

Стадниченко В.М.,
Варваров В.В.,
Вахнюк С.А.

Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна
E-mail: stadnychenko1971@gmail.com
Харківський національний
університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба

**СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ
ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ
АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ
ТА ЗНОШУВАННЯ**

УДК 621.9.031

Стадниченко В.М., Варваров В.В., Вахнюк С.А. «Структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування»

В роботі наведено відомий ефективний спосіб зниження тертя та зношування в різних трибосистемах у результаті трибомодифікування поверхневого шару. Метою такого трибомодифікування являється створення найбільш сприятливих (сумісних по Гаркунову) умов мікроконтактної квазіупругої взаємодії, що виникає на рівні мікрорельєфу.

Розгляд квазіупругої взаємодії з позиції нерівноважної термодинаміки дозволив багатьом авторам висунути гіпотезу, що квазіупруга взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виродження накопиченої внутрішньої енергії з трибосистеми. Серед цих факторів основний вклад приходить на кінетичну (хвильову) складову сили тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії і проковзуванні при їх розгоні.

Представлені реологічні та структурні умови перетворення зовнішньої підведеної енергії за результатами контактної взаємодії шорсткості поверхневого шару трибосистеми, де один з елементів представлений як квазітверде тіло, а у другому поверхневий шар квазіупругий, представлений за реологічною моделлю Шведова. Метою даної роботи було розроблення структурно-енергетичної моделі перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування, яка дає можливість розробки рекомендацій по структурній модифікації поверхневого шару реальних трибосистем з метою підвищення їх ресурсних показників та коефіцієнту корисної дії.

Проведені дослідження показали, що основною причиною переходу трибосистем до аномального тертя та зношування є реологічні властивості поверхневого шару. Аналіз контактної взаємодії шорсткостей за моделлю твердого тіла у вигляді міжатомних зв'язків дало можливість оцінити пружну енергію, яка виділяється при руйнуванні зв'язків у результаті проковзування мікрошорсткостей. Вона складає чверть від величини енергії, яка витрачена на подолання сил тертя.

Оцінка взаємодії, як марківського процесу з двома двосторонніми станами (розпад і відновлення), дозволила отримати математичну залежність узагальненої складової імпульсу сили на плямі контакту від енергії контакту в стані зчеплення і параметру розподілення плям контакту за модулем канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту.

Головною умовою при переході до аномально низького тертя та зношування є формування на поверхні тертя певного градієнта фізико-механічних властивостей, які описані реологічною моделлю Шведова. Оптимізацією реологічної побудови поверхневого шару реальних трибосистем вдалося досягти умов, коли дисипативний об'єм в умовах контактної взаємодії здатний зворотно трансформувати (розсіювати) енергію зовнішнього руху. Практично вдалося реалізувати «ідеальні» умови дисипації зовнішньої енергії, що підводиться по хвильовому каналу і уникнути процесу зношування в трибосистемі та позбавитися від зовнішнього тертя. Дану технологію можна віднести до розряду ресурсозберігаючих з високим ступенем енергоефективності. Наявність при зовнішньому терті хвильової складової показує значну різницю між молекулярною і механічною складовими сили тертя.

Ключові слова: аномально низьке тертя і знос, трибосистема, молекулярно-механічна і хвильова складова тертя, реологія, кінетична взаємодія шорсткостей.

Стадниченко В.Н., Варваров В.В., Вахнюк С.А. «Структурно-енергетическая модель преобразования энергии в условиях аномально низкого трения и износа»

Представлены реологические и структурные условия преобразования внешне подведенной энергии по результатам контактного взаимодействия шероховатостей поверхностного слоя трибосистемы, где один из элементов представлен как квазитвердое тело, а во втором квазиупругий поверхностный слой представлен по реологические модели Шведова. Целью данной работы была разработка структурно-энергети-

ческой модели преобразования энергии в условиях аномально низкого трения и износа, которая дает возможность разработать рекомендаций по структурной модификации поверхностного слоя реальных трибосистем для повышения их ресурсных показателей и коэффициента полезного действия.

Проведенные исследования показали, что основной причиной перехода трибосистем к аномальному трению и изнашиванию является реологические свойства поверхностного слоя. Анализ контактного взаимодействия шероховатостей по модели твердого тела в виде межатомных связей позволил оценить энергию упругого взаимодействия, которая выделяется при разрушении связей в результате проскальзывания микрошероховатостей. Она составляет четверть от величины энергии, затраченная на преодоление сил трения.

