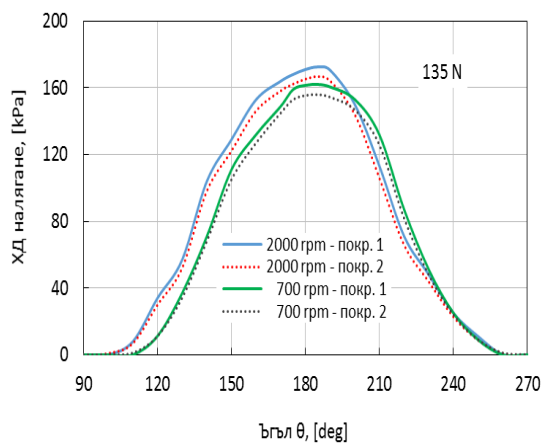
Фиг. 2.18. Разпределение на ХД налягане в аксиално направление при вариране на натоварването

При всички показани резултати за разпределението на ХД налягане по дължината на лагера полученият профил е идентичен по форма с всички известни теоретични постановки и с публикуваните резултати на други автори.

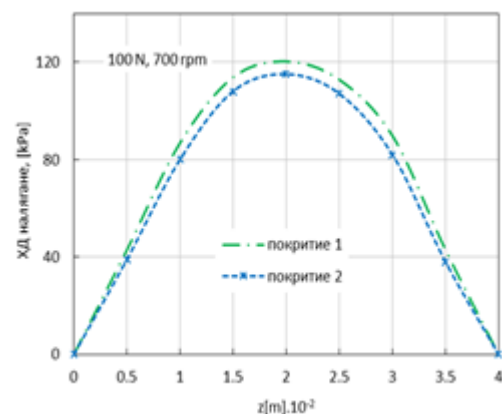
2.4.4. Четвърта група резултати - ефекта на еластичните деформации на покритието

Тази група резултати се отнася до ефекта на еластичните деформации получен при използване на двете лагерни втулки с различно покритие, полиуретан и алуминий съответно.

При всички показани резултати се наблюдават по-ниски пикове на стойностите на ХД налягане за по-мекия материал (покритие 2 - полиуретан) в сравнение с по-коравия



Фиг. 2.20. Разпределение на ХД налягане по кръговата координата θ - за покритие 1 и покритие 2 при различни обороти



Фиг. 2.22. Разпределение на ХД налягане по дължината на лагера за покритие 1 и покритие 2

такъв (покритие 1 - алуминий). При наличие на покрития с различна деформируемост има съхраняване на профила на налягането и по двете координати – в съответствие с литературните източници, касаещи този ефект.

ГЛАВА 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕОЛОГИЧНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА МИНЕРАЛНИ МАСЛА С МОДИФИЦИРАЩА ВИСКОЗИТЕТНИЯ ИНДЕКС ДОБАВКА

Предмет на тази глава е експериментално изследване на минерални масла с вискозитетно-индексна добавка с цел анализиране на нейното влияние върху реологичните свойства на флуида. Резултатите имат приложен характер и част от тях могат да бъдат използвани като входни параметри при компютърна симулация на процеса на смазване на ХД плъзгащ лагер.

3.1. Масла и присадки, реология, апаратура

В множество трибологични възли, включително в плъзгащите лагери, маслата трябва да се разглеждат като съществен техен елемент. Както е добре известно, те могат да играят и ролята на „трето тяло“ от гледна точка на контактния подход. Някои от същественияте функции на маслата са: - осигуряване функционалната годност и намаляване на триенето и износването в трибовъзлите; - предотвратяване задирането на контактните повърхнини; - отвеждане на топлината от триенето и същевременно охлаждане на някои детайли; - защита от корозия; - отвеждане на продуктите на износването, корозията и други замърсители от зоните на триене и др.

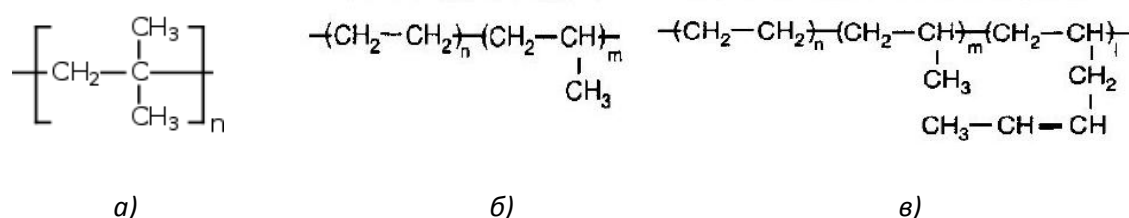
Съвременните масла са сложен химичен продукт, самостоятелен или получен от смесването на базови масла (маслени базови компоненти) и множество органични и неорганични съединения, наречени добавки.

Базовите масла биват *минерални* (произведени от нефт или суров петрол), *синтетични* (получени по пътя на органичния синтез) или *биоразградими* (от растителен или животински произход).

Включването на допълнителни компоненти, наречени *добавки* (*адитиви*, *присадки*) се прави с цел подобряване ефективността на маслата и/или модифициране на техните свойства. Днес почти всички видове смазочни материали съдържат поне една

добавка, а в някои случаи – по няколко различни такива. Това налага добро познаване на взаимодействието и поведението на добавките при смесване, както помежду им, така и със самите масла. В общия обем на маслото количеството на адитивите може да варира в широки граници - от части от процента до 10-15% (в някои случаи по изключение 25-30%). Някои основни видове *присадки* са: - противоизносващи и противозадиращи; - вискозитетно-индексни; - антиоксидантни; - антикорозионни; - депресаторни (понижаващи температурата на течливост) и др.;

Едни от най-важните са *вискозитетно-индексните присадки*, които подобряват вискозитетно-температурните свойства на маслата, т.е. вискозитетния им индекс (ВИ). Това е безразмерна величина, определяна по установена скала и характеризираща изменението на вискозитета на маслото в зависимост от температурата - висока стойност на този индекс показва незначително изменение на вискозитета при промяна на температурата, докато ниската стойност – обратното [6, 64 и др.]. Тези присадки по същество представляват полимери с голяма молекулна маса и дълги вериги като полиизобутилен, етилен-пропилен, хидрогенизиран полиизопрен и др. Някои такива структури са представени на фиг. 3.2.



Фиг. 3.2. Структурни формули на ВИ подобрители: а) полиизобутилен; б) етилен-пропиленов съполимер; в) етилен-пропилен-диен терполимер

Забележка: Вискозитетно индексните присадки се наричат тук и по-нататък в текста присадки, или адитиви, или добавки при все че, съгласно въведени стандарти за уеднаквяване на термините в нефтената промишленост се различават „добавки“ (компоненти с ефект на тяхното предназначение, пропорционален на концентрацията им) и „присадки“ (компоненти с ефект, който не е пропорционален на концентрацията им). В този смисъл ВИ подобрители са присадки.

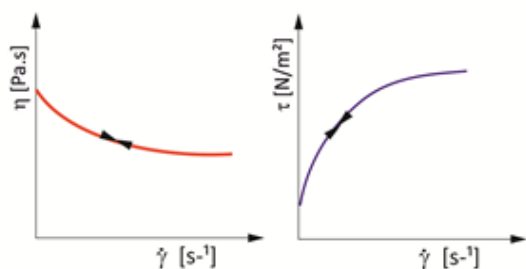
Наличието на такъв вид добавки в смазочните минерални масла води до ненютоново поведение на последните. Поради това специален интерес представлява изучаването на реологичните характеристики на такива смазочни флуиди.

Както е известно от специализираната литература [6, 64, 3, 142 и др.] едно най-общо разделение на голяма част от ненютоновите смазочни флуиди ги диференцира на *пластични, псевдопластични и дилатантни* такива. Вискозитетът им се дефинира понякога като привиден или начален, тъй като в процеса на смазване неговите стойности могат да търпят промяна.

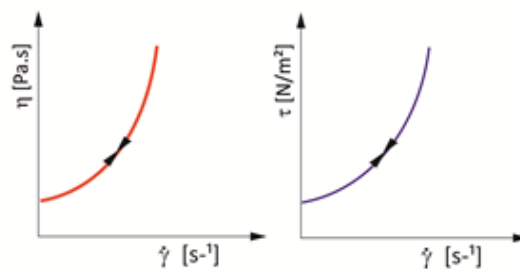
Забележка: Номерацията на литературните източници в автореферата съответства на тази в дисертацията.

Пластичните флуиди в статични условия имат поведение на твърди материали, но при определени условия започват да текат (характеризират се с праг на напрежението, след който могат да имат поведение на нютонови, дилатантни или псевдопластични флуиди). Типичен представител в областта на смазването е Бингамовата пластична маса

(Bingham plastic mass), по-популярна у нас с названието грес. *Псевдопластичните флуиди* се характеризират с намаляване на вискозитета с увеличаване на скоростта на деформация. Този тип поведение на флуида понякога се нарича изтъняване при срязване (shear-thinning). *Дилатантните* (shear-thickening) флуиди имат нарастващ вискозитет при увеличаване на скоростта на деформация, т.е. сгъстяване при срязване. Основните реологични характеристики, т.е. зависимостите на вискозитета η и тангенциалното напрежение τ от промяната на скоростта на деформация $\dot{\gamma}$ за тези два типа флуиди са дадени съответно на фиг. 3.3 и на фиг. 3.4.



Фиг. 3.3. Зависимост на η и τ от скоростта на деформация [142], псевдопластични флуиди



Фиг. 3.4. Зависимост на η и τ от скоростта на деформация [142], дилатантни флуиди

Аналогично на всички видове ненютонови флуиди, изброените тук три типа се описват с различни *реологични модели*. За пластичните флуиди се ползва модела на Бингам (Bingham model) - уравнение (1.18):

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \dot{\gamma}, \quad (1.18)$$

където τ_0 е праг на напрежението, след който започват да текат пластичните маси, а η_{pl} е пластичен вискозитет.

Псевдопластичните и дилатантните смазочни флуиди могат да бъдат описвани едновременно с два закона. Това е широко разпространения степенен модел и представения по-долу кубичен модел.

Степенният модел (power-law) се дава с израза:

$$\tau = m \dot{\gamma}^n, \quad (1.21)$$

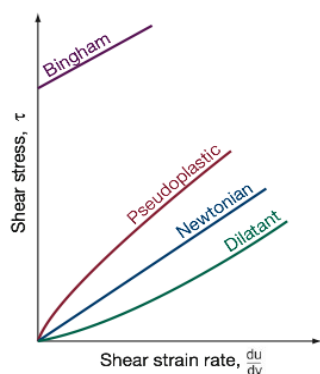
където m и n са материални константи, определяни експериментално. Стойностите на индекса на флуида n дефинират флуидите от този тип в три категории: съответно $n < 1$ за псевдопластичен флуид, $n > 1$ за дилатантен флуид и $n = 1$ при нютонов флуид. Консистентният индекс m съответства на вискозитета, когато флуидът е нютонов.

Кубичният модел (cubic stress /Rabinowitsch), се описва с уравнението:

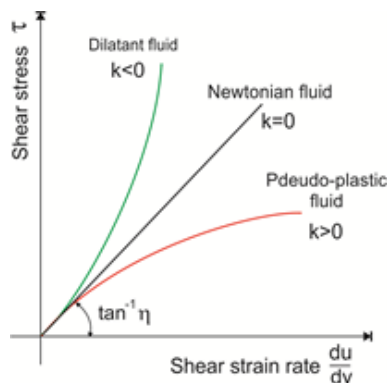
$$\tau + k\tau^3 = \eta \dot{\gamma}, \quad (1.22)$$

където k е експериментална константа, наречена коефициент на псевдопластичност. В зависимост от стойностите на този коефициент флуидите също се дефинират като псевдопластични, дилатантни и нютонови, като за псевдопластичните $k > 0$, за дилатантните флуиди $k < 0$ и при нютоновите $k = 0$.

Основните реологични характеристики на флуидите, описвани с посочените уравнения, са представени на фиг. 3.5 (степенен модел) и 3.6 (кубичен модел).



Фиг. 3.5. Зависимост на тангенциалното напрежение от скоростта на деформация при степенен модел [6]



Фиг. 3.6. Зависимост на тангенциалното напрежение от скоростта на деформация при кубичен модел, [98]

Друга важна реологична характеристика е влиянието на фактора време върху стойностите на вискозитета. В зависимост от това влияние се дефинират два типа поведение на ненютоновите флуиди: *тиксотропия* (вискозитетът намалява с времето) и обратния случай - *реопексия* (вискозитетът нараства с времето). Те могат да се срещат в комбинация с описаните по-горе видове ненютонови смазочни флуиди.

3.2. Експеримент

3.2.1. Обект на изследване

Обект на настоящето експериментално изследване са смазочни флуиди от минерално масло с вискозитетно индексна добавка.

Изборът на конкретните масло и присадка е направен на база проучване и сравнителен анализ на свойствата и поведението на подобен тип лубриканти за плъзгащи лагери, които са обект на изследване в публикуваната експериментална работа [99] на японските учени Wada & Hayashi. Наред с това, подборът на изследвания тук смазочен флуид е консултиран и с колеги от катедра Фин органичен синтез, направление Горива и смазочни материали, ХТМУ, София.

