

УДК 621.891

**О.У. Стельмах, С.П. Шимчук, В.А. Радзієвський, Р.Є. Костюнік, К.К. Бадір**  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТЕЧІЙ ГРАНИЧНИХ**  
**ШАРІВ АВІАГАСУ ТА ОЛИВ В ТРИБОКОНТАКТІ КОВЗАННЯ**

*Наведено результати експериментальних досліджень динаміки граничних шарів авіагасу та мастильних матеріалів в трибоконтаті ковзання. Підтверджено гіпотезу компресійно-вакуумної природи тертя та зношування, яка дозволяє по-новому підійти до розв'язання задач трибології в умовах граничного змащування контакту ковзання*

*Ключові слова: авіагас, мастильні матеріали, трибоконтат ковзання, змащення*

**O. Stelmakh, S. Shymchuk, V. Radziyevskiy, R. Kostyunik, K. Badir**  
**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE DYNAMICS OF THE FLOWS OF THE**  
**BOUNDARY LAYERS OF AVIATION KEROSENE AND OILS IN THE TRIBO-CONTACT OF**  
**SLIDING**

*The results of experimental researches of the action of lubricants boundary layers in the friction contact are presented. These results confirmed the hypothesis of the compression-vacuum nature of a friction and wear processes. As well it allows to make the new decisions in the tribology problems of friction contact*

*Key words: air gap, lubricants, tribo contact, lubrication*

**А.У. Сметанкин, С.П. Шимчук, В.А. Радзиевский, Р.Е. Костюник, К.К. Бадир**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЙ ГРАНИЧНЫХ**  
**СЛОЕВ АВИАКЕРОСИНА И МАСЕЛ В ТРИБОКОНТАКТЕ СКОЛЬЖЕНИЯ**

*Приведены результаты экспериментальных исследований динамики граничных слоев авиационного керосина и смазочных материалов в трибоконтатте скольжения. Подтверждена гипотеза компрессионно-вакуумной природы трения и изнашивания, которая позволяет по-новому подходить к решению актуальных проблем трибологии в условиях граничной смазки контактов скольжения*

*Ключевые слова: авиакеросин, смазочные материалы, трибоконтатт скольжения, смазки*

Основу трьох базових розділів сучасної трибології складають наступні постулати й уявлення про природу тертя [1-7] та класифікація:

1. Безконтактне та практично безносне гідродинамічне тертя в підшипниках ковзання описується відомою теорією змащування [1-3]. Для такого режиму характерні значення коефіцієнтів тертя ковзання 0,010-0,001, а іноді й 0,0001. При цьому сила тертя в парі «вал-підшипник» визначається залежністю

$$F = \frac{\eta v S}{\varepsilon + \frac{\eta}{\lambda_1} + \frac{\eta}{\lambda_2}}, \quad (1)$$

де  $\eta$  – в'язкість змащувального середовища;  $v$  – лінійна швидкість обертання валу;  $S$  – площа поверхні тертя;  $\varepsilon$  – зазор між валом і підшипником,  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – коефіцієнти зовнішнього тертя. Припускаючи, що коефіцієнти зовнішнього тертя на границях «змащувальна плівка - поверхні валу і підшипника» значно більше  $\eta$ , залежність (1) приймає вигляд:

$$F = \frac{\eta v S}{\varepsilon}, \quad (2)$$

Вираз (2) широко використовується в розрахунках підшипників ковзання при великих швидкостях і малих навантаженнях.

У виразі (2) не враховується осьове навантаження, а також вплив контактних течій граничних шарів, викликаних градієнтами тисків у контакті. При збільшенні сили стиснення поверхонь трибосистема переходить у більш навантажений режим контактної-гідродинамічного тертя.

2. Контактне і теоретично безносне еластогідродинамічне тертя пояснюють із позицій контактної гідродинаміки [4-6] на основі спільного розв'язку гідродинамічної та пружно-деформаційної задач взаємодії середовища і поверхонь трибоконтатту. Відомі залежності для оцінки сили тертя та інших параметрів трибосистем. Зауважимо, що коефіцієнт тертя в реальних трибосистемах на один-два порядки є більшим від розрахункових, а його значення досягає 0,01-0,10, що характерно для ще більш навантаженого режиму - тертя в умовах граничного

змащування. При цьому поверхні, хоча й з дуже малою інтенсивністю, але зношуються, особливо в пуско-зупиночних циклах експлуатації вузлів.

3. Тертя в умовах граничного змащування, що супроводжується інтенсивним зношуванням поверхонь, добре аргументоване адгезійно-деформаційною теорією [7-8], у відповідності з якою макросилу тертя ( $F_{mp}$ ) утворюють механічна або деформаційна ( $F_{деф}$ ) і молекулярна або адгезійна ( $F_{адг}$ ) компоненти:

$$F_{mp} = F_{деф} + F_{адг} \quad (3)$$

Дослідження співвідношення адгезійної й деформаційної складових сили тертя показали, що в умовах граничного змащування відношення  $F_{адг} / F_{деф}$  досягає 10000 [7], а за даними [8]  $\sim 100$ . Тому вважають, що домінуючим при терті в умовах граничного змащування є взаємодія робочих поверхонь на молекулярному рівні. Зношування матеріалу поверхонь тертя, як відомо, є наслідком їх адгезійної взаємодії (утворення та руйнування «містків зварювання» [8]). Тертя в умовах граничного змащування може розглядатись, як процес трибоадгезії. При цьому контактні гідродинамічні течії граничних шарів мастила, які можуть призводити до додаткового опору руху, не враховують. Припускають, що граничні шари мастила між стисненими поверхнями твердих тіл утворюють деяке «третє тіло», що має властивості склоподібного композиту [6, 7].

Фундаментальні дослідження пристінних шарів змащувального середовища [9] доводять, що вони являються гомеотропними епітропними рідинно-кристалічними (ЕРК) шарами мастила. Експериментальні дані про ЕРК - шари ряду рідин [10] показують, що їх в'язкість перевищує об'ємну, а рівноважна товщина складає від 20 нм до мікрометрів.

Аналізуючи сучасний стан трибології, автор роботи [11] підкреслює, що «через складність процесів, що формують тертя, в наш час нема поки єдиної думки про його природу». На сьогодні тертя і зношування розглядаються з позицій розрізнених уявлень про їх природу.

