УДК 621.891

О.У. Стельмах, С.П. Шимчук, В.А. Радзієвський

ВПЛИВ АГРЕГАТНОГО СТАНУ МАСТИЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПАРАМЕТРИ ТРИБОКОНТАКТУ

В'язкість змащувального середовища необхідно розглядати у контексті умов його перебування в контакті, оскільки градієнтні течії виникають одночасно як у конфузорній, так і в дифузорній зонах. В зв'язку з цим в'язкість використовуваного середовища у відповідних умовах надлишкового чи розрідженого тисків буде різною. Тому ефективність роботи трибосистем доцільно розглядати враховуючи фазово-агрегатний стан робочого змащувального середовища.

Ключові слова: *мастильне середовище, в'язкість, трибоконтакт, трибосистема*

Рис. 5. Літ. 2.

А.У. Стельмах, С.П. Шимчук, В.А. Радзиевский

ВЛИЯНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗОЧНОЙ СРЕДЫ НА ПАРАМЕТРЫ ТРИБОКОНТАКТА

Вязкость смазочной среды необходимо рассматривать в контексте условий ее пребывания в контакте, поскольку градиентные течения возникают одновременно как в конфузорной, так и в диффузорной зонах. В связи с этим вязкость используемой среды в соответствующих условиях избыточного или разреженного давления будет разной. Поэтому эффективность работы трибосистем целесообразно рассматривать учитывая фазово-агрегатное состояние рабочей смазочной среды.

Ключевые слова: *смазочная среда, вязкость, трибоконтакт, трибосистема*

O. Stelmach, S. Shymchuk, V. Radzievskii

INFLUENCE AGGREGATE STATE ENVIRONMENT INTERACTION ON THE PARAMETERS OF THE CONTACT FRICTION

The viscosity of lubricating medium must be considered in the context of the conditions of his stay in contact as gradient flow occur simultaneously both in konfuzorniy and a diffuser zones. In this regard, the viscosity of the medium used in suitable excess pressure or dilute be different. So tribosystems efficiency should be considered given the state of aggregation phase-lubricating working environment.

Keywords: Greasing medium viscosity trybokontakt, trybosystema

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При русі тіла у будь-якому середовищі на нього діють сили опору, котрі перешкоджають переміщенню, вони спрямовані проти руху і прагнуть зупинити тіло. Що щільніше середовище, то вища сила опору. Наприклад, опір повітря польоту снаряда на порядок менший, ніж опір води на переміщення того самого снаряда за тих самих стартових умов. І, навпаки, у разі зменшення щільності середовища, наприклад, шляхом його розрідження, опір руху тіла буде зменшуватись. Так, за практичної відсутності речовини в умовах космічного вакууму на висоті 2000 км від Землі штучний супутник може обертатись, не сходячи зі своєї орбіти, 1500 років.

Таким чином, будь-яке переміщення тіла у середовищі завжди супроводжується опором і виникненням сил, що діють на це тіло, котрі пов'язують із тертям молекул середовища з приповерхневими молекулярними шарами, адсорбованими на поверхні тіла, і подальшим спільним рухом. Ці сили у загальному розумінні, називають силами тертя. Це означає, що в нормальних атмосферних умовах відсутність підшипника в трибосистемі ковзання, тобто лише обертання вала в змащувальному середовищі, буде супроводжуватись виникненням тертя пристінних шарів мастила з іншими його шарами, в яких швидкість зменшується у міру віддалення від поверхні, що рухається. Такий опір об'єктивно відбувається в усіх трибосистемах і по суті є гідромеханічним в'язкісним тертям [1]. Однак трибологія його не розглядає, вважаючи несуттєвим порівняно із силами тертя, що виникають у контакті рухомої поверхні того самого вала по поверхні іншого тіла, наприклад, радіального підшипника.