Използваното масло AN46 е продукт на Приста Ойл, България. То притежава вискозитетен клас ISO VG 46 (съгласно най-разпространената класификация за вискозитет ISO 3448-75) и е индустриално масло с общо предназначение, подходящо за смазване на леко натоварени възли в машини и инсталации с проточни и циркулационни системи. Като подобрител на вискозитетния индекс в случая се използва присадката Polybuten 30 (PIB30), продукт на Kemat, Белгия. Съгласно информация на производителя наред с висок вискозитетен индекс други важни свойства на добавката са разтворимост в масла, нетоксичност, термична стабилност, високи антикорозионни свойства и др.

3.2.2. Подготовка на пробите

Предварителната подготовка на пробите (фиг. 3.9) е проведена в Лабораторията по Приложна Механика на Химикотехнологичен и Металургичен Университет (ХТМУ) София.

Приготвени са разтвори на масло с присадка добавена в седем различни концентрации: 0 %, 0.3 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %. (Забележка: Тук и нататък в текста процентните съотношения за концентрациите са в тегловни проценти, т.е. w. %).

Всички проби (маслото с добавката) са измерени с точност $1 \cdot 10^{-3}$ g на калибрирана електронна везна Ainsworth DE-310. Известно е, че хомогенността на пробите е фактор, който може да повлияе върху прецизността на измерванията на вискозитета. По тази причина разтворите са хомогенизирани в продължение на пет часа при температура ~ 50 °C при непрекъснато разбъркване с магнитна бъркалка MSH 300/BOECO.



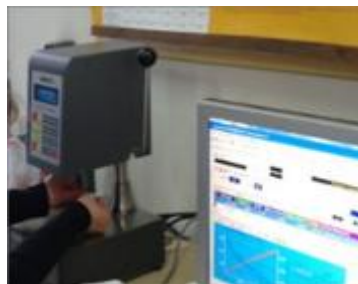
Фиг. 3.9. Подготовка на пробите – Лаборатория по Приложна механика, ХТМУ, София

Пробите масло със седем различни концентрации на добавката са приготвени на един цикъл в рамките на кратко време и при еднакви условия на околната среда, както и в количества, достатъчни за провеждане на всички експерименти (по 200 ml за всяка концентрация).

3.2.3. Експериментална апаратура

Както вече беше отбелязано, въведената модифициращата добавка към маслото му придава ненютонови свойства, поради което изследването трябва да се осъществи с вискозиметър от ротационен тип. В нашия случай измерванията са проведени на ротационен вискозиметър Brookfield „CAP 2000+“, подходящ за ненютонови масла, в сертифицираната Лаборатория по Реология на Политехнически Университет, Букурещ. Тази лаборатория има изградена солидна школа и богати традиции в експериментални изследвания върху реологията на смазочни масла от различен произход и е известна като най-силната в това направление в Югоизточна Европа.

Серията вискозиметри Brookfield CAP 2000+ са инструменти за средна до висока деформационна скорост и оперират по схемата конус-плоча. При този тип апаратура ъгълът на конуса осигурява постоянна скорост на деформация на флуида, позициониран между двата елемента на устройството - подвижния ротиращ елемент (конус) и неподвижния (стационарна плоча). Диапазонът на измервания вискозитет зависи от ъгловата скорост и формата и размера на използвания конус. Вискозиметърът има вграден контрол на температурата, автоматично компютърно управление с програмно обезпечение. Съпътстващият софтуер Carpal 32 позволява автоматизирано тестване, запис и съхранение на експерименталните данни (до 1000 data points за тест). В него са вградени и различни математични модели (реологични закони) за бърз и лесен анализ на ненютоновото поведение на флуидите.



Фиг. 3.10. Изследване на приготвените масла - Лаборатория по Реология, Политехнически Университет, Букурещ

Като работни ротиращи елементи са използвани два вида конуси - конус 8 съответно с малък обхват на деформационната скорост (от 200 до 2 000 1/s) и конус 3 съответно с голям обхват на деформационната скорост (от 1 333 до 13 333 1/s).

За анализ на експерименталните резултати в конкретния случай се използват Power law модел и Rabinowitsch модел, описващи псевдопластични и дилатантни смазочни флуиди.

Стойностите на параметрите за тези два модела (за кубичния - начален вискозитет η и коефициент на псевдопластичност k ; за степенния – индекси на консистентност m и на флуида n), се получават посредством регресионен анализ за целевата функция на база получените експериментални данни. По същия начин се определя и корелационния коефициент R_f , който показва степента на съответствие на получените експериментални данни с теоретичните такива. При $R_f = 100\%$ има пълно съвпадение между теоретичните и експерименталните резултати, т.е. всички експериментални точки лежат върху теоретичната крива.

3.3. Резултати

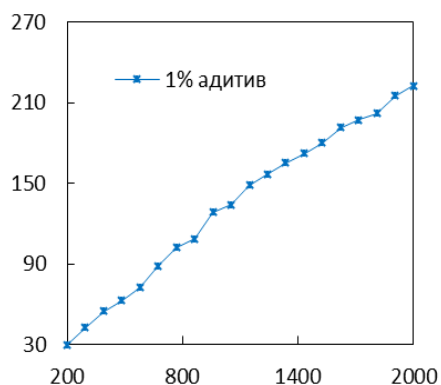
Представени са четири групи резултати: - класически зависимости; -резултати отнасящи се до ефекта на концентрациите; - резултати за влиянието на скоростта на деформация; - проява на тиксотропия в изследваните масла.

3.3.1. Първа група резултати - класически зависимости при изследване на ненютонови флуиди

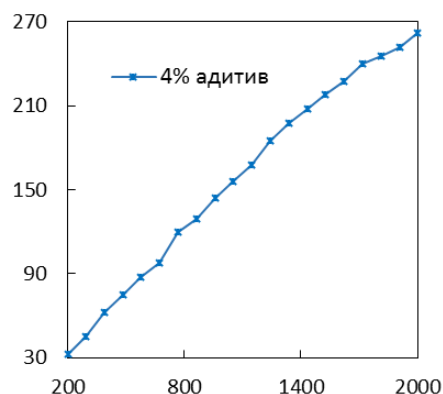
♦ Зависимост: тангенциално напрежение τ - скорост на деформация $\dot{\gamma}$

На фиг. 3.16 и 3.18 са представени реограми, даващи зависимости между тангенциалното напрежение и скоростта на деформация.

За всички проби с добавка (особено при по-високите концентрации) – реограмите имат вида съответстващ на теоретичните графики за псевдопластични флуиди, т.е. нарастване на τ с увеличаване на $\dot{\gamma}$, като аналогични на показаните са и резултатите при високите скорости на деформация.



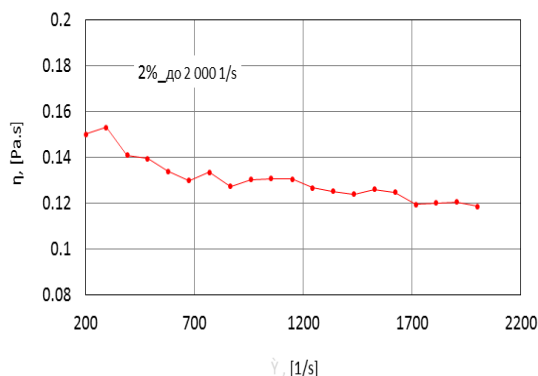
Фиг. 3.16. Реограма за проба с 1% концентрация при ниска деформ. скорост



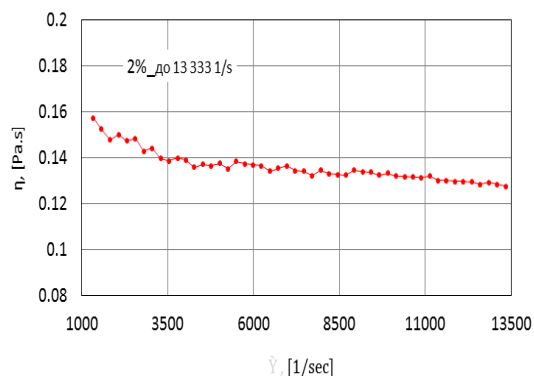
Фиг. 3.18. Реограма за проба с 4% концентрация при ниска деформ. скорост

◊ Зависимост: Вискозитет η - скорост на деформация $\dot{\gamma}$

Като илюстрация на зависимостта $\eta - \dot{\gamma}$ са представени следващите резултати (фиг. 3.20 и 3.21) за двата изследвани обхвата на $\dot{\gamma}$ относно се до проби с 2% концентрация на присадката.



Фиг. 3.20. $\eta - \dot{\gamma}$ при ниски деформ. скорости



Фиг. 3.21. $\eta - \dot{\gamma}$ при високи деформ. скорости

Наблюдава се редукция на вискозитета с нарастване на $\dot{\gamma}$, което отново е индикация за псевдопластични флуиди.

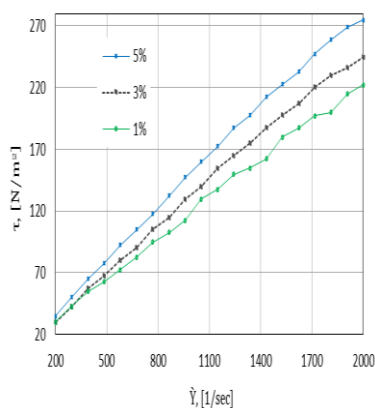
3.3.2. Втора група резултати - ефект на концентрацията на добавката

◊ Върху тангенциалното напрежение τ и върху вискозитета η

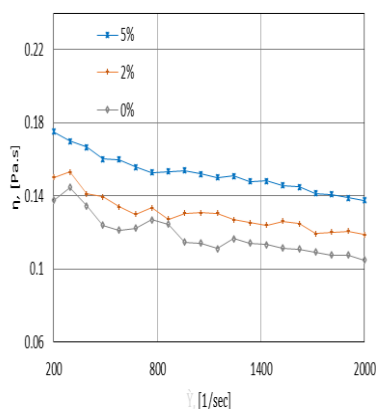
На фигурите по-долу са представени някои резултати за ефекта на концентрацията на добавката върху тангенциалното напрежение τ и върху вискозитета η .

Резултатите показват (фиг. 3.25), че стойностите на τ нарастват с увеличаване на концентрацията. Най-видимо този ефект се проявява при големите стойности на тангенциалното напрежение.

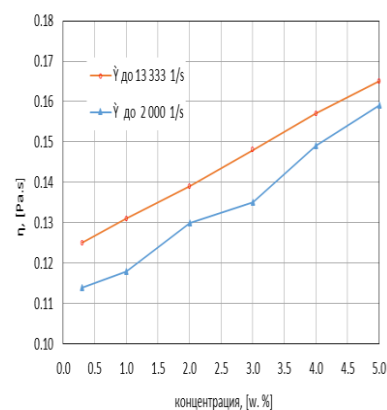
От друга страна резултатите на фиг. 3.26 и 3.28 относно се до влиянието на концентрацията върху вискозитета показват, че очевидно пробите с по-голяма



Фиг. 3.25. Зависимост $\tau - \dot{\gamma}$ за проби с 1, 3, 5%



Фиг. 3.26. Влияние на концентрацията при ниски $\dot{\gamma}$

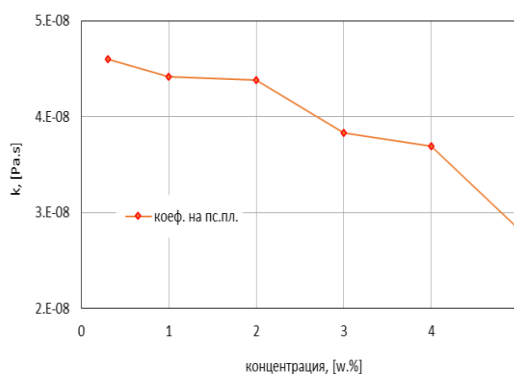


Фиг. 3.28. Зависимост на η от концентрацията

концентрация на присадката имат по-голям вискозитет като цяло. Наблюдаваните тенденции показват пълно качествено съвпадение с публикуваните резултати в експерименталната работа [99] на Wada & Hayashi.

♦ Върху коефициента на псевдопластичност k

Стойностите на коефициента на псевдопластичност k намаляват с увеличаване на концентрацията на добавката. Това е по-осезателно особено за пробите с концентрация над 2%.



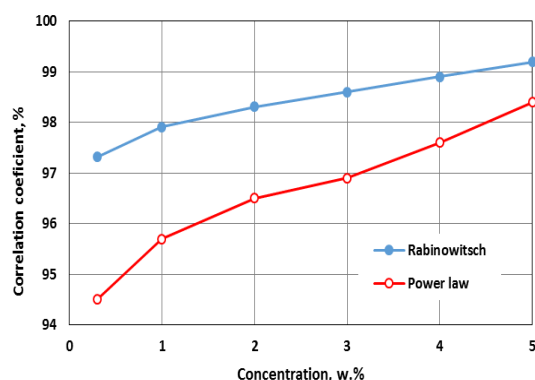
Фиг. 3.29. Зависимост k - концентрация

♦ Върху корелационния коефициент R_f

Представените на фиг. 3.30 резултати показват, че за изследваните масла с добавка корелационния коефициент R_f има много високи стойности (над 94%) и за двата реологични модела (Rabinowitsch и Power law), което категорично показва, че те притежават псевдопластични свойства.