Теоретичні розробки в трибології, результати яких могли б стати загальними положеннями, поки що відсутні, а нові експериментальні дослідження дають результати [12], які у ряді випадків не мають пояснень з позицій відомих теорій. Так, при терті ковзання поверхонь твердих тіл трибосистем з лінійним контактом не знаходить пояснення утворення слідів трибоадгезії матеріалу у вигляді виривів, каверн і кратерів, які, як правило, спостерігаються у підшипниках або зразках в області виходу валу з контакту, а в області його входу в контакт утворюються лише риси чи подряпини. При цьому не знаходить пояснення накопичення продуктів зношування в основному в області входу валу в контакт на незначній відстані від нього.

Існує наступне протиріччя. При короткочасному терті ковзання полірованих сталевих поверхонь коефіцієнт тертя досягає значень 0,15, що свідчить про виникнення в контактній адгезійній складовій сили тертя, яка, за молекулярно-деформаційною теорією, на два порядки більша інших чинників, а основний її прояв – зношування практично відсутнє. При цьому не виявляються навіть ознаки пошкодження поверхонь тертя. Отже, твердження, що адгезійна складова макросили тертя є переважаючою (99% від усіх втрат на тертя в умовах граничного змащування), викликає сумнів.

Гідродинамічний ефект при терті в підшипниках ковзання й фундаментальна в трибології граничного змащування закономірність утворення оптимальної шорсткості також трактується по-різному.

Результати експериментів і теоретичних побудов в межах сучасної трибології не співпадають. Продовжується розробка нових гіпотез і положень, покликаних усунути недосконалість існуючих уявлень про природу тертя.

В науково-дослідній лабораторії нанотриботехнологій Національного авіаційного університету під керівництвом чл.-кор. НАН України, д.т.н., професора Аксьонова О.Ф. з метою вивчення природи тертя проводяться дослідження трибосистем в умовах граничного змащування, а також явищ і закономірностей, супутніх тертю.

Висунута у 2008 році гіпотеза компресійно-вакуумної природи тертя [12, 13], знайшла експериментальне підтвердження, однак вимагає більш глибокого вивчення. Для цього були розроблені та використані оригінальні лабораторні машини тертя одностороннього ковзання з оптично прозорим лінійним контактом (рис. 1). У них передбачена можливість зміни швидкості ковзання і осьового навантаження поверхонь тертя, що дозволяє реалізувати гідро- та еластогідродинамічний режими і тертя в умовах граничного змащування).

**Конструкція стенда.** В якості моделі вала використано фторопластовий ролик (зовнішній діаметр – 80 мм, ширина – 9 мм), а плоский нерухомий паралелепіпед, що моделює контртіло, виготовлено з оптично прозорого матеріалу (неорієнтоване органічне скло).

У середовищі атмосферного повітря робоча поверхня, утворююча циліндр ролика, при стисненні вступає в контакт із плоскою поверхнею прозорого паралелепіпеда, що візуалізує площадку контакту. Протяжність такого контакту відповідає ширині ролика 9 мм, а його ширина при осевій силі стиснення 4 Н складає 0,7 мм, і при 40 Н  $\sim$  0,8 мм.

В якості основного модельного змащувального середовища використовувався авіаційний гас ТС-1 - прозора, малов'язка рідина, що виключає при малих швидкостях ковзання (0,2...0,8 м/с) і

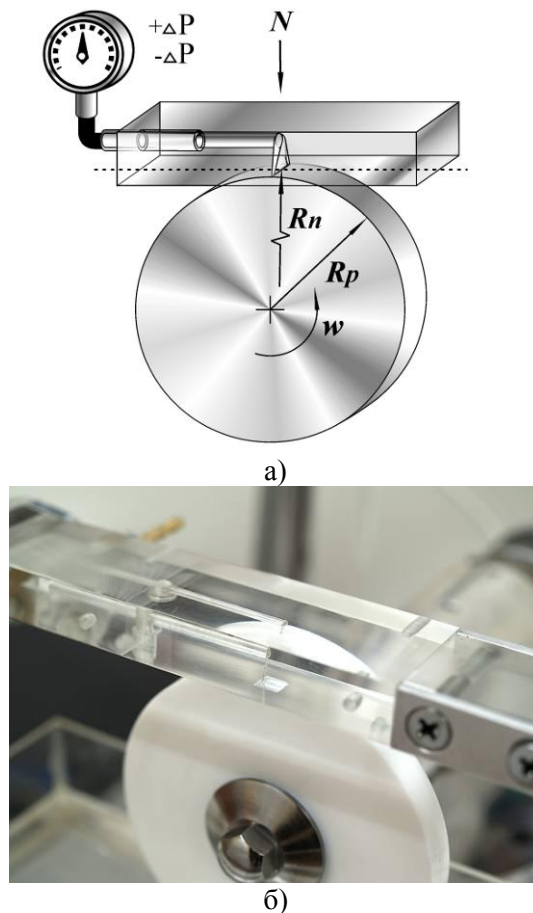


Рис. 1. Машина тертя ковзання з верхнім положенням контакту: схема (а); трибовузол (б) малих навантажень (1...10 Н) виникнення режиму гідродинамічного безконтактного тертя

Лінійна швидкість ковзання варіювалася з плавною зміною від 0,2 до 0,9 м/с, осьове навантаження змінювалось в діапазоні від 4 до 200 Н. Після установа лінійного контакту навколо нього утворювалась симетрична відносно лінії контакту пляма гасу за рахунок змочування ним поверхонь (рис. 1).

У попередніх експериментах [12] шорсткість робочої поверхні ролика приймалась  $R_a < 20$  нм. У подальших дослідженнях [13] використовувались зразки з великими нерівностями ( $R_a < 0,8$  мкм).

**Візуалізація процесів у контактній зоні.** Спостереження за поведінкою шарів гасу, внесених роликом у зону контакту, при терті повз нижню грань прозорого контртіла, здійснювалось через його бокову й верхню грані при певному освітленні (рис. 2).