Оценка взаимодействия, как марковского процесса с двумя двусторонними состояниями (распад и восстановление), позволила получить математическую зависимость обобщенной составляющей импульса силы на пятне контакта от энергии контакта в состоянии сцепления и параметра распределения пятен контакта по модулю канонического распределения энергии по линии (поверхности) контакта.

Главным условием при переходе к аномально низкому трению и изнашиванию, является формирование на поверхности трения определенного градиента физико-механических свойств, которые описаны реологической моделью Шведова. Оптимизацией реологического построения поверхностного слоя реальных трибосистем удалось достичь условий, когда диссипативный объем в условиях контактного взаимодействия способен обратно трансформировать (рассеивать) энергию внешнего движения. Практически удалось реализовать «идеальные» условия диссипации внешней энергии, подводимой по волновому каналу и избежать процесса изнашивания в трибосистеме и избавиться от внешнего трения. Данную технологию можно отнести к разряду ресурсосберегающих с высокой степенью энергоэффективности. Наличие при внешнем трении волновой составляющей показывает значительную разницу между молекулярной и механической составляющими силы трения..

Ключевые слова: аномально низкое трение и износ, трибосистемы, молекулярно-механическая и волновая составляющая трения, реология, кинетическое взаимодействие шероховатостей

Stadnichenko V.M., Varyvarov V.V., Vakhnyuk S.A. «Structural-energy model of energy conversion under conditions of abnormally low friction and wear»

The effective method of reducing friction and wear in various tribosystems is now known as the results of the tri-modification of the surface layer. The purpose of such tribodomodification is the creation of the most favorable conditions of microcontact quasielastic interaction that occurs at the level of microrelief. Consideration of quasi-elastic interaction from the position of nonequilibrium thermodynamics has allowed many authors to put forward the hypothesis that quasi-elastic interaction can be an anti-dissipative factor, which leads to the degeneration of accumulated internal energy from the tribosystem. Among these factors, the main contribution comes from the kinetic (wave) component of the frictional force, which is formed with a difference in braking rates with molecular-mechanical interaction and slipping when accelerating them.

The article presents the rheological and structural conditions of the transformation of the external energy as a result of the contact interaction of the roughness of the surface layer of the tribosystem, one of which is presented as a quasi-solid body in the second surface layer of a quasi-elastic representation of the Schwedov rheological model. The purpose of this work was to develop a structural energy model for energy conversion under conditions of abnormally low friction and wear, which makes it possible to develop recommendations for the structural modification of the surface layer of real tribosystems in order to increase their resource indicators and efficiency.

The conducted studies have shown that the main reason for the transition of tribosystems to abnormal friction and wear is the rheological properties of the surface layer. The analysis of the contact interaction of roughness on the model of a solid body in the form of interatomic bonds gave an opportunity to estimate the elasticity of the energy that is released when the bonds break down as a result of the slipping of the microhardness. It makes up one quarter of the amount of energy that is spent on overcoming frictional forces.

The evaluation of the interaction as a Markov process with two bilateral states (decay and recovery) allowed us to obtain the mathematical dependence of the generalized component of the impulse of force on the contact point from the contact energy in the coupling state and the parameter of the distribution of contact spots by the modulus of the canonical energy distribution along the contact line (surface).

The main condition for the transition of abnormally low friction and wear is the formation on the friction surface of a certain gradient of physical and mechanical properties, which are described by the Shvedov rheological model. By optimizing the rheological construction of the surface layer of real tribosystems, it was possible to achieve conditions when the dissipative volume in the contact interaction is capable of transforming (scattering) the energy of the external motion inversely. Practically managed to realize the "ideal" conditions of dissipation of external energy supplied by the wave channel and avoid the process of wear in the tribosystem and get rid of external friction. This technology can be attributed to the category of resource-saving with a high degree of energy

efficiency. The presence of external gravity of the wave component shows a significant difference between the molecular and mechanical components of the friction force.

Keywords: abnormally low friction and wear, tribosystem, molecular-mechanical and wave component of friction, rheology, kinetic interaction of roughness.