От друга страна, стойностите на коефициента R_f за модела на Rabinowitsch са по-високи, следователно този модел описва по-точно реологичното поведение на изследвания лубрикант.

От резултатите се наблюдава, че с повишаване концентрацията на добавката

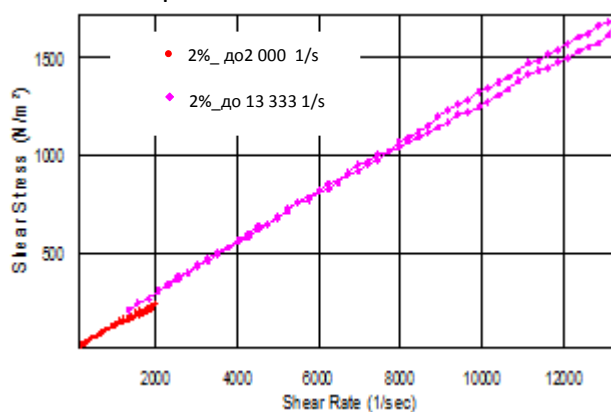


Фиг. 3.30. Зависимост R_f - концентрация

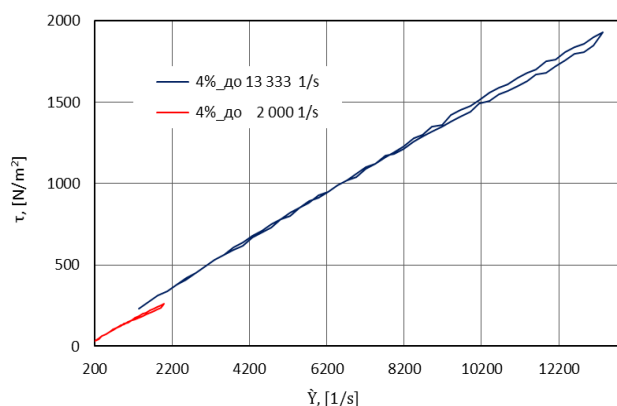
стойностите на R_f нарастват и моделът описва все по-точно тези масла.

3.3.3. Трета група резултати - ефект на скоростта на деформация

◇ Върху тангенциалното напрежение τ



Фиг. 3.31. Ефект на $\dot{\gamma}$ върху τ - за проба с концентрация 2%



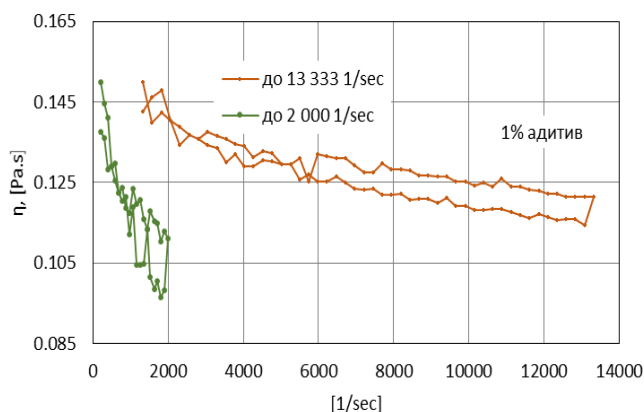
Фиг. 3.32. Ефект на $\dot{\gamma}$ върху τ - за проба с концентрация 4%

Фигура 3.31, относяща се до проба с концентрация 2 % за двата обхвата на деформационна скорост дава информация, че при големия обхват, хистерезисът изчезва приблизително при $5000 \text{ [s}^{-1}\text{]}$, което представлява около 40% от общия обхват на $\dot{\gamma}$. От друга страна при малкия обхват на $\dot{\gamma}$ хистерезисът изчезва при $500 \text{ [s}^{-1}\text{]}$, което

представлява около 25% от общия обхват на скоростта на деформация.

Резултатите на фиг. 3.32, се отнасят отново за двата деформационни обхвата, но при концентрация на добавката 4 %. Тук при големия обхват хистерезисът изчезва приблизително при $7000 \text{ [s}^{-1}]$, което представлява около 55% от общия обхват на $\dot{\gamma}$, докато при малкия обхват на $\dot{\gamma}$ хистерезисът изчезва при $600 \text{ [s}^{-1}]$, което представлява около 30% от общия обхват на скоростта на деформация.

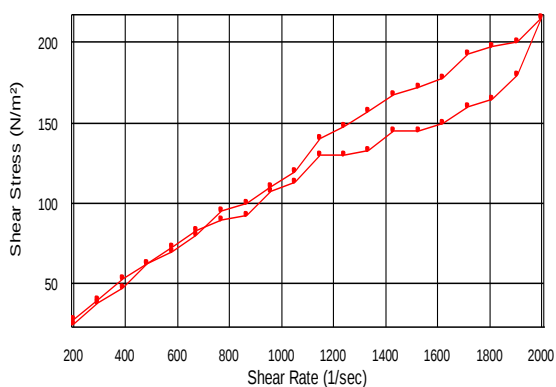
◇ Върху вискозитета η



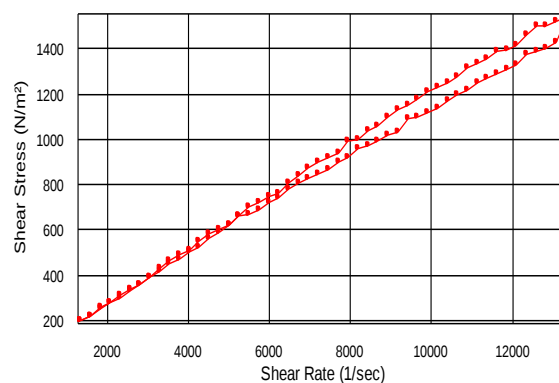
Фиг. 3.33. Ефект на скоростта на деформация върху η

Показан е ефекта на $\dot{\gamma}$ върху η при двата обхвата на скоростта на деформация и за проба с концентрация 1 %. Тук отново както при зависимостта $\tau - \dot{\gamma}$ се наблюдава хистерезис.

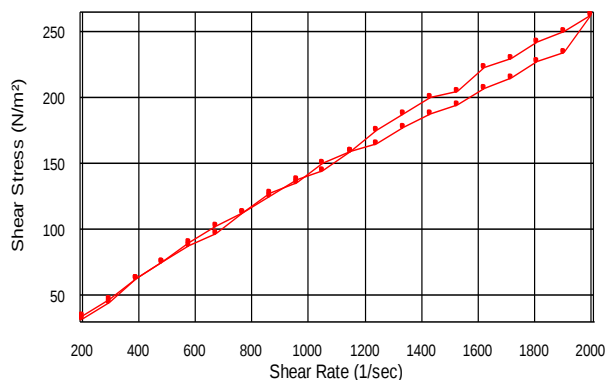
◇ Четвърта група резултати – проява на тиксотропия



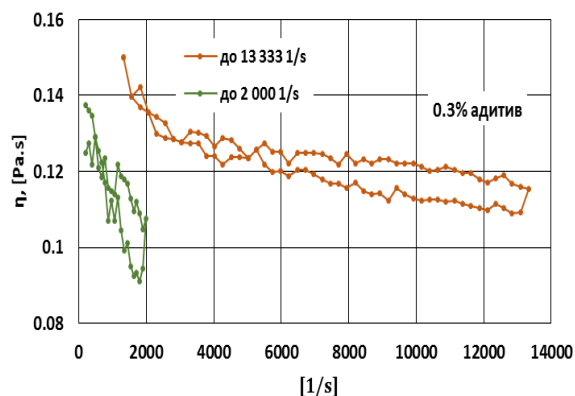
Фиг. 3.37. Проба с 0.3% добавка - ниски деформ. скорости



Фиг. 3.38. Проба с 0.3% добавка - високи деформ. скорости



Фиг. 3.41. Проба с 4% добавка - ниски деформ скорости



Фиг. 3.35. $\eta - \dot{\gamma}$ за проба с 0.3% добавка

Резултатите показват поведението тиксотропия - промяна на вискозитета на флуида с увеличаване времето на срязване.

Проявява се чрез натоварване до максимална деформационна скорост и разтоварване до началната такава, при което се наблюдава хистерезис.

Изследваните масла притежават типични тиксотропни свойства - за всички изследвани проби в двата обхвата на $\dot{\gamma}$ се наблюдават несъвпадащи криви, т.е. хистерезисни участъци.

От друга страна с увеличаване на концентрацията на добавката площта на хистерезисната крива намалява, т.е. маслата стават по-устойчиви на срязване, което е важен показател за масла, използвани в трибовъзли в условия на високи скорости и/или високо натоварване.

3.4. Някои основни изводи

Някои основни изводи от проведеното експериментално изследване на минерално масло AN46 с ВИ добавка полибутен PB30:

- Изследваните проби от чисто масло с различна концентрация на полимерната съгъстваща добавка имат типично поведение на псевдопластични флуиди - при увеличаване на скоростта на деформация се наблюдава намаляване на вискозитета и увеличаване на тангенциалното напрежение.

- Ефектът на увеличаване концентрацията на включената добавка се изразява в нарастване на тангенциалното напрежение, нарастване на вискозитета и намаляване стойностите на коефициента на псевдопластичност.

- Изследваните масла се описват достатъчно точно с двата модела за псевдопластични флуиди – модела на Rabinowitsch и Power law модел. Но стойностите на корелационния коефициент са по-високи за кубичния модел (Rabinowitsch) в сравнение с тези за степенния модел (Power law), което категорично означава, че изследвания тук лубрикант се описва математически по-точно именно с модела на Rabinowitsch флуид. Наред с това, повишаването на концентрацията на добавката води до нарастване стойностите на R_f и кубичният модел описва все по-точно тези масла.

- С увеличаване на концентрацията на добавката намалява хистерезиса и нараства устойчивостта на срязване на маслата.

3.5. Паспорти на маслата с добавка

Въз основа на богатия набор от експериментални резултати, по препоръка на консултиращата лаборатория и с оглед на проявения интерес от страна на фирмата производител са изготвени Паспорти на маслата с добавка (AN 46 /PIB30/ в 7 концентрации) в графичен и цифров формат.

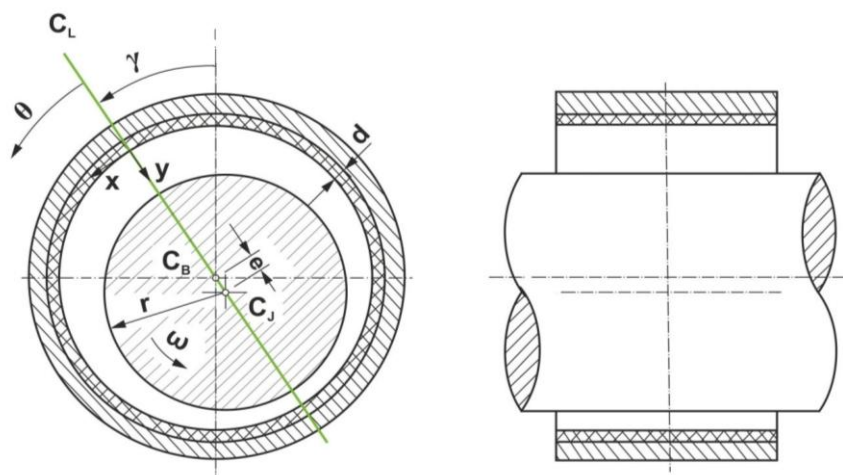
Част от един такъв Паспорт е даден в дисертацията.

ГЛАВА 4

МЕХАНО-МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ

4.1. Постановка на задачата

Разглежда се радиален плъзгащ хидродинамичен лагер с крайни размери в условията на статично натоварване (фиг. 4.1).



Фиг. 4.1 Радиален плъзгащ ХД лагер с еластичен слой върху втулката

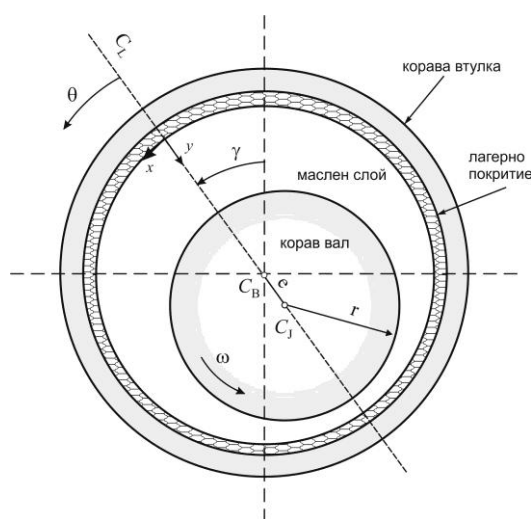
Смазващото вещество в лагерната хлабина е масло с ненютонови свойства, описвани с модела на Rabinowitsch. Изследването се провежда за установено движение на флуида при изотермични и изовискозни условия.

Върху стационарната лагерна повърхност има нанесено тънко антифрикционно еластично покритие, чиито радиални премествания са от същия порядък като дебелината на масления филм.