Як видно з рис. 2, шари гасу захоплюються роликом у зону контакту й частково обтікають її по краях. На поверхні контртіла макропоточки замикаються за контактом. При цьому уся пляма змочування зміщується в сторону, зворотну напрямку ковзання. Після стабілізації швидкості обертання, при підсвічуванні зони контакту під певним кутом, спостерігається безперервне інтенсивне струминне витікання гасу із зони контакту в напрямку, зворотному обертанню.

На виході ролика з контакту візуально спостерігається неперервна інтенсивна течія гасу в напрямку контакту, тобто також у напрямку, зворотному ковзанню. Лінії току гасу, спостережувані при ковзанні, показані на рис. 2, а.

Збільшення швидкості ковзання ролика по поверхні паралелепіпеда призводить до значного зсуву контактної плями гасу в сторону, зворотну напрямку обертання. Спостережувані при цьому

неоднорідності течії гасу «з контакту» в області входу ролика в контакт і «в контакт» в області виходу ролика з контакту стають більш помітними. Те саме відбувається й при збільшенні навантаження при постійній швидкості ковзання.

При плавному підвищенні швидкості ковзання до 0,3 м/с у зоні виходу ролика з контакту в шарах гасу спостерігається зародження газових пухирців, які, переміщаючись у напрямку ковзання, вносились рухомою поверхнею ролика на відстань 5 мм від контактної ділянки й потім зникали. Рух утворених газових пухирців (рис. 2, б) біля контакту здійснювався в напрямку ковзання, але проти струминної течії гасу, направленої зворотно - «в контакт». Пухирці зароджуються хаотично по усій ширині лінійного контакту в системі «ролик-контртіло» внаслідок кавітації гасу. Для гасу ТС-1 при температурі 20 °С тиск пари, що знаходиться в стані динамічної рівноваги з рідкою фазою, складає 919,9 Па при відношенні об'єму рідини до об'єму пари 4:1. Розрідження в зоні виходу ролика з контакту, уже при швидкості 0,3 м/с та осьовому навантаженні 4 Н, суттєво і в цій області відбувається вакуумування граничних шарів до тиску 919,9 Па. Подальше збільшення швидкості ковзання призводить до інтенсифікації формування пухирців, наступному їх злиттю і виникненню парогазових порожнин. Останні, осцилюючи у напрямку ковзання, мають витягнуту форму, схожу на «язики полум'я» (рис. 2, б) з основою біля середини області контакту.

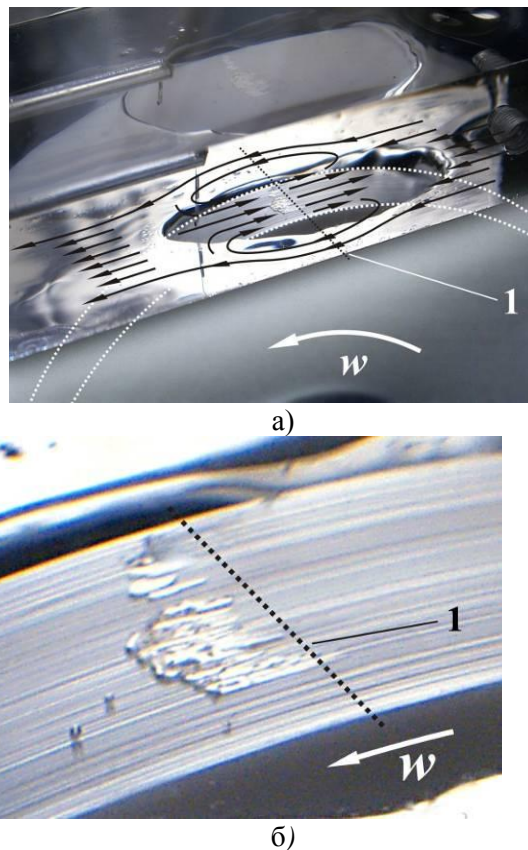


Рис.2. Лінії току рідини в контактній зоні при терті ковзання ролика по плоскій грані контртіла (а) і утворення кавітаційних порожнин і пухирців в дифузійній області лінійного контакту «ролик-контртіло» (б) (1 – середня лінія контакту поверхонь).

При зміні напрямку ковзання потоки гасу в зоні контакту також змінюють свій напрямок у протилежну ковзанню сторону. Зміна напрямку ковзання зумовлює практично симетричну зміну напрямку контактних течій середовища.

**Визначення розподілу тиску в контакті.** Для дослідження розподілу тиску в контактній області у контртілі створено канали з виходом на контактуючій поверхні у вигляді отворів або щілини, що є зондом вимірника тиску в змащувальному шарі. Передбачено сканування контакту відповідним зондом.

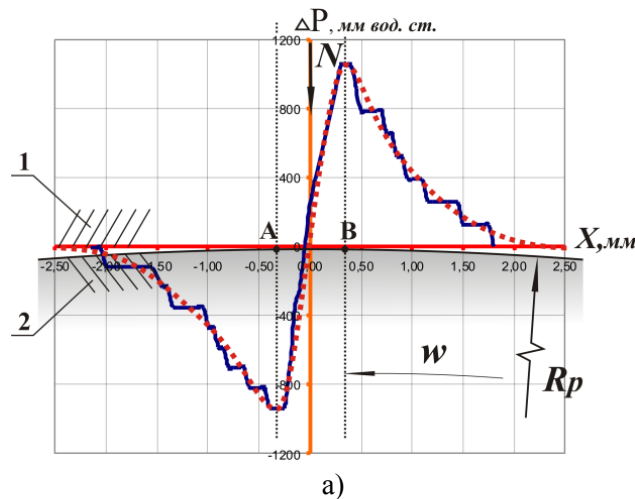
Вимірювання тиску в шарі гасу здійснювалось у середній частині контактної зони по нормалі до його середньої лінії за допомогою резистивних датчиків тиску МДД-ТЕ 0-1. Шаг зондування в площині контактної зони – 0,05 мм.