У будь-якій трибосистемі одна або більше деталей рухаються у визначеному середовищі, яке чинить опір переміщенню навіть без безпосереднього контакту з іншою поверхнею. На рис. 1 схематично показано виникнення гідродинамічних дотичних сил тертя за значного віддалення поверхні вала 1 від іншої нерухомої поверхні 2 у змащувальному середовищі 3.

© О.У. Стельмах, С.П. Шимчук, В.А. Радзієвський

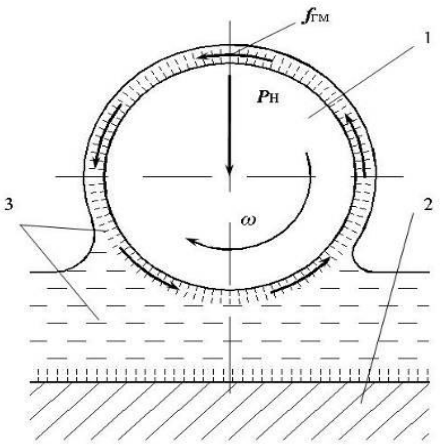


Рис. 1. **Схема виникнення гідромеханічних сил тертя**

У трибології цими силами опору руху нехтують, що не зовсім коректно. Наприклад, у коробках передач легкових автомобілів, у випадку короткочасних або тривалих зупинок, коли двигун автомобіля працює, тяговий вал із роздавальними шестернями постійно обертається в середовищі трансмісійного масла. Природно, енергія витрачається на механічне перемішування середовища, наприклад, високов'язкого масла ТАД-17и, кінематична в'язкість якого за робочої температури 70^{o}С складає приблизно 50 сСт. Це означає, що суттєва частина палива витрачається просто на постійне перемішування масла і подолання опору в'язкого середовища обертанню у ньому тягового вала із шестернями.

Відомо, що у разі надходження 25% корисної потужності автомобіля від двигуна до трансмісії, без урахування втрат на тертя у коробці передач, тяжному мосту та в інших агрегатах загальної системи механічної передачі, ця потужність, що передається колесам для безпосереднього руху автомобіля, зменшується до 12% [2]. При цьому істотна доля втрат (близько 10%) виникає в результаті тертя тягового вала коробки передач, що постійно обертається як під час руху, так і під час зупинки автомобіля. У зв'язку з цим до трансмісійних масел, на нашу думку, ставлять суперечливі вимоги. Для забезпечення холодного пуску трансмісій за низьких температур і мінімуму втрат енергії на подолання тертя в передачах в'язкість масла має бути мінімальною, а для забезпечення високої несучої здатності масляної плівки і для зниження витоків через ущільнення та герметизуючі пристрої – максимальною.

Тому використання малов’язких замість високов’язких трансмісійних масел у трансмісіях наземного транспорту (у коробках передач, тяжних мостах та ін.) актуально, особливо в умовах інтенсивності сучасного міського циклу. Однак зниження в'язкості масла в коробках передач пов'язано із виникненням цілої низки проблем: збільшується інтенсивність зношування робочих поверхонь шестерень, підшипників та інших деталей, що супроводжується збільшенням шуму, вібрації, зниженням надійності, довговічності й ресурсу трансмісії.

Таким чином, гідромеханічні втрати від тертя рухомих деталей у рідких середовищах, особливо в'язких, що характерно для техніки у цілому, необхідно розглядати як одну з причин істотної перевитрати енергії. На транспорті це призводить до цілком невиправданих додаткових витрат палива і забруднення навколишнього середовища у вигляді додаткових викидів вихлопних газів. Тому зниження в'язкості робочих середовищ у техніці є актуальним завданням, вирішення якого може стати досить перспективним джерелом економії паливно-енергетичних ресурсів і шляхом можливого вирішення цього завдання є дослідження агрегатного стану робочих середовищ при різних режимах та умовах тертя.

Постановка завдання. Дослідити вплив фазово-агрегатного стану робочого змащувального середовища на параметри трибоконтакту.