4.2. Описание на геометрията, натоварването и режима на лагера

- Шийката и лагерът имат кръгла форма и паралелни оси; повърхностите им са идеално гладки; черупката обхваща изцяло шийката (лагер с 360° обхват);

- Хлабината е запълнена със смазваща течност с постоянно налягане, равно на външното (в работата ще се определя генерираното в масления слой хидродинамично налягане);
- Шийката се върти с постоянна ъглова скорост ω около оста си;
- Радиусът на лагерната черупка е приблизително равен на радиуса на шийката ($R \approx r$); радиалната лагерна хлабина $c = R - r$ е от порядъка на величината $1 \cdot 10^{-4}$, т.е. пренебрежимо малко число в сравнение с единицата ($c = R - r \approx 1 \cdot 10^{-4} \ll 1$) - следователно радиална хлабина $\beta = \frac{c}{r} \approx 1 \cdot 10^{-3} \ll 1$, поради което е възможно да се пренебрегне кривината на масления филм; ексцентрицитетът на лагера e е също много малка величина, като $\frac{e}{r} \approx 1 \cdot 10^{-3} \ll 1$;
- От вътрешната страна на лагерната черупка е пресован тънък еластичен слой, чиито материал е хомогенен и изотропен; шийката се разглежда като корава (фиг. 4.2);
- Дебелината d на еластичното покритие на черупката е много малка в сравнение с останалите размери на контактните повърхности;
- Натоварването е статично и действа във вертикално направление;
- Разглежда се работен режим на лагера (режим на хидродинамично триене, при който е достигната предписаната работна скорост), без да се отчет преходните процеси при пусков и спирателен режими.



Фиг. 4.2 Схема на лагера

4.3. Геометрия на масления слой и еластични деформации

- Както вече бе споменато, радиалната хлабина $c = R - r$ е пренебрежимо малко число в сравнение с единицата, от което следва, че относителната радиална хлабина е също пренебрежимо малко число в сравнение с единицата, т.е. $\beta = \frac{c}{r} \approx 1 \cdot 10^{-3} \ll 1$. Наред с това, за всички видове лагери е характерна много малката дебелина h на масления слой

в сравнение с останалите размери на контактните повърхности. Така например отношението на дебелината h към дължината l на масления слой (в тангенциално направление по периферията на лагерната шийка) е от порядъка на величината 1.10^{-3} (или по-малко), т.е. също пренебрежимо малко число в сравнение с единицата ($\frac{h}{l} \approx 1.10^{-3} \ll 1$); съответно и $\frac{h}{r} \approx 1.10^{-3} \ll 1$, [5, 45, 152, 3].

Всички тези обстоятелства аргументират *общоприетата хипотеза в теорията на хидродинамичното смазване* (прилагана и в настоящата работа) *за пренебрегване кривината на смазваните повърхности и съответно кривината на масления филм* (грешка 1‰ – напълно приемлива от гледна точка на техническите приложения), [152], стр. 39). Наред с това, тази хипотеза се прилага повсеместно за изучаване движението в тънки слоеве, както в случаите на смазване на несвиваеми флуиди (могат да бъдат посочени множество примери), така и при изучаване движението в граничен слой, например [153].

Освен това, аналогично с други литературни източници, се приема, че дебелината на масления слой е непрекъсната и диференцируема функция в цялата област (x, z) на лагера.

Въведената координатна система $x y z$ (фиг. 4.2) е свързана с точка от повърхността на покритието върху черупката, като оста y е насочена по нормалата към контактните повърхнини, а ос z по дължината на лагера. При отчитане на предпоставката за пренебрегване на кривините, следва че осите x и z лежат изцяло в разгърнатата повърхнина на контактната повърхност.

Забележка: В настоящата работа се разглежда лагер с крайна дължина, т.е. пространствена ЕХД задача (без пренебрегване на движението на смазочния флуид в аксиално направление по дължината на лагера).

По отношение дефинирането на размерността на задачата за случаите, в които обект на изследване са лагери с крайна дължина, в специализираната литература се ползват две различни формулировки, които само на пръв поглед си противоречат: 1) пространствена задача, защото геометричните и кинематични характеристики на системата се отчитат по направление на трите координатни оси; 2) двумерен проблем (двумерна задача), защото ХД налягане не се изменя по дебелината на масления слой.

В настоящото изложение се ползват и двете дефиниции, касаещи размерността на разглежданата тук задача.

○ В класическия случай, когато не се отчитат деформациите на лагерните повърхности, дебелината на масления слой се дава с уравнението [5, 6, 11, 12, 19, 143 и мн. др.]:

$$h_0 = c + e \cos \theta \quad (4.1)$$

/Забележка: Подробно доказателство на ур. (4.1) за дебелината на масления слой при недеформирани лагерни повърхности е дадено напр. в [5, 11, 12, 143 и др.] /.

В настоящата работа се отчитат деформациите на покритието на втулката (причинени от генерираното в слоя хидродинамично налягане), като останалите лагерни компоненти - самата втулка и вала се третираят като корави тела.

За подобен случай дебелината на масления слой след деформацията се дава като сума от дебелината преди деформацията и радиалните премествания на точките от покритието, [19, 119, 121 и др.]:

$$h = h_0 + \delta = c + e \cos \theta + \delta, \quad (4.2)$$

където

h_0 - дебелина на масления слой преди деформацията [5, 12, 3 и др.];

δ - радиални премествания на точките от повърхността на покритието [19, 121 и др.].

○ Радиалните премествания на точките от повърхността на нанесеното покритие се определят в съответствие с представеното в [117] решение на еластичната част на задачата за тънък еластичен слой върху подвижната лагерна повърхност. В тази работа, на базата на пространствения модел на Власов на еластичната основа [112], е изведен израз за радиалните премествания на точките от повърхността на покритието (тангенциалните и аксиалните се пренебрегват) за случая на тънък еластичен слой върху корава основа във вида:

$$\delta = \frac{(1-2\mu)(1-\mu^2)d}{E(1-\mu)^2} p, \quad (4.3)$$

където: - d е дебелината на еластичното покритие; p – хидродинамично налягане в масления слой; E - еластичен модул на покритието (модул на Young), μ – коефициент на Poisson на материала на покритието.

Настоящото решение се базира и на представения подход в [118], където се разглежда класическа еластохидродинамична задача за плъзгащ лагер в случай на нанесено деформируемо покритие върху втулката при използване на израза (4.3).

4.4. Описание на флуида и движението му в лагерната хлабина

- В настоящия анализ са направени следните допускания за флуида и неговото движение в хлабината:
 - Смазващото вещество се разглежда като ненютонов Rabinowitsch флуид при изотермични и изовискозни условия (разглежда се и нютонов флуид като базов случай за сравнение);
 - Движението на флуида в лагерната хлабина е установено (стационарна задача);
 - Потокът е ламинарен; инерционните сили на флуида се пренебрегват;
 - Дебелината на масления слой по y е малка в сравнение с другите му линейни размери x и z , поради което се пренебрегва кривината на масления филм. (виж параграф 4.3.). По тази причина и градиентът на налягането в напречно направление по ос y е равен на нула ($dp/dy = 0$);

- Липсва приплъзване на границата течност-твърдо тяло, т.е. налице е пълна полепваемост на смазочния флуид към повърхнините на лагера;
- Движението на маслото в хлабината се разглежда като течение без свободна повърхност, поради което масовите сили се пренебрегват.

/ *Забележка:* Основание за приемането на част от тези допускания е дадено по-нататък в изложението по тази Глава – в параграф 4.5. /

○ С цел повишаване ефективността на стабилизиране свойствата на смазочния флуид към състава му е добавена вискозитетно индексна присадка, която представлява полимер с дълга верига от групата на полибутилените. По този начин маслото придобива нютонново поведение и в работата се приема, че то се представя с модела на Rabinowitsch флуид [99, 101, 102 и др.].

○ Реологичният закон за флуиди, описвани с модела на Rabinowitsch се дава със следното кубичното уравнение [98, 101, 102, 103, 104, и др.]:

$$\tau + k\tau^3 = \eta \frac{du}{dy}, \quad (4.4)$$

където: k – коефициент на псевдопластичност; η - начален вискозитет на маслото.

Стойностите на коефициента k дефинират този тип флуиди като псевдопластични ($k > 0$) или съответно дилатантни ($k < 0$), [101, 102, 104, 105 и др.]. За нютоновите флуиди коефициентът на псевдопластичност е равен на нула.

4.5. Изходна система уравнения

Както вече бе споменато, изследването се провежда за установено движение на смазочния флуид при изотермични и изовискозни условия. *Изходната система уравнения за разглежданата ЕХД задача* включва *диференциалните уравнения на движението* на потока в лагерната хлабина (уравнения на Navier-Stokes) за случая на несвиваем вискозен флуид, *уравнението на непрекъснатостта* за същия тип флуид и *уравнението за дебелината на масления слой след деформацията* на покритието.

▮ При извода на уравнението за разпределение на налягането за *нютоновия флуид*, който се приема като база за сравнение, изходната система има вида:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \quad (4.12.a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad (4.12.b)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad (4.12.c)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (4.12.d)$$

$$h = c + e \cos \theta + \delta. \quad (4.12.e)$$

При извода на уравнението за разпределение на налягането за *ненютоновия флуид*, съгласно теорията на тънкия слой при хидродинамично смазване [14, 3, 148, 102 и др.], уравненията за движението и на непрекъснатостта в декартови координати се представят чрез (4.13а – 4.13d). При допълване с уравнението за геометрията на масления филм след деформацията, изходната система за този случай има вида:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_x}{\partial y}; \quad (4.13.a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad (4.13.b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_z}{\partial y}; \quad (4.13.c)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (4.13.d)$$

$$h = c + e \cos \theta + \delta. \quad (4.13.e)$$

ГЛАВА 5

УРАВНЕНИЕ ЗА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ХД НАЛЯГАНЕ

5.1. Извод на уравнението на Reynolds за установено движение на нютонов смазочен флуид

Разглежда се радиален плъзгащ лагер с крайни размери в условията на статично натоварване. Смазочният флуид в лагерната хлабина има нютонови свойства, описвани с уравнението

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}. \quad (5.1)$$

Добре известно е, че едно от основните допускания в ХД теория на смазването на плъзгащи лагери е, че масления филм е много тънък в сравнение с радиуса на лагерната шийка, поради което кривината на филма се пренебрегва. Тогава изходната система диференциални уравнения на тука поставената задача:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \quad (5.4.a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad (5.4.b)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad (5.4.c)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5.4.d)$$

Решението на системата ДУ (5.4) се търси при следните гранични условия:

$$u(x, 0, z) = u_0 = 0;$$

$$v(x, 0, z) = v_0 = 0; \quad (5.5)$$

$$w(x, 0, z) = w_0 = 0$$

и съответно

$$u(x, h, z) = u_h = \omega r;$$

$$v(x, h, z) = v_h = \omega r \frac{\partial h}{\partial x}; \quad (5.6)$$

$$w(x, h, z) = w_h = 0.$$

След двукратно интегриране на (5.4.a) и (5.4.c) се получава:

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + C_1(x, z)y + C_2(x, z); \quad (5.7)$$

$$w = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial z} y^2 + C_3(x, z)y + C_4(x, z). \quad (5.8)$$

При ползване на показаните ГУ се получава крайната форма на изразите за скоростните компоненти u , w по осите x и z

$$u(x, z) = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} (y-h)y + \frac{1}{h} u_h y; \quad (5.11)$$

$$w(x, z) = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial z} (y-h)y. \quad (5.12)$$

За разглеждания случай се предполага линейно разпределение на радиалната скорост v при използване на формулировките дадени от Келъзон в [150] и използвани също в [55, 116, 56 и др.]

$$v = C_5(x, z)y + C_6(x, z). \quad (5.13)$$

На база ГУ (5.6.b) се намира и скоростта v

$$v(x, z) = \frac{1}{h} v_h y = \frac{1}{h} \omega r \frac{\partial h}{\partial x} y. \quad (5.15)$$

Следва интегриране на уравнението на непрекъснатостта по y и то придобива вида

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dy + v_h + \int_0^h \frac{\partial w}{\partial z} dy = 0. \quad (5.17)$$

Това уравнение се преработва като се заместят изразите за трите скорости в него. След преобразувания се получава уравнението на Reynolds за полето на ХД налягане в лагера (както се тбелязва в специализираната литература)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\omega r \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (5.31)$$

Предвид конкретиката на разглежданата задача то представлява уравнение за разпределение на хидродинамичното налягане в масления слой на плъзгащ лагер с крайна дължина, смазан с нютонов флуид, в случай на установено движение на лубриканта (стационарна постановка на проблема). На базата на уравнението на Reynolds след интегриране на полето на налягането могат да бъдат определени компонентите на поддържащата сила на масления слой (хидродинамичните сили, действащи върху лагерната шийка, респ. ротора).

• Аналитичното решение на уравнение (5.31) е невъзможно, поради което се използва прилагането на числен метод. От друга страна, за изпълнение на условията за геометричното и кинематично подобие е необходимо въпросното уравнение да бъде представено в безразмерна форма чрез въвеждане на съответните бездимензионни променливи /някои от тях вече въведени с (4.8)/:

$$\theta = \frac{x}{r} \approx \frac{x}{R}; \quad z_1 = \frac{z}{L/2}; \quad \beta = \frac{c}{r}; \quad \alpha = \frac{2r}{L} \approx \frac{2R}{L}; \quad \Pi = \frac{c^2}{6\eta U r} p; \quad H = \frac{h}{c}. \quad (5.32)$$

Тъй като разглежданата задача е двумерна е необходим подходящ избор на координатния преход от (x, z) към безразмерните координати. Тук ще бъдат представени някои съображения в тази насока.