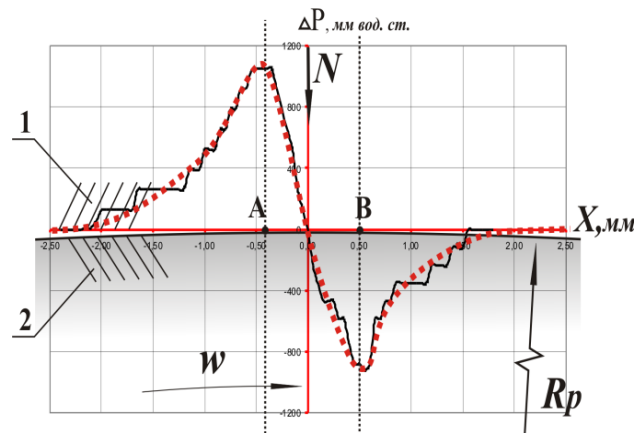
Результати вимірювань (рис.3 а) показали, що тиск гасу в області входу ролика в контакт починає зростати за 2 мм до початку контакту контртіла з роликом. Біля передньої кромки контакту на вході, досягнувши максимуму більше 1000 мм водного стовпа, тиск стрімко падає й поблизу середини контакту знижується до атмосферного. Далі в зоні виходу ролика з контакту має місце розрідження з екстремальним тиском нижче атмосферного (близько 1000 мм водного стовпа), а також на самому краю контакту, в області виходу ролика. На відстані близько 2 мм від контакту тиск гасу плавно підвищується і вирівнюється до атмосферного.

Аналогічні вимірювання, проведені при інших рівних умовах, але в протилежному напрямку ковзання (рис. 3, б), дають практично симетричну інверсію параметрів, що свідчить про закономірний зв'язок контактних течій граничних шарів з напрямком ковзання. Тобто, на вході в контакт відбувалося підвищення тиску гасу, а на виході з нього – зниження відносно атмосферного.

Зміна напрямку ковзання, при інших однакових умовах, супроводжується зміною знаку перепаду тиску граничних шарів гасу  $\Delta P$ , який за величиною практично не змінюється відносно середини контакту системи «ролик-контртіло» (рис. 3,б). Візуально спостережувані лінії току також змінюють свої напрямки в протилежну сторону. В області входу ролика в контакт з контртілом тиск гасу збільшується і біля самої кромки контакту досягає свого максимуму, а в середній частині - різко зменшується до атмосферного. Потім, в області виходу ролика з контакту, також стрибкоподібно відбувається зниження тиску сканованих шарів гасу до мінімуму, і також, по мірі віддалення зонду від нього, починається плавне підвищення вимірюваного тиску до тиску навколишнього середовища.

Показане вище зниження тиску середовища, що відбувається в дифузійній області контакту трибосистеми ковзання, може досягати значень тиску насиченої пари, що приведе до часткової або повної деструкції граничних шарів мастила в пристінних граничних шарах. Така деструкція граничних шарів в умовах сильного зниження тиску в них, імовірно, і є основною причиною утворення ділянок практично сухого тертя, що призводить до виникнення «містків схоплювання» поверхонь тертя. Можна припустити, що молекулярна або адгезійна складова сили тертя (99% від сумарної сили тертя), виникаюча на трибоконтаті з граничним змащуванням, є наслідком зниження тиску середовища між поверхнями, що рухаються у напрямку дифузійної частини контактної зони. При виключенні зниження тиску середовища між поверхнями тертя в умовах граничного змащування трибосистема ковзання стає практично беззною.





б)

**Рис. 3. Розподіл перепаду тиску в граничних шарах гасу ТС-1 відносно атмосферного  $\Delta P$ , тобто різниця між вимірним і атмосферним тиском по координаті сканування  $X$  перпендикулярно контакту при ковзанні де  $[AB]$  – ширина лінійного контакту контртіла 1 і ролика 2 із радіусом  $R_p$ ,  $\omega$  - частота обертання,  $N$  – осьова сила стиснення,  $X$  – координати сканування: а) обертання за часовою стрілкою; б) обертання проти часової стрілки**

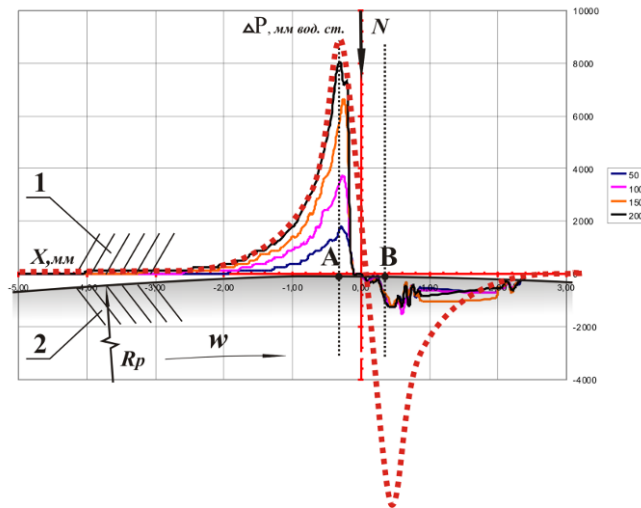
Слід відзначити, що спостережувані течії мастила і розподіл тиску (симетричне підвищення і зниження відносно мінімального зазору) спостерігаються як в рідких середовищах, так і в середовищі задимленого або чистого повітря. Вони реалізуються при наявності нано- і мікронерівностей на поверхнях валу і контртіла, що перебувають у контакті або розташовані з деяким зазором, тобто без контакту.

Таким чином, виникнення вторинної течії середовища, спрямованої зворотно напрямку тертя, визвано підвищенням тиску в утворюваному в напрямку обертання ролика в конфузорнім каналі і симетричним відносно мінімального зазору або середини контакту розрідженням в дифузорнім каналі. У цьому випадку тертя в контакті відбувається внаслідок опору навколишнього середовища деформаціям – компресії або стисненню і вакуумуванню або розтягання.

Контактні й безконтактні вторинні течії і розподіл тиску в граничних шарах середовища (рис.3) спостерігались у воді, у середовищах авіагасу ТС-1, диалкілбензолного масла, вакуумного масла ВМ-6, у моторних, трансмісійних та інших технічних маслах [13].