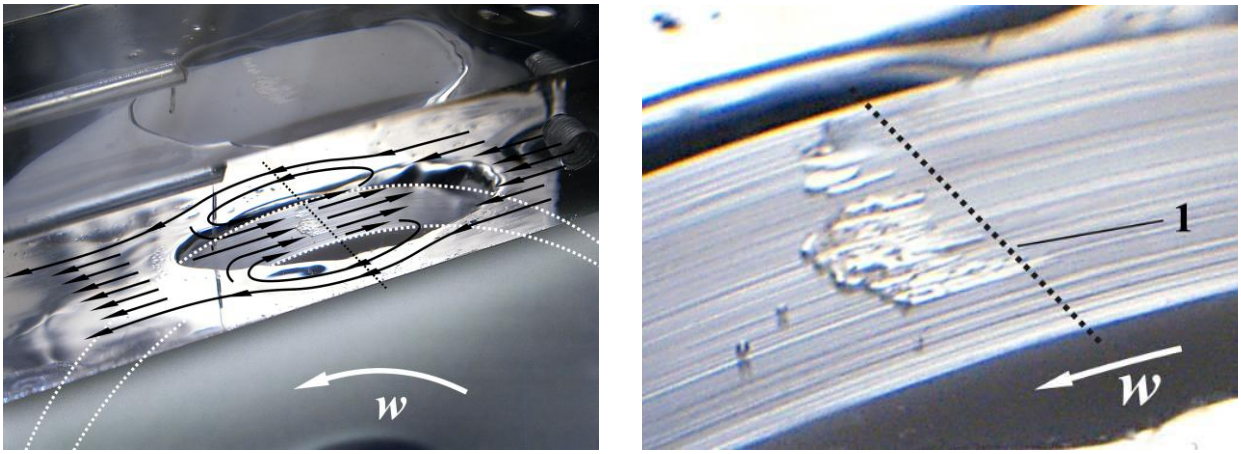
Методика дослідження. Зменшення трибоадгезійного зношування – комплексне і багатогранне завдання, яке вирішується індивідуально для кожного типу виробів. Тому виникає нагальна потреба у створенні коректних лабораторних приладів та експрес-методів високовідтворюваної оцінки протизносних і антифрикційних характеристик усіх елементів трибосистем. При цьому фізична лабораторна модель фрикційної взаємодії має бути максимально простою, з одного боку, а її макро-, мікро- та наногеометричні й кінематичні параметри в контакті мають бути чітко визначеними, строго контрольованими і легко керованими. Вимірювання

© О.У. Стельмах, С.П. Шимчук, В.А. Радзієвський

найбільш важливого параметра трибосистеми – сумарної сили тертя, що виникає на одному або декількох фрикційних контактах моделі, не мають впливати на умови контактування. Безліч різноманітних процесів, які в сукупності зумовлюють сумарний опір відносному переміщенню під час тертя, відображає один-єдиний силовий параметр трибосистеми – лабораторно вимірювана величина сили тертя. Сумарна сила тертя є результативним відгуком різноманітних контактних процесів, зокрема й руйнування робочих поверхонь, та фактором, що породжує умови для зношування.

Досліди проводились на лабораторному приладі АСБ-01 у робочому середовищі авіагасу ТС-1. Шляхом вмикання електроприводу задавалось обертання ролика і його твірна починала здійснювати тертя ковзання по нижній плоскій грані прозорого паралелепіпеда в перпендикулярному лінійному контакту напрямку. Спостереження за гасом, що вноситься роликом у контакт, при певному освітленні дозволило виявити цілком організовану й закономірну його поведінку при спостереженні одночасно у двох видах: через бокову і верхню грані прозорого паралелепіпеда (рис. 2). Захоплювані роликом достатньо товсті шари гасу вносились у зону контакту, а по його краях починалось обтікання перешкоди, якою є сам контакт; потім по поверхні нерухомої призми ці відносно товсті потоки замикалися за контактом. При цьому одночасно спостерігалось зміщення усієї плями змочування в бік, зворотний напрямку тертя. Після встановлення постійної швидкості обертання, при підсвічуванні зони контакту під визначеним кутом, спостерігалась досить інтенсивна безперервна струминна течія гасу на вході ролика в контакт у місці перетину з нижньою поверхнею паралелепіпеда в зворотному напрямку обертання. На виході робочої поверхні ролика з контакту візуально спостерігалась також інтенсивна і безперервна течія гасу із змочуваного об’єму на поверхні призми у контакт, тобто також у зворотному ковзанню напрямку. Лінії руху гасу при ковзанні показані на рис. 2, а.