Един от възможните подходи в това отношение е използването на цилиндрични или други криволинейни координати, което съгласно препоръките в специализираната литература [152, 5 и др.] е задължително за конусните и сферични лагери предвид спецификата на тяхната геометрия. В условията на решаваната тук задача се разглежда, всъщност, движение на тънък маслен слой в радиален плъзгащ лагер, което позволява и прилагането на друг подход, а именно използване на общоприетата в теорията на ХД смазване хипотеза за пренебрегване кривината на смазваните повърхности и респективно кривината на масления слой (с грешка от 1‰ съгласно авторитетни литературни източници, което е напълно допустимо за инженерни задачи, каквато е настоящата).

Основанията за пренебрегване кривината на масления филм се базират на количествени съотношения между характерни дължини (геометрични рамери), присъщи на всеки радиален плъзгащ лагер. *(Забележка: Повече подробности за тези съотношения са изложени в Глава 4, параграфи 4.2, 4.3, 4.5).*

Съгласно въведената координатна система (фиг. 4.1, фиг. 4.2), свързана с точка от повърхността на покритието върху лагерната черупка, както и възможността за пренебрегване на кривините, координатните оси x и z лежат изцяло в разгърнатата повърхнина на смазочния филм.

Прилагането на въведения тук координатен преход от (x, z) към (θ, z_1) /изрази (5.32)/ в задачата за смазване на радиален плъзгащ лагер се използва масово в научните изследвания по същата тематика, като над 80% от публикуваните разработки в специализираната литература се базират именно на него. Въпросният преход към (θ, z_1) координати при обезрамеряването на уравнението на Reynolds за ХД налягане в плъзгащ лагер намира място (в миналото и настоящето) както в множество фундаментални монографии в областта на трибологията като тези на Бургвиц & Завьялов [45] стр. 38, Bhushan [156] стр. 422, Чичинадзе [155] стр. 298, Hori [159] стр. 30 и др., така също и в множество статии в авторитетни списания [33], [27], [157], [123], [158], [120], [121], [122], [98], [99] и мн. др.

Като се вземат предвид съотношенията (5.32) уравнението на Reynolds се записва като:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{c^3 H^3}{\eta} \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} \frac{6\eta \omega r^2}{rc^2} \right) + \frac{1}{L/2} \frac{\partial}{\partial z_1} \left(\frac{c^3 H^3}{\eta} \frac{\partial \Pi}{\partial z_1} \frac{6\eta \omega r^2}{(L/2)c^2} \right) = 6\omega r \frac{c}{r} \frac{\partial H}{\partial \theta}. \quad (5.33)$$

След преобразуване на ур. (5.33), то придобива вида

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(H^3 \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} \right) + \alpha^2 \frac{\partial}{\partial z_1} \left(H^3 \frac{\partial \Pi}{\partial z_1} \right) = \frac{\partial H}{\partial \theta}, \quad (5.33^*)$$

Финалната форма на безразмерното обобщено уравнение на Reynolds (по смисъла на Dowson [149]) за разпределение на ХД налягане в масления слой на радиален плъзгащ лагер с крайни размери в случая на установено движение на нютонов флуид след допълнителни преобразувания с цел уеднаквяване на записа има вида

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial \theta^2} + \alpha^2 \frac{\partial^2 \Pi}{\partial z_1^2} + \frac{3}{H} \frac{\partial H}{\partial \theta} \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} + \alpha^2 \frac{3}{H} \frac{\partial H}{\partial z_1} \frac{\partial \Pi}{\partial z_1} = \frac{1}{H^3} \frac{\partial H}{\partial \theta}. \quad (5.35)$$

Решението на това уравнение се провежда при вариране на водещите работни параметри на лагера. Получените резултати от численото решение са представени в Глава 6, съпоставяйки ги с резултатите от решението на уравнението за градиента на ХД налягане, при което смазващото вещество в лагерната хлабина се разглежда като ненютонов псевдопластичен или дилатантен флуид, описван с модела на Rabinowitsch.

5.2. Кратък извод на модифицираното уравнение на Reynolds за установено движение на ненютонов флуид

Конститутивното уравнение между тангенциалното напрежение на срязване и скоростта на ъглова деформация за Rabinowitsch флуид се подчинява на кубичното уравнение [101, 102, 104, 99, 148, 105 и др.]

$$\tau + k\tau^3 = \eta \frac{du}{dy}. \quad (5.36)$$

Според теорията на тънкия слой при хидродинамично смазване [147, 99, 102 и др.], уравненията за движение и на непрекъснатостта в декартови координати се представят като

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_x}{\partial y}; \quad (5.37.a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad (5.37.b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_z}{\partial y}. \quad (5.37.c)$$

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \quad (5.37.d)$$

Интегрирането на уравнения (5.37.a) и (5.37.c) по y дава:

$$\tau_x = \frac{\partial p}{\partial x} y + \tau_1; \quad (5.38)$$

$$\tau_z = \frac{\partial p}{\partial z} y + \tau_2, \quad (5.39)$$

където τ_1 и τ_2 са интеграционни константи.

Заместването на уравнения (5.38) и (5.39) в уравнение (5.36) води до получаване на градиентите на скоростта в следния вид:

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\eta} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} y + \tau_1 \right) + k \left(\frac{\partial p}{\partial x} y + \tau_1 \right)^3 \right]; \quad (5.40)$$

$$\frac{dw}{dy} = \frac{1}{\eta} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial z} y + \tau_2 \right) + k \left(\frac{\partial p}{\partial z} y + \tau_2 \right)^3 \right]. \quad (5.41)$$

Решението на системата диференциални уравнения (5.37) се търси при следните гранични условия за скоростните компоненти:

$$\begin{aligned} u(x, 0, z) &= u_0 = 0; \\ v(x, 0, z) &= v_0 = 0; \\ w(x, 0, z) &= w_0 = 0 \end{aligned} \quad (5.42)$$

и съответно

$$\begin{aligned} u(x, h, z) &= u_h = \omega r; \\ v(x, h, z) &= v_h = \omega r \frac{\partial h}{\partial x}; \\ w(x, h, z) &= w_h = 0. \end{aligned} \quad (5.43)$$

Интегрирайки уравнения (5.40) и (5.41) по y , в съответствие с граничните условия (5.42) и (5.43) се намират съответните интеграционни константи, след чието заместване се получават изразите за компонентите на скоростта $u(x, z)$ и $w(x, z)$ съответно по направление на x и z в следния вид (сходно с полученото от Wada в [99, 148]):

$$u = \frac{1}{\eta} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) + k \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^3 F_1 \right] + u_h \left[1 - \frac{y + k \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 F_2}{h \left(1 + \frac{1}{4} k \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 h^2 \right)} \right]; \quad (5.44)$$

$$w = \frac{1}{\eta} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} y(y-h) + k \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 F_1 \right], \quad (5.45)$$

където

$$F_1 = \frac{1}{4} y^4 - \frac{1}{2} h y^3 + \frac{3}{8} h^2 y^2 - \frac{1}{8} h^3 y, \quad (5.46) \quad \text{и} \quad F_2 = y^3 - \frac{3}{2} h y^2 + \frac{3}{4} h^2 y. \quad (5.47)$$

В разглеждания случай се приема линейно разпределение за радиалната скорост v , като се използват формулировките на Кельзон и др. в [150]. Нейното определяне се провежда с използване на ГУ (5.42) и (5.43). Крайната форма на тази скоростна компонента се дава като:

$$v = \frac{v_h}{h} y \quad (5.48)$$

Интегрирането на уравнението за непрекъснатостта (5.37.d) по дебелината на масления слой y в границите от 0 до h и при удовлетворяване на ГУ (5.42) и (5.43) дава:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h(x,z)} u dy - u_h \frac{\partial h}{\partial x} + v_h + \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{h(x,z)} w dy = 0. \quad (5.49)$$

Тогава след заместване на изразите за скоростните компоненти (5.44), (5.45) и (5.48) в ур. (5.49) и след математични преобразувания се получава модифицираното уравнение на Reynolds за плъзгащ лагер с крайна дължина смазван с ненютонов Rabinowitsch флуид в условия на статично натоварване:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{1}{\eta} \left[\frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial x} + k \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^3 \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{1}{\eta} \left[\frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial z} + k \frac{h^5}{80} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^3 \right] \right\} = \frac{\omega r}{2} \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (5.50)$$

Уравнението по вид съвпада с полученото в [99] и тук участва коефициента на псевдопластичност k . Известно е, че за нютонови флуиди $k = 0$ и с въвеждане на такова полагане в уравнение (5.50) може да се получи класическото уравнение на Reynolds (отнасящо се до смазване с масла с нютонови свойства). За ненютоновите флуиди коефициентът на псевдопластичност k приема съответно положителни или отрицателни стойности, като за псевдопластичните материали $k > 0$, а при дилатантните лубриканти $k < 0$. Полученото уравнение (5.50) има по-общ характер, тъй като включва и случая касаящ ненютонови флуиди.

Членът от дясната страна на това уравнение показва действието на т.нар. клин ефект. В радиалните плъзгащи лагери с ненютонови Rabinowitsch флуиди, аналогично на смазването с нютонови флуиди, хидродинамичното налягане се развива в резултат на съвместното (или поотделно) действие на трите фактора за масления филм в хлабината (клин, разтягане, притискане / wedge, stretch and squeeze effects) [6, 3, 148].

Решението на уравнение (5.50) се провежда с използване на числен метод. Поради необходимостта от спазване условията на подобие то да бъде преобразувано в бездименсионен вид.

С прилагане на въведените безразмерни променливи (5.32) в (5.50) и допълнителни преобразувания се получава бездименсионната форма на модифицираното уравнението на Reynolds във вида:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{H^3}{12} \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} + \psi \frac{36H^5}{80} \left(\frac{\partial \Pi}{\partial \theta} \right)^3 \right] + \alpha^2 \frac{\partial}{\partial z_1} \left[\frac{H^3}{12} \frac{\partial \Pi}{\partial z_1} + \alpha^2 \psi \frac{36H^5}{80} \left(\frac{\partial \Pi}{\partial z_1} \right)^3 \right] = \frac{1}{12} \frac{\partial H}{\partial \theta}. \quad (5.53)$$

В това уравнение участва нелинейния фактор ψ , отчитащ ненютоновите ефекти на флуида описван с кубичния модел. Съгласно [99, 101, 102 и др.] нелинейният фактор се представя със следната зависимост

$$\psi = k \left(\frac{\eta u}{c} \right)^2 = k \left(\frac{\eta \omega r}{c} \right)^2. \quad (5.54)$$

Когато нелинейният фактор ψ се положи равен на нула, се получава класическото уравнение на Reynolds за плъзгащ лагер смазван с нютонов флуид. При дилатантните ненютонови флуиди $\psi < 0$, докато при псевдопластичните такива $\psi > 0$ [101, 104, 102]. Както е видно от (5.54), стойността на нелинейния фактор ψ зависи от радиалната лагерна хлабина c , ъгловата скорост на вала ω , началния вискозитет на маслото η и коефициента на псевдопластичност на флуида k . Предвид релацията (5.54) между нелинейния фактор и коефициента на псевдопластичност, то при нарастване на k следва

увеличаване на стойностите на ψ . За нютонови флуиди $\psi = 0$, тъй като $k = 0$. Чрез въвеждането на тази безразмерна величина ψ в уравнение (5.53) се отчитат реологичните свойства на псевдопластичните и дилатантните флуиди, които са обект на изследване в настоящата работа.

Резултатите от решението на модифицираното уравнение на Reynolds (5.53) за ненютонови флуиди са представени в Глава 6. Направена е съпоставка с решенията, получени за класическия случай – смазване с нютонови масла.

От друга страна посредством интегриране на модифицираното уравнение на Reynolds за плъзгащи лагери може да се определи носещата способност на лагера, респ. хидродинамичните сили действащи върху лагерната шийка (ротора на ротационната машина), както и могат да се намерят други основни експлоатационни лагерни характеристики, като числа на Sommerfeld, необходим дебит на маслото, сила на триене, триещ фактор.