В якості прикладу на рис. 4 представлені залежності розподілу тиску в граничних шарах диалкілбензолного масла при різних швидкостях ковзання. В області входу ролика в контакт А, зі збільшенням лінійних швидкостей ковзання (від 0,2 до 0,8 м/с), сила тертя зростає і підвищення тиску шару масла також збільшується, а максимум його досягає однієї атмосфери, тобто на порядок більше, ніж у середовищі гасу. Зазначимо, що і в'язкість цього масла також на порядок більше, ніж у гасу. При постійній лінійній швидкості ролика 0,86 м/с і збільшенні осьового навантаження у 2,5 рази (із 4 до 10 Н) сила тертя збільшується, і тиск у гасі, у конфузорній області контакту, зростає з 1400 до 3700 мм вод. ст., тобто також  $\sim$  у 2,5 рази. Сила тертя ковзання зростає пропорційно зі збільшенням надлишкового тиску середовища у конфузорній області контакту за напрямком руху валу, який, у свою чергу, зростає зі збільшенням в'язкості середовища, осьового навантаження і лінійної швидкості ковзання. Отже, сила тертя ковзання є інтегральним результатом процесів, що протікають у граничних шарах мастила в конфузорно-дифузорних порожнинах контакту. При цьому в дифузорній області контакту В (рис. 4), тобто в області зниження тиску, характер розподілу тиску суттєво відхиляється від симетричного (пунктир), як це мало місце в гасі (рис. 3). Пояснюється це особливостями поведінки рідини в умовах зниженого відносно навколишнього середовища тиску, коли вона скипає й переходить у двофазний стан, а також недосконалістю техніки вимірювань в розглянутих експериментах.





**Рис. 4.** Залежність розподілу перепадів тиску  $\Delta P$  у граничних шарах диалкілбензолного масла при різних швидкостях ковзання, де  $[AB]$  – ширина лінійного контакту контртіла 1 і ролика 2 на повітрі. В області входу ролика в контакт А максимум надлишкового тиску збільшується зі збільшенням лінійної швидкості ковзання (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 м/с).

На основі отриманих експериментальних результатів досліджень і висунутої гіпотези компресійно-вакуумної природи тертя [12, 13] контактні процеси, що відбуваються при терті підшипника ковзання в середовищі, представляються наступними. При повільному зближенні обертового ролика з нерухомою поверхнею плоского контртіла, в момент утворення механічного контакту, відбувається різке підвищення сили тертя і тиску в конфузорній зоні, а також зниження тиску в дифузорній області контакту. При цьому руйнування контактних поверхонь не відбувається - в момент утворення пружного трибоконтакту різке підвищення сили тертя викликано стрибкоподібним підвищенням величини надлишкового тиску біля самої кромки контакту в конфузорній області та симетричним зниженням – в дифузорній. Візуально спостерігається також стрибкоподібне прискорення потоків середовища (за напрямком обертання): із зони на вході ролика в контактну область із неї – в зону виходу ролика. Зазначене пояснюється тим, що при пружному деформуванні поверхонь тертя, розділених граничними шарами мастила, в конфузорній ділянці контактної області за напрямком обертання ролика  $COF$  відбувається пружно-контактне стиснення і прискорення вторинної течії граничних шарів мастила у напрямку, зворотному руху ролика (рис. 5). Таке прискорення зумовлено позитивним градієнтом тиску у змащувальному шарі від атмосферного до величини максимального контактного тиску, що відповідає максимальним контактним напруженням на поверхнях елементів трибопари. За областю максимальних напружень  $OO_1$  в дифузорній ділянці виходу ролика із контакту  $ODE$  відбувається пружно-контактне розширення збіднених граничних шарів попереднім видавлюванням на ділянці  $COF$  і прискорена вторинна течія молекул рідини з об'єму середовища у контакт.

Перед входом валу в контакт (рис. 5) в області  $CFAC$ , тобто в конфузорній частині контакту граничних шарів рідкого середовища  $A$  до січення  $OO$ , утворюються вторинні гідравлічні течії середовища, направлені в сторону, зворотну руху вала. Вони викликані компресією набігаючих адсорбованих на поверхні ролика шарів мастила, що рухаються разом із ним у напрямку контактної зони з максимальною швидкістю, рівною лінійній швидкості ковзання  $\vec{v}_r$  обертової поверхні утворюючої циліндр ролика. Вторинна гідродинамічна течія, зворотна руху ролика, виникає на значній відстані від контактної зони. Вона утворюється під дією пружних деформацій граничних шарів, тобто стиснення в конфузорній приконтактній області  $CFAC$ , зумовленого геометричним звуженням каналу, направлено в сторону, зворотну руху ролика зі швидкістю  $\vec{v}_{20}^{сж}$ . Експериментально це спостерігається та фіксується за допомогою вимірювального зонду тиску при обертанні валу поблизу плоскої поверхні контртіла як в рідкому, так і в газоподібному середовищі.

При прикладенні осьового навантаження  $N$  к обертовому валу, виникає механічний пружний контакт  $AB$  з граничними шарами середовища між стисненими поверхнями (рис. 5).

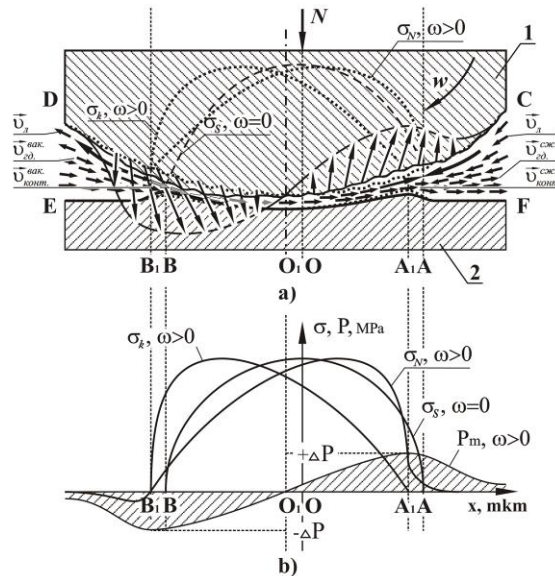


Рис. 5. Схема утворення контактних зустрічних компресійних і вакуумних течій граничних шарів мастила:

а) в трибосистемі ковзання «ролик 1 – контртіло 2», направлених зворотно ковзанню, і зсув нерухомого контакту  $AOB$  у напрямку ковзання в зону  $A_1O_1B_1$ ;