Збільшення швидкості ковзання ролика по поверхні призми приводило до більшого зміщення контактної плями гасу в бік, зворотний напрямку обертання. При цьому наочно спостережувані неоднорідності течії гасу «з контакту» в зоні входу ролика у контакт і «у контакт» в зоні його виходу з контакту ставали більш інтенсивними. Те саме відбувалось і при збільшенні навантаження при постійній швидкості.



а) б)

Рис. 2. **Лінії руху ТС-1 у контактній зоні при терті ковзання ролика по плоскій грані паралелепіпеда (а) і утворення кавітаційних порожнин і пухирів у дифузорній зоні лінійного контакту (б) (1 – середня лінія контакту поверхонь)**

При плавному збільшенні швидкості ковзання до 0,3 м/с у зоні виходу ролика з контакту в шарах гасу спостерігалась поява газових пухирців, котрі рухались у напрямку ковзання, виносились із рухомою поверхнею твірної циліндр ролика, на відстань близько 5 мм від контакту й зникали. Рух утворюваних газових пухирців (рис. 2, б) біля контакту відбувався проти струминної течії гасу, спрямованого «у контакт» проти руху ролика. Ці пухирці виникали безладно по всій ширині лінійного контакту і свідчили про кавітацію. Подальше збільшення швидкості ковзання приводило до підвищення кількості цих пухирців та інтенсивності їх виникнення, а згодом до злиття й утворення парогазових порожнин витягнутої форми, схожих на

язики полум'я (рис. 2), з основою біля середини контакту, що осцилюють у напрямку ковзання в зоні виходу ролика з контакту.

При зміні напрямку ковзання спостережувані гідравлічні течії гасу в контакті також змінювали свій напрямок у протилежний тертю бік – «з контакту» в зоні входу ролика в контакт із поверхнею паралелепіпеда і «у контакт» – в зоні виходу поверхні тертя ролика з нього. Тобто, зміна напрямку ковзання приводила до цілком симетричної зміни напрямків контактних течій середовища.

Таким чином, на вищезгаданій лабораторній машині тертя візуально спостерігається закономірне виникнення зворотних напрямку тертя ковзання течій гасу у навколоконтактній зоні. Джерелом таких течій слугують певні фізичні процеси, що виникають у контакті при терті.

Аналогічні впорядковані течії у контакті модельного підшипника ковзання на приладі тертя АСБ-01 (з верхнім положенням вала) спостерігались у всіх досліджуваних рідинах технічного призначення (моторні, трансмісійні, гідравлічні, вакуумні та ін. масла), у воді, гліцерині та ін., відбувались якісно однаково, з різницею лише в інтенсивності.