Актуальність проблеми та аналіз останніх досліджень

Сучасний розвиток трибології і перш за все такого розділу, як трибоматеріалознавство, дозволив сформулювати новий, достатньо ефективний спосіб зниження тертя та зношування в різних трибосистемах у результаті трибомодифікування поверхневого шару [1]. Метою такого трибомодифікування являється створення найбільш сприятливих (сумісних по Гаркунову) умов мікроконтактної квазіупругої взаємодії, що виникає на рівні мікрорельєфу [2].

Розгляд квазіупругої взаємодії з позиції нерівноважної термодинаміки дозволив А.И. Вейнику ще у 1973 році висунути гіпотезу, що квазіупруга взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виродження накопленої внутрішньої енергії з трибосистеми. Серед цих факторів основний вклад приходиться на кінетичну (хвильову) складову сили тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії і проковзуванні при їх розгоні.

Теоретичну основу в розробці фізичної моделі аномально низького тертя та зношування створили роботи багатьох авторів, наприклад робота [3]. С.В. Федоровим [4] для аналізу аномально низького тертя використаний квантомеханічний підхід, введено поняття механічного кванта – мінімального числа атомів, здатних забезпечувати конфігураційний розподіл наноструктури, що володіють властивостями зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху. Він також являє собою найменше структурне утворення в умовах пластичної деформації і утворюється при переході трибосистеми (деформованого обсягу) через гранично активований (критичний) стан внаслідок розвитку самоорганізаційних процесів адаптації трибосистеми. В обсязі трибосистеми в умовах аномально низького тертя і зносу (елементарної трибосистеми) кількість таких механічних квантів (трибосистем) дорівнює $0,63 \cdot 10^8$, тобто безпечного числа циклів втоми. Механічний квант сам по собі є динамічним осцилятором дисипативних структур тертя і його лінійний розмір дорівнює радіусу сферичного ідеального кристала – 7,177 нм [4].

Власне механічний квант слід розглядати як елементарну наноструктуру металевого твердого тіла [4]. Такий висновок дає підстави вважати можливим подолання сил тертя при переміщенні твердих тіл тільки за рахунок внутрішніх сил. На наш погляд, джерелом виникнення цих сил є хвильова складова зовнішнього тертя. На основі даних досліджень розроблені рекомендації щодо реологічних особливостей поверхневого шару трибосистем для створення умов, які збільшують хвильову складову і дозволяють досягнути умов аномально низького тертя та зношування. В даному випадку одна з поверхонь в трибосистемі, представляє собою квазітверде тіло, а на другому трибоелементі поверхневий шар модифікований за рахунок різноманітних методів (програмне навантаження, управління тепловим потоком, трибоактивація активними елементами, технології фінішної обробки та ін.) [5, 6]. Дані дослідження представлені у вигляді наукової парадигми переведення трибосистем від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького тертя та зношування [6].

Узагальнення великої кількості результатів дослідження тертя в умовах граничного мащення, показує, що значення коефіцієнтів тертя для різних поєднань матеріалів та змащувальних середовищ, відповідно до кривої Герсі-Штрибека, знаходиться в діапазоні 0,005...0,02.

Проводячи аналіз роботи трибосистем в умовах аномально-низького тертя та зношування [4, 6, 7], рядом вчених використовуються хвильові підходи до структурування поверхневого шару. Однак, як канал дисипації зовнішньої енергії, що підводиться, ця складова не розглядалася.

Одна з перших спроб залучення хвильової складової як каналу дисипації, виконана у роботі [6]. Автор вважає, що в умовах аномально-низького тертя та зношування на поверхні утворюється квазіупругий шар у центральній її частині. Гіпотетично можлива гідродинамічна деформація, а на периферії, в перехідній зоні, слід очікувати інтенсивну ротаційну пружно-пластичну деформацію, аналогічну структурі вихроутворення у пристінковому шарі при течії рідини. Такий підхід, на наш погляд, можна вважати частковим випадком прояву хвильової складової сили тертя.

Таким чином, при найпоширеніших режимах тертя і мащення у формуванні сили тертя беруть участь як поверхневий шар елементів трибосистеми, так і змащувальне середовище. В даний час у ряді робіт представлені результати експериментальних досліджень з показниками сили тертя, що далеко виходять за ці рамки у бік зменшення [2]. Тому пошук теоретичних передумов для переходу зовнішнього тертя з «нормальної області» до аномально низького тертя є своєчасною і актуальною задачею.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка структурно-енергетичної моделі перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування, яка дає можливість розробки рекомендацій по структурній модифікації поверхневого шару реальних трибосистем з метою підвищення їх ресурсних показників та коефіцієнту корисної дії.