б) розподіл контактних напружень на поверхнях тертя  $\sigma_s$  без руху ( $\omega=0$ ); розподіл тисків в граничних шарах мастила  $P_m$  при терті ( $\omega>0$ ); сумарний гідродинамічний тиск граничного мастила і контактних напружень, що виникають поміж контактуючими поверхнями  $\sigma_k$  при терті ( $\omega>0$ ); сумарне поле реактивних напружень, діючих нормально тільки на поверхню рухомого ролика  $\sigma_R$  при терті ( $\omega>0$ )

В конфузорній частині контакту  $AO$  виникає ще одна зворотна течія граничних шарів середовища з області мінімального зазору  $OO_1$  і, відповідно, максимального одноосного тиску стиснення  $\sigma_{max}$ , до кромки входу вала в контакт  $AA_1$ , де тиск перевищує атмосферний на величину ступеня стиснення граничних шарів в приконтактній конфузорній області  $CFAC$ . Ця вторинна контактна течія реалізується примусово, починаючись від зони входу ролика в контакт  $AA_1$ , тобто від кромки торкання деталей з граничними шарами середовища, до зони  $OO_1$  із максимальними контактними напруженнями  $\sigma_{max}$ , тобто з області мінімального зазору пристінних граничних шарів мастила.

Відзначені течії зворотного компресійного струменя  $OA$  і набігаючих адсорбованих шарів мастила  $CA$  біля передньої кромки контакту  $A_1A$  входять в зіткнення. Відбувається процес, подібний відомому в гідродинаміці гідравлічному тарану, але на відміну від класичного - однократного, гідротаран у розглянутому випадку - безперервний.

На виході ролика з контакту за напрямком ковзання в області  $BB_1$  також виникають протилежні гідродинамічні та контактно-гідродинамічні течії, але з вакуумуванням або розтяганням граничних шарів. Адсорбовані шари на третьовій поверхні ролика з остаточними фрагментами мастила в мінімальному зазорі рухаються разом із поверхнею ролика з області від мінімального зазору  $OO_1$  в область виходу з контакту  $BB_1$  із швидкістю  $v_{л.}$ . Цей збіднений попереднім видавлюванням граничний шар опиняється у дифузорному каналі, що розширюється, проходячи шлях від зони  $OO_1$  до  $BB_1$ , де на шляху руху відбувається його розрідження, тобто вакуумування. Вторинна дифузорна зворотна течія формується із середовища, що перебуває в об'ємі  $DBB_1E$  поблизу зазору  $BB_1$  із тиском навколишнього середовища  $P_{атм.}$ . Біля самої кромки виходу ролика з контакту з площиною  $BB_1$  фрагменти середовища спрямовуються з області  $B_1E$  в зону зниженого тиску граничних шарів  $BB_1$  із швидкістю  $\vec{v}_{\dot{e}i\dot{o}}$ , звідки поверхнею ролика виносяться розріджені фрагменти середовища, які, у свою чергу, пройшовши шлях від зони  $OO_1$  до  $BB_1$ , під дією від'ємного градієнта тисків опинилися в дифузорнім каналі. Контактний «вакуумний» струмінь виникає з відносно спочиваючих фрагментів середовища, що під впливом атмосферного тиску утікають в зазор тангенціально до поверхні ролика, що виходить із контакту з контртілом у зоні  $BB_1$ . При цьому надто розріджений, можливо навіть мономолекулярний шар мастила на ролику біля самої кромки виходу з контакту, рухається з поверхнею ролика у напрямку



ковзання по шляху від от зони  $OO_1$  до  $BB_1$ , утворюючи другу течію середовища. Ці дві течії, де переважною є течія з об'єму в зазор біля вихідної кромки контакту  $BB_1$ , направлені практично тангенціально до поверхні вала. При зустрічі вони призводять до зниження ступеню розрідження змащувальних поверхонь шарів у зоні  $BB_1$  до тиску навколишнього середовища. По суті, відбувається дещо подібне процесу гідравлічного тарана адсорбованих і вакуумованих шарів мастила – того, що виходить із контактної зони робочої поверхні ролика і яке перетікає з середовища у контактну зону. На відміну від ефекту класичного гідротарана, для якого характерною є однократність, у розглянутому випадку відбувається безперервне зіткнення розріджених фрагментів середовища. Наприклад, під дією високого контактного градієнта тисків  $(\sigma_{max} - P_{атм}) = 1,1$  МПа на відстані половини ширини контакту 0,4 мм виникає витікання фрагментів середовища з контактної зони із швидкістю  $\vec{v}_{конт}^{сж}$ . Ця швидкість за приблизними розрахунками для гасу при навантаженні 4 Н і швидкості ковзання 1 м/с складає 16 м/с. Якщо врахувати, що швидкість набігаючих шарів гасу  $\sim 1$  м/с, то біля кромки контакту відбувається зіткнення двох зворотно направлених потоків середовища з відносною швидкістю 17 м/с. Цей ефект визначає силу тертя ковзання, яка лавиноподібно виникає при повільному навантаженні контакту. У полі високих градієнтів тиску рідкокристалічні граничні шари мастила поводять себе, як рідина.

Інтенсивне зменшення швидкості обертання вала, що супроводжується характерною зміною шуму електроприводів при плавному створенні контакту змазаних поверхонь шляхом повільного навантаження, спостерігається завжди. Це викликано виникненням контактного пружно-деформаційного витікання граничних шарів мастила з контакту під дією зростаючого в напрямку руху надлишкового тиску на вході в контакт. А на виході з нього плин об'єму середовища в розріджені шари контактної дифузійної області відбувається під дією атмосферного тиску. Такий спільний вплив цих течій на граничні шари третьої поверхні у зворотному обертанні направлени ролика і є причиною його інтенсивного гальмування, а не дія адгезійної складової сили тертя, тому що при первинному контактуванні ознак поверхневого схоплення не спостерігається.