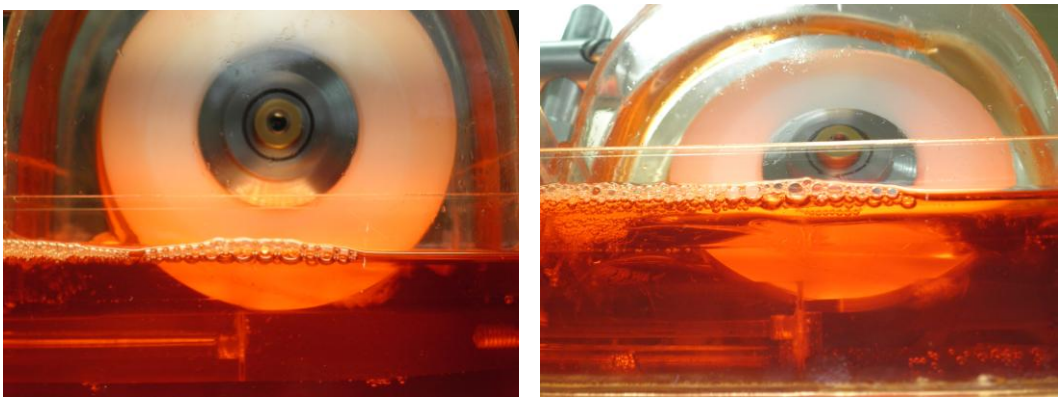
Щоб переконатись у справедливості візуальних спостережень, за рухом змащувальних шарів ми провели ряд досліджень з тонкими шовковими нитками. У зони контакту при терті ковзання у середовищі авіагасу ТС-1 заводилась нитка чорного кольору. За напрямком обертання робочої поверхні модельного вала разом зі змащувальними шарами нитка рухалась в напрямку ковзання, але перед самим контактом вона виштовхувалася з великою швидкістю. Численні спроби завести нитку в контакт з поверхнею вала в зону його входу були марними – нитка виштовхувалась. У зону виходу вала з контакту завести нитку складно: вона захоплювалась рідиною, що рухалась разом із валом з контакту, але на відстані близько 7 мм стрімко змінювала напрямок у бік, протилежний руху вала, та втягувалась у контакт. Таким чином, при терті ковзання вторинні течії змащувальних шарів, що спрямовані в зворотному руху напрямку (течія з контакту – «на вході» вала в контакт та течія середовища з об’єму в контакт в зоні «виходу» з нього), виникають достовірно. Ці течії є наслідком певних динамічних процесів, що відбуваються в змащувальних шарах трибоконтакту, а їх дослідження дозволить розширити знання про механізми тертя та зношування.

Завдяки прозорості ванночок, виникнення вторинних, зворотних напрямку руху модельного вала течій, спостерігається також при терті ковзання з нижнім розташуванням контакту і його повним зануренням у рідину, наприклад у гідравлічну рідину АМГ-10 (рис. 3). Тут при збільшенні частоти обертання вала близько 200 $хв^{-1}$, сталому радіальному навантаженні 2 Н в зоні входу вала в контакт спостерігається зародження й виникнення турбулентності. Це свідчить про прискорення з конфузорної зони контакту вторинної течії, викликаної збільшенням швидкості змащувальних шарів, що набігають у контакт. В зоні виходу вала з контакту при перших його обертах утворюється повітряний міхур, котрий збільшується у розмірах при збільшенні швидкості. Туди з об’єму втягуються мікропухирці та мікрозабруднення середовища, а при підвищенні швидкості їх рух прискорюється, що спостерігається візуально.

При збільшенні навантаження на лінійний контакт вторинні течії також прискорюються, що свідчить про підвищення рівня стиску в ньому та певного розподілу тиску у дифузорній та конфузорній зонах контакту.

Для визначення швидкості зворотних течій у конфузорній зоні модельного плоского підшипника було проведено прискорену відеозйомку руху маркерів високодисперсної алюмінієвої пудри. Частинки пудри (маркери) у вигляді концентрату вводились на змочену маслом верхню нерухому поверхню модельного вала. Після початку руху вала при сталій частоті обертання маркери разом із поверхнею тертя надходили у конфузорну зону контакту, та на відстані близько 2 мм від контакту з модельним пласким підшипником стрімко змінювали напрям руху у протилежний бік. Аналіз відеозйомок виконувався шляхом визначення швидкості маркерів з урахуванням швидкості зйомок та частоти обертання вала.