Результати досліджень

Останнім часом для пояснення аномально низького тертя та зношування використовується хвильовий підхід при аналізі енергетичного обміну між поверхнями, що труться. Поверхневий шар елементів трибосистеми представляється у вигляді енергетичних осередків представлених їх шорсткістю. При русі поверхонь в кожний момент часу відбувається велика кількість зіткнень мікроступів. В кожній мікрозоні утворюється тепло, яке розсіюється за законами дисипації. Разом з цим автори звертають увагу, що нагрів мікроступів відбувається зі швидкістю не більше ніж десять градусів в секунду, а охолодження – зі швидкістю тисячі градусів в секунду, що обумовлює формування структури поверхневого шару, який володіє певною гетерогенністю, що пов'язано з нерівномірністю розподілу енергії по висоті мікроступу. Виходячи з цих міркувань представлена будова поверхневого шару складається з чотирьох зон, детальний розгляд зон поверхневого шару приводить до висновку, що цей шар є композитом, властивості якого повинні враховуватися при аналізі процесів тертя та зношування [7]. В даній роботі динаміка кінетичної взаємодії мікроступів на всій поверхні контакту не розглядалася. Відомо, що всяка система, що складається з дуже великого числа частинок, переходить від стану менш імовірного до стану більш імовірного. Термодинамічно це відповідає зменшенню ентропії S системи відповідно до формули Больцмана [5]:

$$S = k \ln W, \quad (1)$$

де k – постійна Больцмана;

W – термодинамічна імовірність.

Якщо повернутися до реакції трибосистеми на імпульсну динамічну взаємодію, то відповідно до принципу Ле-Шательє, трибосистема переходить в такий стан, в якому

ефект зовнішньої взаємодії ослаблюється. Результуюча стану трибосистеми в цьому випадку диктується двома основоположними термодинамічними принципами. Тому зростання «вагового значення» хвильової складової сил тертя, яка вводить в загальне рівняння із знаком мінус, є термодинамічно передбаченим.

Оскільки в результаті контактної взаємодії ідеально пружних мікрровиступів формується хвиля напружень, яка бере участь в процесі дисипації енергії, що підводиться ззовні, то кількісна оцінка сили тертя F_{fr} з урахуванням її хвильової складової F_w , буде мати наступний вигляд:

$$F_{fr} = |F_a + F_d| - |F_w|, F_{fr} \leq |F_w| \quad (2)$$

де F_a – молекулярна (адгезійна) складова сили тертя;

F_d – механічна (деформаційна) складова сили тертя.

Хвильова складова сили тертя F_w є тим «ентропійним насосом», який частину зовнішнього тертя, що не компенсується, переводить у внутрішнє тертя.

Характер взаємодії одиничних мікрошорсткостей представлено моделлю реології Гука. Проведемо аналіз формування хвильової складової в даних умовах контакту. В умовах відсутності взаємного переміщення сили притягання і відштовхування між атомами в другому елементі урівноважені.

Для аналізу контактної взаємодії шорсткостей елементів трибосистеми скористаємося моделлю твердого тіла у вигляді міжатомних зв'язків. Руйнування зв'язку, що виникає (молекулярно-механічна складова сил тертя), відбувається за рахунок розриву при досягненні зовнішньої сили, яка діє на тіло, певного значення.

Якщо зовнішня дія на тіло відсутня, то притягання і відштовхування між атомами в елементах трибосистем знаходяться в рівноважному стані. При цьому атоми знаходяться на відстані один від одного r_0 . Цьому положенню рівноваги відповідає мінімальне значення потенційної енергії E міжатомної взаємодії. При розтяганні атомного зв'язку за рахунок тертя між шорсткостями на деяку відстань $r - r_0 = \Delta r$ потенційна енергія росте, а сила тяжіння F намагається повернути атоми в початкове положення, тут r – кінцева міжатомна відстань; r_0 – початкова міжатомна відстань. Щоб розірвати зв'язок потрібно віддалити атоми на достатню відстань, де сила притягання дорівнюватиме нулю.

Роботу, необхідну для розриву (енергію активації розриву зв'язку, його дисоціації) позначимо символом D . Залежність потенційної енергії E від відстані між атомами в матеріалі елементів, що взаємодіють, доцільно показати рівнянням Морзе [8]:

$$E = D \left(2e^{-b(\Delta r)} - e^{-2b(\Delta r)} \right), \quad (3)$$

де b – постійна.