На рис. 5 вісь  $OO$ , що проходить через центр обертання ролика, до якої прикладена сила стиснення  $N$  вала 1 і контртіла 2, є геометричною віссю симетрії контакту  $AB$ , виникаючого в статичних умовах без руху ( $\omega = 0$ ). При обертанні вала ( $\omega > 0$ ) виникають області підвищеного тиску на вході вала в контакт і розрідження середовища - на його виході з контакту. У цих областях створюються перепади тиску ( $+\Delta P$  і  $-\Delta P$ ) відносно тиску навколишнього середовища, тому основа епюр контактних напружень і напружень сил тертя зміщується в сторону направлення руху вала (вліво на рис. 5). При цьому контактні напруження, що розвиваються на поверхнях елементів трибопари  $\sigma_k$  при наявності сили стиснення  $N$ , будуть представляти собою різницю контактних напружень, що виникають в епітропних шарах мастила і на поверхнях у статичних умовах (без руху вала)  $\sigma_s$ , і перепадів тиску  $\Delta P$ , виникаючих у шарах мастила при русі вала:

$$\sigma_k = \sigma_s - \Delta P \quad (4)$$

Таким чином, контактні напруження  $\sigma_k$  при терті ковзання будуть зміщатися в сторону направлення руху вала, тобто в область зниженого тиску, як показано на рис. 5. Сили тертя при цьому будуть визначатися нормальною і тангенціальною проекціями розвинутих на поверхнях елементарних реакційних напружень  $\sigma_N$ , які в свою чергу представляють собою суму контактних поверхневих напружень  $\sigma_s$  і перепадів тиску  $\Delta P$ , виникаючих у цих шарах при русі вала:

$$\sigma_N = \sigma_s + \Delta P \quad (5)$$

При цьому основа епюри  $A_1B_1$  напружень від дії сил тертя  $\sigma_N$  співпадає з основою  $A_1B_1$  контактних напружень  $\sigma_s$ , але сама епюра буде нахилена в зворотну обертання вала сторону, як показано на рис.5.

Як видно із формул (4) і (5), у випадку повного розділення поверхонь граничними шарами мастила контактні напруження  $\sigma_k$  і напруження від дії реакційних сил  $\sigma_N$ , виникаючі симетрично на поверхнях тертя, як вала, так і контртіла, при проектуванні їх на вертикальну ось інтегрально будуть рівні напруженням, виникаючим на робочих поверхнях, коли ті знаходяться в спокої, урівноважуючи дію зовнішньої сили стиснення  $N$ . Епюри контактних напружень  $\sigma_k$  і напружень впливу реакційних сил  $\sigma_N$  нахилені в різні сторони. Тобто, поверхні в області розрідження ЕРК - шарів будуть сильніше навантажені, ніж в області підвищеного тиску. З огляду на загальний закон фізики адитивного додавання первинних сил, сила тертя ковзання між валом і контртілом включає в себе наступні складові:

- гідромеханічна складова сили тертя або сила внутрішнього тертя, яка описується співвідношенням Ньютона

$$f_{zm} = -\eta_{xy} \nabla v_y, \quad (6)$$

и зв'язує силу внутрішнього тертя  $F_x$ , діючу на одиничну площадку в напрямку, протилежному градієнту швидкості течії в'язкого середовища (газу, рідини) з градієнтом швидкості  $\nabla v_y$  за допомогою коефіцієнта динамічної в'язкості середовища  $\eta_{xy}$ . Тобто, молекулярний шар мастила, що рухається із швидкістю  $\vec{v}_d$ , долає опір відносно спочиваючих шарів середовища ( $\vec{v}_\infty = 0$ ) тангенціальній деформації. Сила внутрішнього тертя, виникаюча при русі тіла в середовищі з необмеженим об'ємом, тобто без будь-яких перешкод, в значній мірі визначаються висотою структурно-чутливих граничних шарів середовища  $h_{сч}$ . Ця висота визначається відстанню по нормалі від поверхні до тих шарів середовища, в яких руху практично не відбувається. При цьому враховується форма тіла, об'ємна в'язкість середовища  $\eta$ , і швидкості руху кожного фрагмента поверхні вала  $S_\Sigma$ . Сили внутрішнього тертя, по суті, є гідромеханічними силами, викликаними лише опором середовища деформації від руху в ній твердого тіла.

Гідродинамічна складова сили тертя виникає навіть при відсутності безпосереднього контакту, що при наявності поблизу рухомої поверхні вала деякої поверхні, наприклад нерухомої плоскої поверхні або підшипника ковзання. Вона виникає за рахунок гальмування набігаючих з валом граничних шарів середовища із швидкістю  $\vec{v}_d$ , що стікають із конфузорного зазору і рухаються у зворотну сторону відносно викликаних гідродинамічною конфузорою деформацією стиснення течій зі швидкістю  $\vec{v}_{zd}^{сж}$ . В дифузійній частині зазору, у напрямку руху поверхні, відбувається ковзання витікаючих із зазору розріджених граничних шарів мастила по шарам мастила, що втікають в нього зі швидкістю  $\vec{v}_{zd}^{вак}$  під дією зовнішнього тиску навколишнього середовища.

Контактно-гідродинамічна складова сили тертя ковзання виникає від дії контактної навантаження, що викликає пружну деформацію граничних шарів, пов'язану з високим позитивним градієнтом тисків, виникаючих в них від стиснення на рівні пружної деформації поверхонь на ділянці  $OA$  (рис. 5). Такий деформаційний вплив на внесені в контакт граничні шари середовища призводить до їх прискорення в конфузійній частині контакту від січення  $O_1O$  до кромки входу вала в контакт в січненні  $A_1A$ , де граничні шари поверхонь тертя виходять з контактної взаємодії, а швидкість  $\vec{v}_{конт}^{сж}$  вторинної течії молекул ЕРК-шарів максимальна. Тиск в січненні  $A_1A$  обумовлений дією гідродинамічних передконтактних конфузорних деформацій стиснення граничних структурно-чутливих шарів, що призводить до їх течій із сумарною швидкістю  $\vec{v}_d + \vec{v}_{zd}^{сж}$ . У дифузійній частині також виникає додаткову, зумовлену вакуумуванням ЕРК шарів, вторинну течію, направлену із середовища в контакт і також у сторону, зворотну руху вала із швидкістю  $\vec{v}_{конт}^{вак}$ .