Както е известно от специализираната литература [5, 6, 12 и мн. др.], носещата способност на лагера се изчислява посредством израза:

$$\bar{W} = \sqrt{\bar{W}_1^2 + \bar{W}_2^2} = \frac{\beta^2}{6\eta\omega rL} W. \quad (5.55)$$

Тук $\bar{W}_1$ и $\bar{W}_2$ представляват компонентите на поддържащата сила на масления слой, които действат по направление на линията на центровете C_L и съответно перпендикулярно на нея. Те се определят съответно с изразите:

$$\bar{W}_1 = - \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} \Pi \cos \theta d\theta dz_1; \quad (5.56)$$

$$\bar{W}_2 = \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} \Pi \sin \theta d\theta dz_1. \quad (5.57)$$

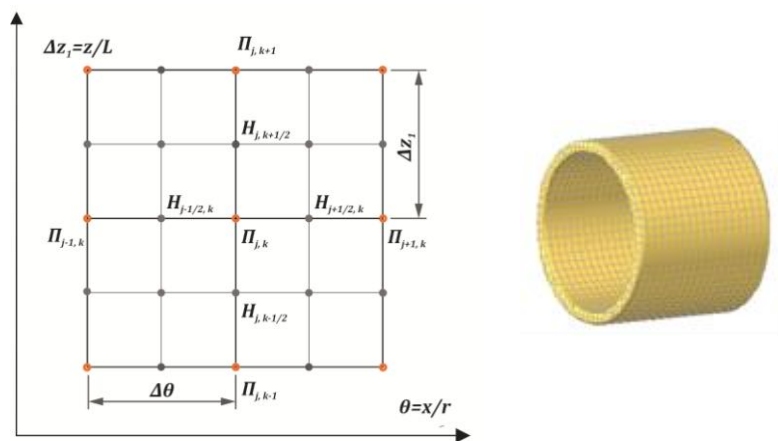
Тогава числото на Sommerfeld, което по същество представлява коефициента на товароносимост на лагера, се дефинира като:

$$S = \frac{W\beta^2}{\eta\omega rL} = 6\bar{W}. \quad (5.58)$$

5.3. Числено решение на уравнението за разпределение на хидродинамичното налягане

5.3.1. Постановка на численото решение

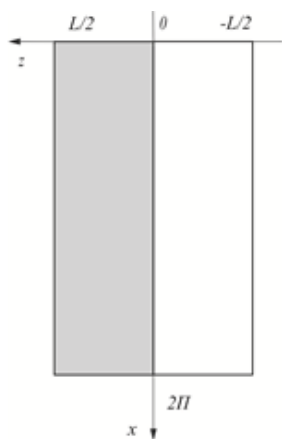
Решението се провежда с метода на крайните разлики, за което е необходимо частните диференциални уравнения (5.35) / (5.53) се заместват с апроксимиращи ги диференчни уравнения, които се изпълняват във всеки възел на ортогоналната мрежа, нанесена върху разгърнатата повърхнина на масления слой (фиг. 5.1.)



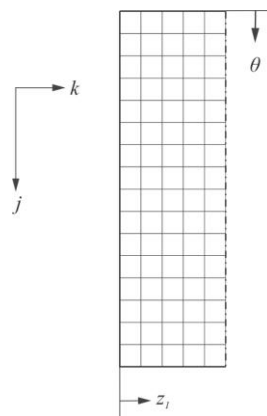
Фиг. 5.1. Разположение на точките в диференчната мрежа

На същата фигура е показано разположението и означенията на точките в околността на всяка (j,k) точка, в която се търсят неизвестните безразмерно налягане Π , дебелина на масления слой H и радиални премествания $\bar{\delta}$.

Основание за използването на такъв вид мрежа дава въведената в Глава 4 предпоставка за пренебрегване на кривините на смазваните повърхности, от което следва, че осите x и z лежат изцяло в разгънатата повърхнина на смазочния филм (фиг.5.2).



Фиг. 5.2. Разгънатата повърхнина на масления филм



Фиг. 5.3. Опростена конфигурация на ортогоналната мрежа

На фиг. 5.3 е представена опростена конфигурация на работната ортогонална мрежа, положена върху лявата половина на разгънатата повърхнина на масления слой. Право за това дава пълната симетричност спрямо ос z на характера на разпределение на функциите на налягането, деформацията и дебелината на слоя. Подобен подход се използва в преобладаващата част от публикуваните решения.

Адаптираната към разглеждания случай реитеративна процедура предполага в началото (нулевия цикъл) недеформируемост на еластичното покритие и при тази постановка изчисляване на ХД налягане Π_0 в масления слой с дебелина H_0 . В резултат на това налягане се определят радиалните (в нормално направление към лагерните повърхности) премествания на точките от повърхността на покритието по изрази

$$\bar{\delta}_0 = \frac{6\eta\omega r^2}{c^3} \frac{(1-2\mu)(1-\mu^2)d}{E(1-\mu)^2} \Pi_0. \quad (5.59)$$

На тази база се определя променената вече дебелина на слоя

$$H_1 = 1 + \varepsilon \cos \theta + \bar{\delta}_0. \quad (5.60)$$

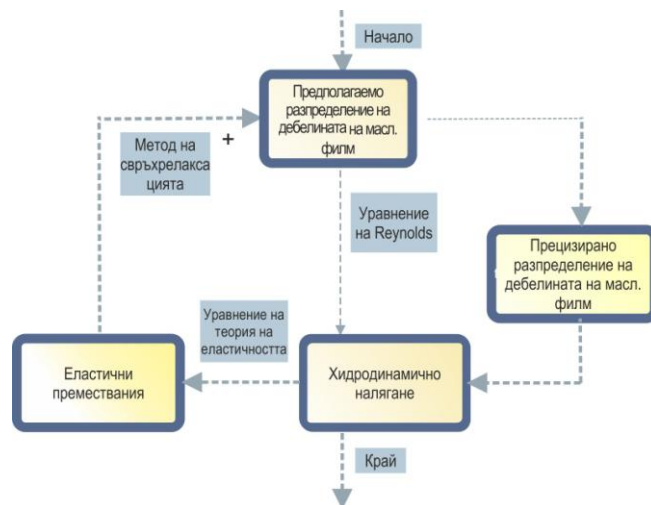
Получените стойности за H_1 са изходни за преизчисляване на безразмерното налягане Π_1 .

Този процес се повтаря докато се постигне сходимост на решението при зададена точност, т.е. разликата в две съседни итерации стане по-малка от зададения толеранс за стойностите на безразмерното налягане. В предложените решения е въведен следния критерий за сходимост:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\Pi_{i,j}^{(k)} - \Pi_{i,j}^{(k-1)}| / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Pi_{i,j}^{(k)} \leq 1.10^{-5}.$$

Получената при всеки цикъл система алгебрични уравнения се решава чрез приложение на метода на свръхрелаксацията (successive over-relaxation).

Прилагането на итеративна процедура с използване на метода на свръхрелаксацията е една от най-масово прилаганите техники при решаването на сходни задачи в областта на ЕХД смазване [напр. 76, 25, 118 и др]. Едно схематично представяне на приложения алгоритъм за решаване на еластохидродинамичната задача (базиран на [4, 76, 122]) е показано на фиг. 5.4.



Фиг. 5.4. Схема на алгоритъм за ЕХД решение

Граничните условия на Reynolds, при които се определя безразмерното налягане се дефинират като [11, 3, 6, 12 и др.]:

$$\begin{aligned} \Pi &= 0 && \text{при } \theta = 0; \\ \Pi &= 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} = 0 && \text{при } \theta = \theta_2; \end{aligned} \quad (5.61)$$

$$\Pi = 0 \quad \text{при } z_1 = \pm 1, \quad (z = \pm L/2),$$

където θ_2 е локален кавитационен ъгъл.

Това са т.нар. гранични условия на Reynolds, според които в аксиалните краища на лагера ХД налягане е нула, а така също и в областите, където градиента на налягането по кръговата координата също е нула.

За да бъдат удовлетворени ГУ (5.61) се налага използването на предположението на Christopherson [27 и др.], според което получените отрицателни стойности на налягането се приравняват на нула при всеки цикъл на итерационния процес.

5.3.2 Числена процедура за уравнения (5.35) и (5.53) при отчитане на деформациите

Следвайки идеята на числения метод [123, 118, 157, 158 и др.] се извеждат съответстващите на ур. (5.35) и (5.53) диференчни уравнения, а впоследствие се записват и изчислителните уравнения за налягането в съответствие с определените вече коефициенти, участващи в тях.

Описаната вече итеративна процедура предполага аналогичен подход и за двете уравнения, съответно (5.35) за нютонув смазочен флуид и (5.53) за ненютонув такъв. Провеждат се числено решаване на всяко от тях в два основни етапа (за недеформирани и респ. за деформирани лагерни повърхности), за които изчислителните уравнения за налягането във всеки един вътрешен възел от мрежата съдържат коефициенти, различаващи се в значителна степен. Това се дължи на качествената диференциация в изразите за дебелината на масления слой преди и след деформацията на еластичното покритие, което рефлектира и в изчислителните уравнения за ХД налягане в слоя.

ГЛАВА 6

РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНОТО РЕШЕНИЕ

Настоящият анализ показва, че ефектът на ненютоновите свойства на смазочния флуид, описван с Rabinowitsch модел, може да бъде представен чрез нелинейния фактор ψ , докато от друга страна ефекта на деформируемост на покритието на втулката - чрез параметрите μ и E . Наред с това, като се отчита математичния модел, водещите параметри очевидно се явяват относителния ексцентрицитет ε , отношението диаметър към дължина на лагера α , нелинейния фактор на флуида ψ и еластичните параметри на покритието μ, E .

6.1. Работни параметри за численото решение

В проведеното числено решение са използвани работни параметри, отнасящи се до разглеждания ХД лагер, смазочния флуид и антифрикционното покритие. Тези параметри са описани съответно в Таблицы 6.1, 6.2 и 6.3, които са дадени са в дисертацията. Варирането най-вече между величините в Таблицы 6.2 и 6.3 отразява влиянието на основните изследвани ефекти в дисертационния труд.

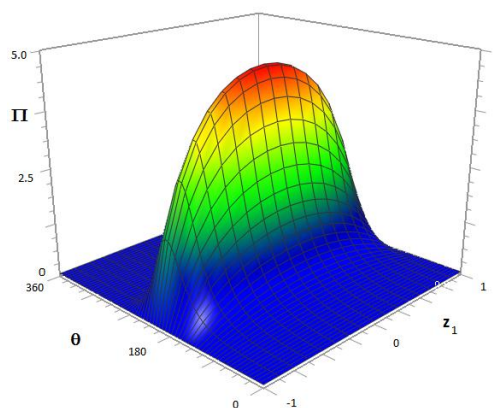
Стойностите на параметрите и разглежданите случаи са избрани от публикувани по тематиката литературни източници [102, 99, 101, 118, 121, 64, 154 и др].

- Резултатите от решението са обособени в две групи, като първата от тях се отнася

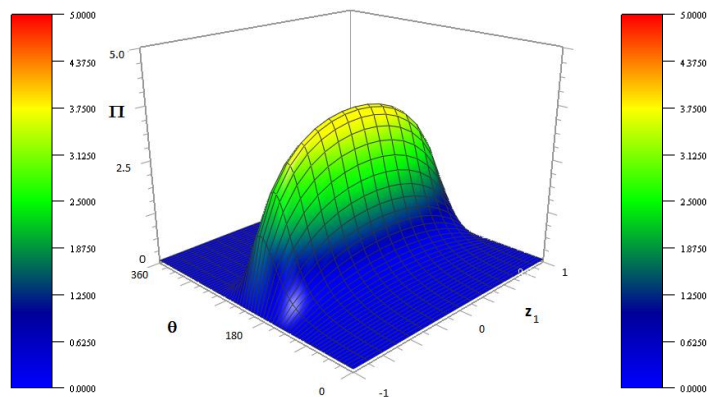
до ефекта на еластичните деформации, докато при втората група е показано влиянието на нелинейния фактор отчитащ ненютоновите ефекти на смазочния флуид, както и комбинация от двата основни изследвани ефекта.

6.2. Първа група резултати – ефект на еластичните деформации

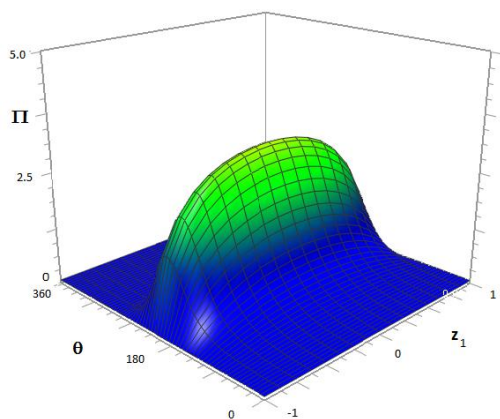
◇ Върху разпределението на хидродинамичното налягане



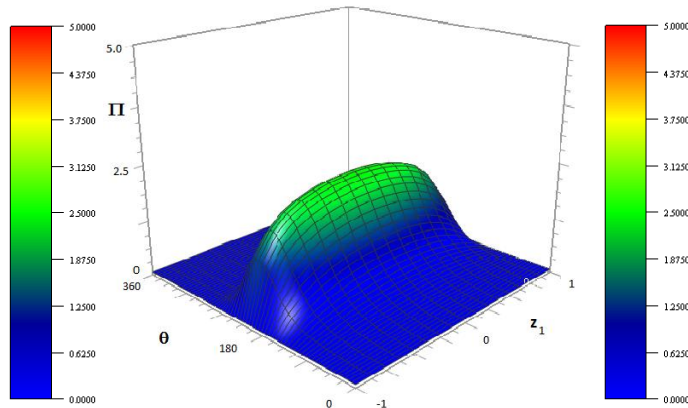
Фиг. 6.1. Разпределение на ХД налягане – корав случай 0



Фиг. 6.2. Разпределение на ХД налягане – деформируем случай 1



Фиг. 6.3. Разпределение на ХД налягане – деформируем случай 2

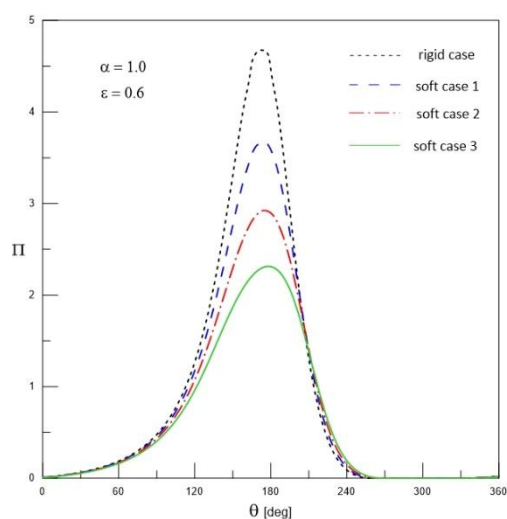


Фиг. 6.4. Разпределение на ХД налягане – деформируем случай 3

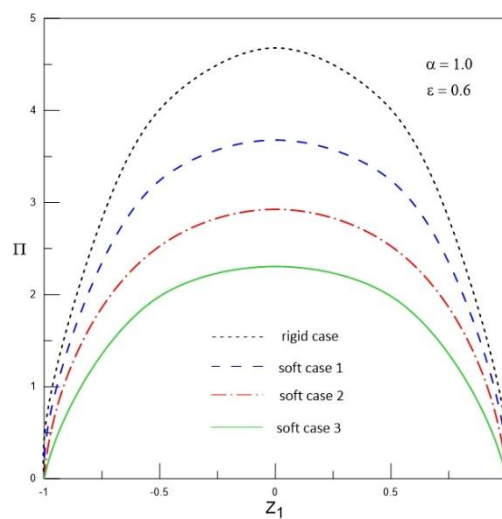
На фигури 6.1 - 6.4 е представен ефекта на еластичните деформации върху разпределение на налягането. Те се отнасят до четирите разглеждани случая на деформируемост на покритието.