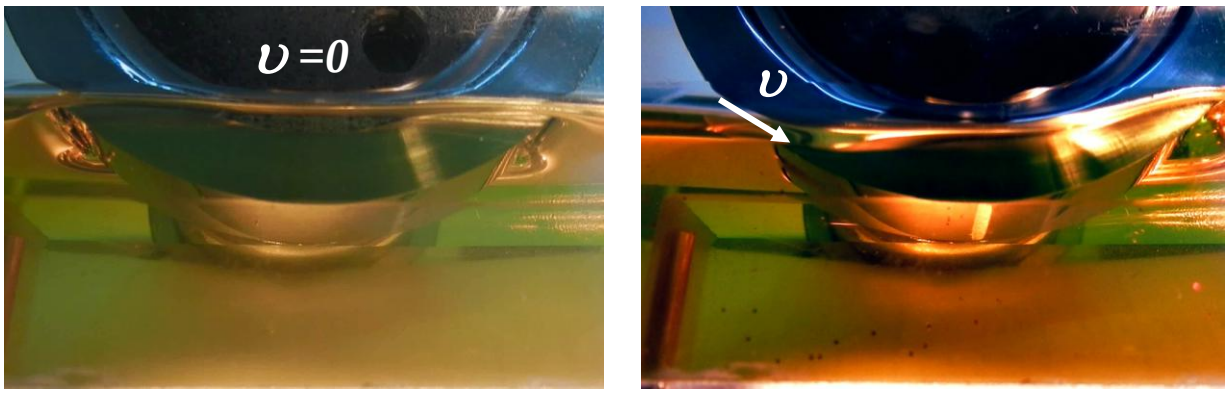
© О.У. Стельмах, С.П. Шимчук, В.А. Радзієвський



а) б)

Рис. 3. **Виникнення зворотних течій у контактній зоні в гідравлічній рідині АМГ-10 (турбулентність «на вході вала в контакт» та втягування пухирців контакту – «на виході з контакту» у повітряний міхур)**

Спостереження за рухом маркерів у динаміці (рис. 4) свідчить про виникнення зворотних течій, котрі гальмують змащувальні шари, що набігають з поверхнею вала, і на достатньо великій відстані від самого контакту виштовхують фрагменти металевої пудри у напрямку, зворотному руху вала. При контактному навантаженні 4 Н у маслі ІПМ-10 при терті ковзання стального вала HRC 59…63 та R_a < 20 нм по плоскому кварцовому полірованому модельному підшипнику, що рухається зі швидкістю 0,5 м/с, максимальна швидкість зворотної течії становила 23,5 м/с.



Нерухомий контакт Початок руху з прискоренням до швидкості 0,5 м/с

Рис. 4. **Вибіркові фотографії контактної зони, де показано динаміку руху маркерів та утворення мікропухирців**

Виходячи з гіпотези про динамічні процеси у змащувальних шарах, процеси, що відбуваються в еластогідродинамічному контакті, є більш складними (рис. 5). При русі нижньої плоскої поверхні зі швидкістю V в конфузорній зоні трибоконтакту через набіжний потік змащувальних шарів виникають вторинні, зворотні руху, течії змащувального середовища (показано стрілками). У дифузорній зоні, що розширюється, при певних швидкостях виникає масло-пароповітряна фаза мастила (зміна агрегатного стану) і вторинні, зворотні руху, течії із середовища у контакт. Це відбувається відповідно до експериментально-спостережуваної закономірності розподілу тиску в змащувальнім шарі $P_м$, котрий в конфузорній зоні вищий, а в дифузорній нижчий, ніж тиск навколишнього середовища. При цьому тиски, які виникають на поверхні нерухомого криволінійного трибоелемента P_Σ, являють собою суму герцівських напружень $\sigma_г$ і тиску в змащувальнім шарі $P_м$, а контактні напруження $\sigma_к$ слід розглядати, як різницю герцівських напружень $\sigma_г$ і тиску в змащувальнім шарі $P_м$. При цьому під терміном

«контактні напруження», слід розуміти ті напруження, котрі виникають лише в зоні розрідження, тобто в дифузорній частині контакту, оскільки в конфузорній – поверхні розсуваються змащувальними шарами з високим тиском.