У випадку, коли розрідження в граничних шарах не перевищує граничного тиску, що визиває кавітацію в середовищі мастила, то сила тертя  $F_{mp}$  або опори обертанню вала може бути визначена, як

$$F_{mp} = f_{zm} + f_{zd} + f_{кzd}, \quad (7)$$

де  $f_{zm}$  – гідромеханічна складова, виникаюча від опору деформуванню середовища при змушеному її переміщенні приповерхневими граничними шарами, якому супротивляться прилеглі спочиваючі шари, чим у свою чергу перешкоджають наступні шари і т.д. у необмеженому якою-небудь перешкодою об'ємі. Гідродинамічна складова сили тертя  $f_{zd}$  виникає при появі поблизу однієї з рухомих поверхонь, наприклад, обертової поверхні, утворюючої циліндр вала, іншої поверхні, наприклад, нерухомої плоскої стінки на деякій відстані  $h_{гд}$ . Досвід показує, що відносно мінімального зазору або лінії контакту виникають дві зворотні руху вала вторинні течії: в конфузійній області - від процесів стиснення середовища і в дифузійній області - від процесів розтягнення середовища. Ці процеси призводять до виникнення відповідних складових гідродинамічних сил тертя  $f_{zd} = f_{zd}^к + f_{zd}^d$ .

Контактно-гідродинамічна складова сили тертя  $f_{кгд}$  виникає в контактні граничних шарів, що знаходяться у пружно-деформаційному одноосьовому напруженому стані під дією сили

стиснення. При відносному переміщенні граничних шарів однієї поверхні по граничним шарам іншої поверхні, також в конфузорній і в дифузорній областях їх контакту, виникають відповідні області стиснення і розрідження середовища, створювані напруженнями, обумовленими пружною деформацією матеріалів. Під дією високо-градієнтних контактних напружень в матеріалах виникають відповідні зворотні руху вала контактної-гідродинамічні вторинні течії. Контактно-гідродинамічна сила тертя виникає і контакті пружно-деформованих ЕРК- шарів у відповідних конфузорно-дифузорних областях контакту ЕРК- шарів  $f_{кз\delta} = f_{кз\delta}^к + f_{кз\delta}^{\delta}$ .

При адитивному характері дії сила тертя  $F_{тр} = f_{зм} + \{ f_{з\delta}^к + f_{з\delta}^{\delta} \} + \{ f_{кз\delta}^к + f_{кз\delta}^{\delta} \}$  при ковзанні вала на плоскій поверхні контргіла є сумою первинних сил гідромеханічного, гідродинамічного і контактної-гідродинамічного опору деформуванню середовища.

### Висновки

1. Гідродинамічні ефекти тертя у режимі граничного змащування зумовлені утворенням областей, як із підвищенням, так й зі зниженням тиску у змащувальному шарі. Перепад тиску на сторонах контакту призводить до виникнення струминних течій середовища проти напрямку обертання вала.

2. Зі збільшенням осьового навантаження, швидкості ковзання та в'язкості середовища зростає ступінь стиснення середовища «на вході в контакт» і ступінь його розрідження - «на виході з контакту». Області підвищеного та пониженого тиску рідкого середовища є симетричними відносно лінії максимуму контактних напружень і перевищують довжину контакту в декілька разів. Симетрія порушується після досягнення певних контактних напружень та/або швидкості ковзання, коли виникає кавітація в зоні контакту.

3. Підвищення в'язкості середовища супроводжується зростанням компресії в області входу вала в зону контакту і, відповідно, розрідженням середовища в області виходу вала з нього.

4. В умовах граничного змащування відбувається перерозподіл контактної навантаження, викликаного деформаціями стиснення й розтягнення граничних шарів мастила у відповідних областях контакту. Зношування вузлів тертя відбувається переважно в області низького тиску середовища, що слід враховувати на етапі їх проектування.

5. Зсув зони контакту трибосистеми ковзання зумовлені перерозподілом підвищеного і зниженого тиску в конфузорній та дифузорній областях контакту.

При моделюванні трибосистеми ковзання з лінійним контактом встановлено, що в паливних, масляних та інших гідравлічних системах поряд із гідравлічною та акустичною кавітацією, має місце й «трибокавітація» - процес, що протікає у дифузорних областях вузлів тертя та призводить до локального зниження тиску в середовищі до значень, близьких до мінімальних тисків порогу кавітації.

6. Показано, що умови контактування двох змащених поверхонь, стиснутих деякою осьовою силою, визначаються пружністю деформації граничних шарів рідини.

7. Встановлено, що у контакті змащувальне середовище в статичних умовах навантаження поводить себе подібно пружному твердому тілу, а в умовах високих контактних градієнтів тиску та швидкостей – подібно рідині.

8. Гіпотеза компресійно-вакуумної природи тертя і зношування поєднує гідродинамічні, еласто-гідродинамічні уявлення та процеси тертя в умовах граничного змащування.

### Література

1. Воларович М.П. Н.П.Петров – основоположник гидродинамической теории смазки машин// Трение и износ в машинах. Труды второй всесоюзной конференции по трению и износу в машинах Т.III., 1949.
2. Петров Н.П. Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости// Инж. журн., т. 27, №1; №2, 227; №3, 337; №4, 535, 1883. Отдельное издание, СПб., 1883. – 212 с.
3. Никитин А.К., Ахвердиев К.С., Остроухов Б.И. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме. – М.: Наука, 1981.
4. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин М., «Машиностроение», 1976. – 304 с.
5. Основы трибологии: Учебник для технических вузов./ Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – С. 277-351.
6. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М.Хебды,, А.В.Чичинадзе. В 3-х т. Т.1 Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400с.
7. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

8. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение. – 1977. – 526 с.
9. Дерягин Б.В., Поповский Ю.М., Алтоиз Б.А. Открытие СССР «Явление образования гомогенной граничной жидкокристал-лической фазы немезогенной жидкости». Диплом №388.// Открытия и изобретения 1991. №12. – С.1.
10. Алтоиз Б.А., Дейнека В.Т. Измерение параметров граничного слоя жидкости теплоносителя влияющих на интенсивность теплообмена. // Научно-технический сборник «Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры». – Одесса, 2003. - Вып.1.- С. 29-33.
11. Лужнов Ю.М. Нанотриботехнология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. М.: Интекст, 2009. – 176 с.
12. Стельмах А.У. Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания. –28 с. – Деп. в ГНТБ Украины. - 07.07.2008, №109-Ук 2008.
13. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. – 43 с. – Деп. В ГНТБ Украины 14.04.09, №20 – Ук 2009.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2019