Както беше очаквано, за деформируемите случаи се наблюдава забележимо

редуциране на стойностите на ХД налягане. Този ефект е особено видим при по-меките материали на еластомера върху черупката.



Фиг. 6.13. Изменение на ХД налягане при различна деформируемост по кръговата координата

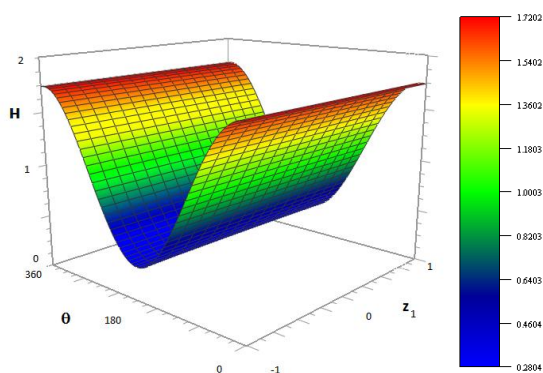


Фиг. 6.14. Изменение на ХД налягане при различна деформируемост по аксиалната координата

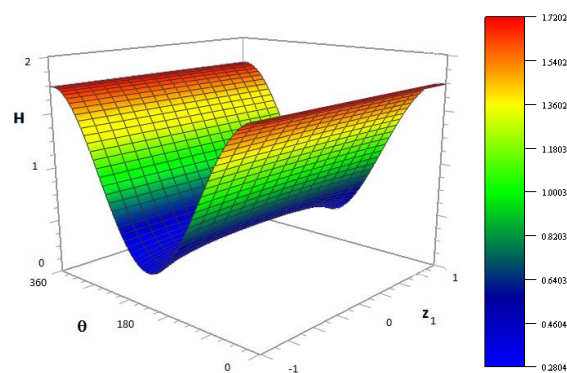
Същият изследван ефект е показан и върху равнините фигури 6.13 и 6.14 съответно по двете базови координати θ и z_1 . Всички показани резултати се отнасят до нютонев флуид.

Ефектът от повишаване деформируемостта на покритието води до намаляване на максималните стойности на хидродинамичното налягане.

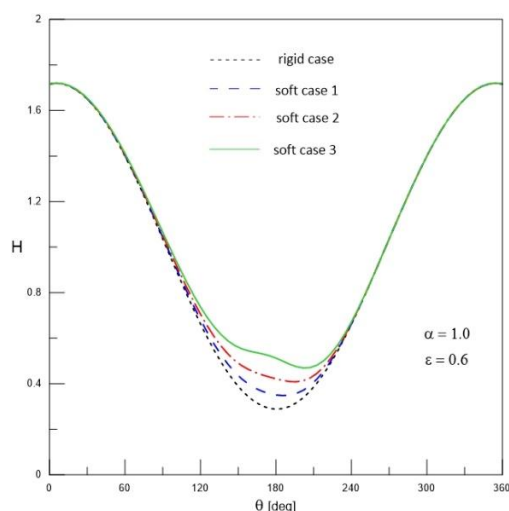
◇ Върху дебелината на масления слой



Фиг. 6.5. Геометрия на масления слой при корав случай 0



Фиг. 6.6. Геометрия на масления слой при мек случай 2



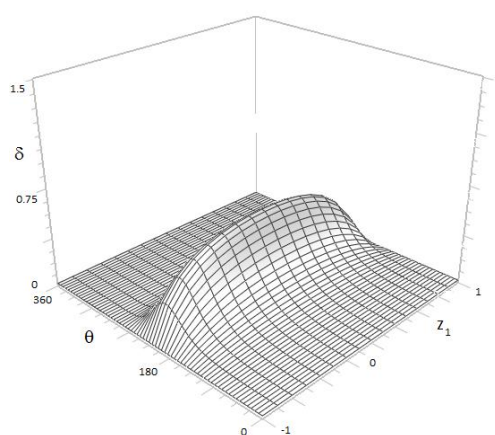
Фиг. 6.15. Промяна на геометрията на масления слой по кръговата координата за различна деформируемост

Резултатите показват, че при деформируемо лагерно покритие геометрията на масления филм се променя отдолу. Профилът е със синусоидална форма с минимум около $\theta = 180^\circ$.

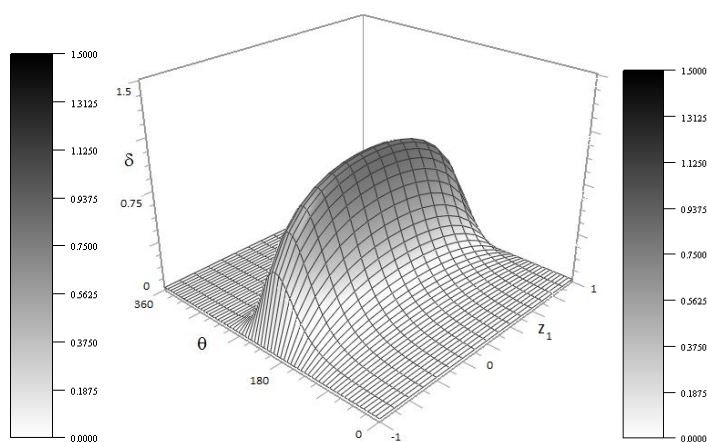
От друга страна на фиг. 6.15 се наблюдава нарастване на минималните стойности на H (виж около $\theta = 180^\circ$) и същевременно изместване на минимума.

♦ Върху разпределението на преместванията

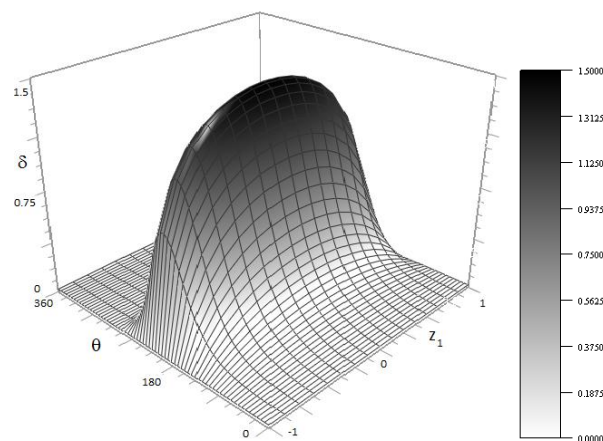
Разпределението на преместванията има същия тип като профила на налягането, но стойностите на максималните премествания са много по-ниски в сравнение с максималните стойности на ХД налягане. В потвърждение на това са следващите представени фигури 6.8, 6.9 и 6.10, където е изобразено разпределението на радиалните премествания по двете базови координати – кръговата θ (тангенциалното направление) и по дължината на лагера z_1 (аксиалното направление), както и на равнинната фиг. 6.12.



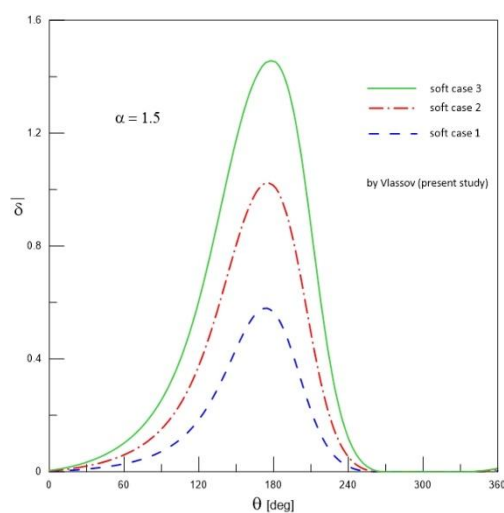
Фиг. 6.8. Разпределение на преместванията – еластичен случай 1



Фиг. 6.9. Разпределение на преместванията – еластичен случай 2



Фиг. 6.10. Разпределение на преместванията – еластичен случай 3



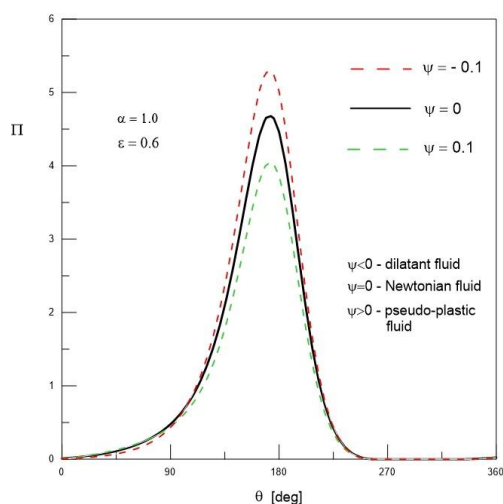
Фиг. 6.12. Разпределение на преместванията по линията на центровете

Резултатите показват, че деформируемостта на покритието води до повишаване на максималните стойности на преместванията. Видно е, че по-меките материали дават по-големи деформации.

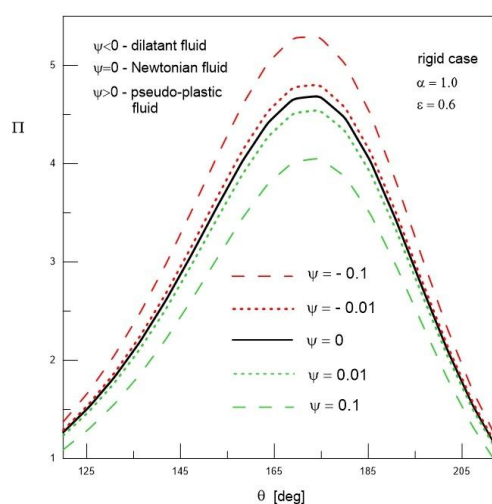
6.3. Втора група резултати – ефект на ненютоновите свойства на флуида

♦ Ефект на нелинейния фактор

Показан е ефекта на ненютоновите свойства на смазочния материал, като се проследява влиянието на нелинейния фактор на флуида върху разпределението на налягането. Резултатите се отнасят до корав случай.



Фиг. 6.16. Изменение на ХД налягане по кръговата координата за различни стойности на ψ

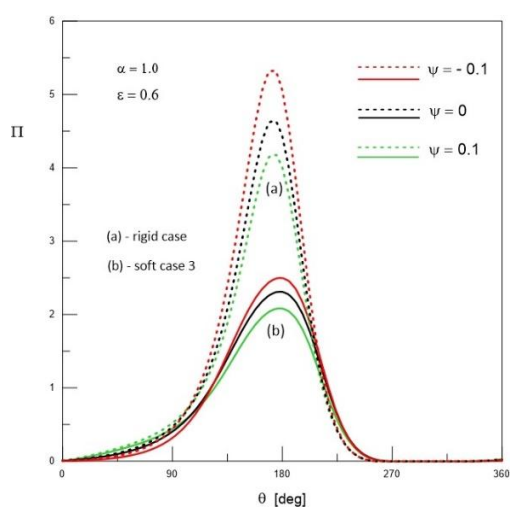


Фиг. 6.17. Влияние на нелинейния фактор върху максималните стойности на налягането

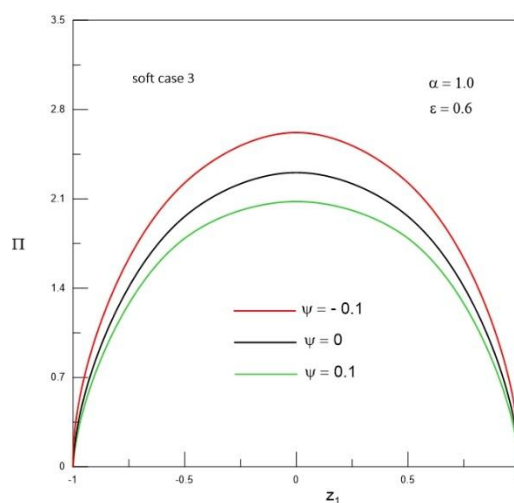
От фигурите може да се обобщи, че в сравнение с нютонов флуид ($\psi = 0$), за псевдопластичните флуиди ($\psi > 0$) следва редукция на хидродинамичното налягане, докато за дилатантните лубриканти ($\psi < 0$) се наблюдава нарастване на стойностите на налягането.