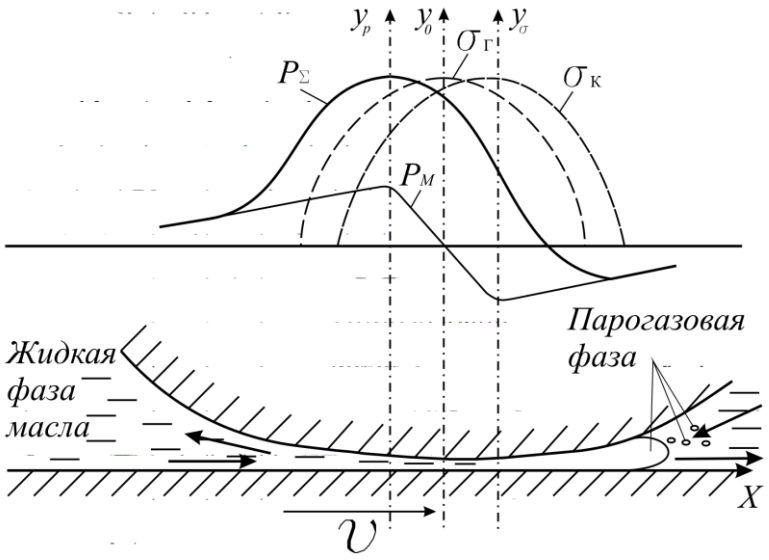


Рис. 5. **Схема контактно-гідродинамічних процесів з позицій адгезійно-гідродинамічної моделі тертя та зношування [3]**

Висновки. Як показали вищенаведені експериментальні дослідження, в умовах збудження фрагментів середовища відносним рухом поверхонь твердих тіл з адсорбованими змащувальними шарами, зокрема тертям, під дією виниклих градієнтів тисків змащувальні шари рухаються в зворотному напрямку. Тому, в'язкість змащувального середовища необхідно розглядати у контексті умов його перебування в контакті, а саме: оскільки градієнтні течії виникають одночасно як у конфузорній, так і в дифузорній зонах, то і в'язкість у відповідних умовах надлишкового і розрідженого тисків буде різною. Сила внутрішнього тертя, відповідно, також має містити в собі дві складові: конфузорну і дифузорну. Тобто, для більш повного описання рідин, газів або гетерогенних середовищ видається доцільним запровадити деякий критерій «еластичність». Цей коефіцієнт пропорційності сил внутрішнього тертя, або еластичності, також буде мати дві компоненти: конфузорну, яка, ймовірно, відповідає сучасним коефіцієнтам динамічної й кінематичної в'язкості, та коефіцієнт пропорційності при розрідженні. Такий коефіцієнт еластичності має відображати властивість рідини, зберігати пружні властивості як в умовах стиску, так і розтягу, які визначаються умовами тертя.

Література.

1. . Гидродинамическая теория смазки / под. ред. и с доп. статьями проф. Лейбензона Л. В. – М. ; Л. : Гос. техн.-теорет. изд-во, 1934. – 550 с.

2. Стельмах О. У. Об'ємна конфігурація мікрогеометрії поверхонь тертя – один з основних факторів ефективності трибосистем / О. У. Стельмах, О. Ю. Сидоренко, Р. Є. Костюнік // Вісник НАУ. – 2002. – № 1. – С. 174–177.

3. Дерягин Б. В. Ориентационно упорядоченные слои предельных углеводородов и их производных на поверхности кварца / Б. В. Дерягин, Б. А. Алтоиз, В. М. Поповский // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 317, № 1. – С. 130–134.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2016.

© О.У. Стельмах, С.П. Шимчук, В.А. Радзієвський