◇ Комбинирано влияние - на еластичните деформации и ненютоново поведение

Тук са представени резултати за разпределение на налягането на дилатантни, нютонови и псевдопластични флуиди, но вече при различна деформируемост на покритието върху лагерната втулка (корав 0 и деформируем случай 3), т.е. разгледано е комбинираното влияние на двата основни изследвани ефекта – еластични деформации и



Фиг. 6.18. Влияние на нелинейния фактор върху разпределение на налягането при различна деформируемост на покритието



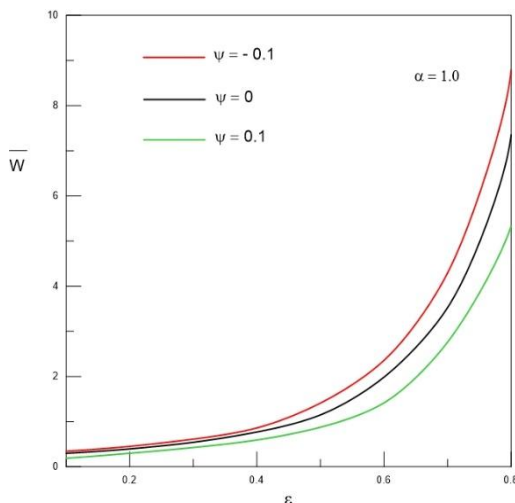
Фиг. 6.19. Изменение на ХД налягане по аксиалната координата при различни стойности на ψ

ненютонови свойства - фиг. 6.18. На фиг. 6.19 са показани резултати за разпределение на налягането по аксиалната координата z_1 на дилатантни, нютонови и псевдопластични флуиди отнасящи се само до деформируем случай 3.

От резултатите се наблюдава, че при отчитане на деформациите ненютоновите ефекти се запазват, но влиянието на псевдопластичното и дилатантно поведение на флуида е относително по-слабо.

И тук максималните стойности на налягането са по-ниски за псевдопластичните флуиди и съответно по-високи за дилатантните флуиди.

♦ Ефект на нелинейния фактор на флуида върху някои лагерни характеристики



Фигура 6.20. Ефект на нелинейния фактор върху носимоспособността на лагера

Тук е представено изменението на безразмерната носимоспособност на лагера с относителния му ексцентрицитет. Очевидно носещата способност видимо намалява при псевдопластичните лубриканти и нараства за дилатантните такива. Този ефект е по-забележим за по-високите ексцентрицитети на лагера.

От друга страна същите закономерности се наблюдават и за коефициента на товараносимост S (число на Sommerfeld), поради съществуващата линейна връзка между него и $\bar{W}$.

6.4. Някои основни изводи

- Ефектите от деформациите на покритието върху лагерната втулка водят до намаляване на пика на ХД налягане. Съответно и до повишаване на минималните стойности на дебелината.

- В сравнение с нютоновите масла, псевдопластичните ефекти се изразяват в намаляване на ХД налягане, докато дилатантните показват обратната тенденция. Наред с това, ненютоновите ефекти на изследваните Rabinowitsch флуиди са по-изразени за по-големите абсолютни стойности на ψ .

- ЕХД смазване (деформируемо покритие върху черупката) с ненютонови флуиди (дилатантни / псевдопластични) показва същото влияние върху стойностите на налягането както класическото ХД смазване. Но ненютоновите ефекти са по-леко проявени при деформируемите случаи в сравнение с кораво лагерно покритие.

- Статичните работни характеристики на лагера като носеща способност и число на Sommerfeld се повлияват от ненютоновото поведение на смазочния флуид по аналогичен начин както ХД налягане.
- Комбинираното влияние на реологията на маслото и еластичните деформации на покритието върху разпределението на ХД налягане е значително и не бива да се пренебрегва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С проведеното теоретично и експериментално изследване в настоящия дисертационен труд е направен опит за решаване на една комбинирана задача за смазване с ненютонов Рабинович флуид на радиален плъзгащ хидродинамичен лагер в условията на еластичен контакт на триещите се повърхности. Обобщената теоретична база и най-вече получените резултати от числени и натурни експерименти недвусмислено доказват влиянието на изследваните тук ненютоново поведение на флуида и деформируемостта на контактните повърхности върху процеса на хидродинамично смазване и някои лагерни характеристики. Очевидно тези фактори не бива да се пренебрегват при решението на подобен тип задачи за трибологичната система радиален плъзгащ лагер, тъй като това прави модела по-груб и води до непрецизни стойности на хидродинамичното налягане и основните лагерни характеристики.

Основните творчески моменти в дисертацията могат да бъдат обобщени както следва:

Научно-приложни приноси

1. Създаден е механо-математичен модел на задачата за пространствено установено движение на ненютонов смазочен флуид (Рабинович модел) в радиален плъзгащ лагер с антифрикционно покритие на втулката.
2. Показан е подробен извод на диференциалното уравнение за разпределение на хидродинамичното налягане в масления слой при установено движение на нютонов смазочен флуид, както и кратък извод на модифицираното уравнение на Рейнолдс при смазване с ненютонови псевдопластични и дилатантни флуиди, описвани с модела на Рабинович.
3. Проведено е качествено и количествено изследване на ефектите на реологията на лубриканта и на деформируемостта на еластичното покритие на втулката.
4. Направен е проблемен и аналитичен обзор на литературни източници в областта на Хидродинамичната теория на смазването, който е представен като кратък исторически преглед на постиженията на Теорията във връзка с 130-те години от нейното създаване.

Приложни приноси

1. Получен е богат набор от експериментални данни за изследваното масло AN46 с вложена добавка PB30.
2. Въз основа на получените данни са подготвени паспорти (информационни бюлетини) на изследваните масла с добавка, които представляват интерес за фирмата

производител с оглед нейната развойна дейност и иновативни продукти.

3. Създаден е стенд на радиален плъзгащ хидродинамичен лагер за изследване ефекта на еластичните деформации на антифрикционните покрития върху втулката и са получени база данни от експериментални резултати за някои лагерни характеристики.

Някои от **идеите за бъдещо развитие на изследванията**, проведени в настоящия дисертационен труд включват:

-Доразработване и реализиране на предложената концепция за усъвършенстване на създадения стенд на плъзгащ лагер;

-Популяризиране на проведеното експериментално изследване върху конкретни минерални масла с вискозитетно-индексна добавка предвид доказаното голямо съответствие с конкретен математичен модел за описване на реологичните им свойства;

-Пряко използване на получените експериментални данни за реологичните параметри на изследваното масло с добавки, описвано с кубичния модел, при компютърната симулация на процесите на хидродинамично и еластохидродинамично смазване на радиален плъзгащ лагер и други трибологични системи.

-Решение на комбинираната задача за смазване с ненютонов Рабинович флуид на радиален плъзгащ хидродинамичен лагер в условията на еластичен контакт и неизотермичен режим и/или нестационарна постановка на проблема.

Списък на публикации по дисертацията

Статии в списания

1. **Mazdrakova A.**, Javorova J., Radulescu A., Mirev A., Rakanov Y., Hydrodynamic Journal Bearing Test Rig with Elastic Deformations of Contact Surfaces Capabilities, Proc. of XV Int Sci Conf. RE&IT 2016, Smolyan, Bulgaria, 10-11 June 2016, 33-36.
2. Javorova J., **Mazdrakova A.**, Andonov I., Radulescu A., Analysis of HD Journal Bearings Considering Elastic Deformation and Non-Newtonian Rabinowitsch Fluid Model, Journal Tribology In Industry, Vol. 38, No.2, 2016, 186-196, / SCOPUS, SJR 0.351 /
3. Яворова Ю., **Маждракова А.**, Кратък исторически преглед на постиженията на Хидродинамичната теория на смазването, Трибологичен Журнал Бултриб, том VI, 6, 2016, 267-303.
4. Яворова Ю., **Маждракова А.**, Теоретични аспекти и проучване на минерални масла с добавки, Трибологичен Журнал Бултриб, том VI, 6, 2016, 315-325.
5. **Маждракова А.**, Влияние на вискозитетно-индексните адитиви върху реологичните параметри на минерални масла, Трибологичен Журнал Бултриб, том IV, 6, 2016, 326-333.
6. **Маждракова А.**, Експериментално определяне на хидродинамичното налягане и триещия момент в радиален плъзгащ лагер, Трибологичен Журнал Бултриб, том IV, 6, 2016, 343-351.

Постерни доклади на научни конференции

7. Ловчалиева Р., Николов Н., **Маждракова А.**, Яворова Ю., ХД Смазване на грапавинни лагерни повърхности с ненютонови смазочни материали, XI Научна Постерна Сесия, ХТМУ, 18 Май 2014.
8. **Маждракова А.**, Яворова Ю., Тотева В., Радулеску А., Ненютонови и деформационни ефекти при смазването на плъзгащи ХД лагери, III E-Poster Научна Сесия за Докторанти и Млади Учени, ФММ, ХТМУ, 06 Ноември 2015.
9. **Маждракова А.**, Яворова Ю., Тотева В., Експериментално изследване на минерални масла с подобрители на вискозитетния индекс, XIII Научна Постерна Сесия, ХТМУ, 20 Май 2016.
10. **Маждракова А.**, Яворова Ю., Славчева М., Експериментален стенд на плъзгащ лагер с антифрикционно покритие, XIV Научна Постерна Сесия, ХТМУ, 18 Май, 2017.

Апробация на дисертационния труд

1. XI Научна Постерна Сесия, ХТМУ, София, 18 Май 2014.
2. 14th International Conference on Tribology "Serbiatrib'15", Belgrade, Serbia, 15-18 May 2015.
3. III e-Poster Научна Сесия за докторанти и млади учени, ФММ, ХТМУ, София, 06 Ноември 2015.
4. XIII Научна Постерна Сесия, ХТМУ, София, 20 Май 2016.
5. Spring Scientific Conference "Science and Education'2016", UCTM, Sofia, 10th March, 2016.
6. XV International Scientific Conference "RE&IT 2016", Smolyan, Bulgaria, 10-11 June 2016.
7. IV e-Poster Научна Сесия за докторанти и млади учени, ФММ, ХТМУ, София, 04 Ноември 2016.
8. 12-та Межд. Научна Конференция Бултриб'16, София, 27-29 Октомври 2016.
9. XIV Научна Постерна Сесия, ХТМУ, София, 18 Май 2017.

Забелязани цитати – 2 броя

- Javorova J., **Mazdrakova A.**, Andonov I., Radulescu A., Analysis of HD Journal Bearings Considering Elastic Deformation and Non-Newtonian Rabinowitsch Fluid Model, Journal Tribology In Industry, Vol. 38, No.2, 2016, 186-196.
 1. Mehala K., Bendaoud N., Youcefi A., Numerical analysis of the non-Newtonian flow performance and thermal effect on a bearing coated with a high tin content, Tribology in Industry, vol. 38, No.4, 2016, pp. 575-584. /SCOPUS/
 2. Novotny P., Mixed Lubrication Solution of Dynamically Loaded Radial Slide Bearings, Tribology in Industry, vol. 39, No.1, 2017, pp. 82-89. /SCOPUS/

Участие в научно-изследователски проекти

1. Яворова Ю. и колектив, ХД смазване на грапави лагерни повърхности с ненютонови смазочни материали, НИС при ХТМУ, дог. № 11358, София, 2014.
2. Яворова Ю. и колектив, Ефекти на ненютоновия смазочен флуид и еластичните деформации при анализа на ХД плъзгащи лагери, НИС при ХТМУ, дог. № 11477, София, 2015.
3. Яворова Ю. и колектив, Влияние на ненютоновите свойства на маслото върху процеса на хидродинамично смазване на плъзгащи лагери, НИС при ХТМУ, дог. № 11558, София, 2016.
4. Яворова Ю. и колектив, Теоретично и експериментално изследване на плъзгащи лагери с антифрикционни покрития, НИС при ХТМУ, дог. № , София, 2017.
5. Javorova J. et al., CEEPUS III, Project: CIII-BG-0703-04-05-1517: Modern Trends in Education and Research on Mechanical systems – Bridging Reliability, Quality and Tribology, 2012-2018.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът изказва искрена благодарност на доц. д-р инж. Юлияна Яворова за нейните напътствия, възискателност, щедра отзивчивост и неоценимата подкрепа като научен ръководител.

Благодарност също на:

- проф. д-р инж. Александру Радулеску за методичните указания и съдействието при експерименталното изследване на смазочните флуиди;
 - проф. д-р инж. Кирил Станулов за оказаните подкрепа и съдействие за подбор на изследваните масла и добавки;
 - доц. д-р инж. Андрей Мирев за идеите и помощта при реализацията на експерименталния стенд;
 - проф. д-р инж. Александър Александров за доверието и насърчението;
- Програма CEEPUS III, Проект CIII-BG-0703-04-1516 „Modern trends in Education and Research on Mechanical Systems – Bridging Reliability, Quality and Tribology” за осигурената възможност за провеждане на експериментална дейност в партньорски университет в чужбина.