Оскільки сила тяжіння F є похідною від енергії $E(r)$ по r , то:

$$F = - \frac{d}{dr} [E(r)].$$

Максимальне значення цієї сили F_m можна вважати граничним значенням, при якому атоми знаходяться в стані стійкої або нестійкої рівноваги. Іншими словами, це стан, при якому відбувається або не відбувається руйнування.

Для потенціалу Морзе:

$$F(\Delta r) = 4F_m \left(e^{-b(\Delta r)} - e^{-2b(\Delta r)} \right), \quad (4)$$

де $F_m = 0,5bD$.

Значення максимального розтягування Δr_m відповідно:

$$\Delta r_m = -\frac{1}{b} \ln \frac{1}{2}.$$

Якщо D дорівнює енергії, яка вивільняється при руйнуванні зв'язків, тобто енергії сублімації, то можна знайти величину максимального значення сили притягання, і значення, при яких атоми знаходяться в стані стійкої або нестійкої рівноваги.

Якщо помітити зовнішню силу, що розтягує, як f , то при дії цієї сили атоми будуть в положенні стійкої рівноваги, лише у разі подолання силового бар'єру, для чого необхідно підвести додаткову енергію $E(f)$. Значенню сили f при двох значеннях Δr відповідають два значення потенційної енергії. Знайдемо їх з (3) і (4), замінивши $F(\Delta r)$ на f і підставивши $z = e^{-b(\Delta r)}$ в (4) отримаємо рівняння:

$$z^2 - z + f/4F_m = 0.$$

Звідси знайдемо значення z_1 і z_2 і відповідні їм значення Δr_2 :

$$\Delta r_{1,2} = \frac{1}{b} \ln \frac{2}{1 \pm \sqrt{1 - \frac{f}{F_m}}}.$$

Підставляючи Δr_1 і Δr_2 в (3) знайдемо пружну енергію, яка виділяється при руйнуванні зв'язків. Різниця значень пружної енергії при $\Delta r = 0$ і $\Delta r_{1,2}$, тобто кількість енергії $E(f)$ необхідної для подолання силового бар'єру, знайдемо по формулі:

$$E(f) = E(\Delta r_{1,2}) - E_0 = 0,25D \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{f}{F_m}} \right), \quad (5)$$

де E_0 – мінімальне значення потенційної енергії.

З (5) витікає, що для досягнення межі міцності зв'язку необхідно підвести кількість енергії, що дорівнює лише четверті енергії дисоціації, тобто:

$$E(F_m) = 0,25D. \quad (6)$$

Таким чином, для розриву зв'язків, що виникають (молекулярної і механічної складової сили тертя), потрібно достатньо енергоємне джерело зовнішньої механічної сили з урахуванням кількості елементарних зв'язків для реальних систем.

Проте величина цієї енергії, що виділяється при розриві одиничного зв'язку, складає лише четверть від величини енергії (6), яка затрачується на подолання сил тертя.

Сформульовані умови досягнення рівності хвильової і молекулярно-механічної складової сили тертя, тобто досягнення нульового тертя, при поверхневому аналізі дозволяють зробити висновок, що трибосистема є вічним двигуном третього роду. Проте це не так. Проводячи аналіз механізмів дисипації енергії, що ззовні підводиться до трибосистеми необхідно враховувати як зовнішнє тертя, так і внутрішнє. Внутрішнє тертя визначається фізико-механічними властивостями структури матеріалів, визначаючи можливості їх взаємодії з навколишнім середовищем. Зовнішнє тертя відповідає фактичній реалізації взаємодії в трибосистемі і навколишнім середовищем.

Отже, різниця між внутрішніми і зовнішніми ступенями свободи полягає в тому, що внутрішні ступені свободи визначаються можливостями взаємодій, що розташовуються (потенційно закладеними в системі) з навколишнім середовищем. Зовнішні ж ступені свободи відповідають фактично взаємодіям, що реалізується між системою і навколишнім середовищем.

Оскільки критерієм безповоротності трибосистем є робота сил тертя, то її виробництво розглянемо на рівні елементарної взаємодії мікрошорсткостей. Одну з них представимо у вигляді абсолютно жорсткого тіла, яке при дії на нього сил молекулярно-механічної взаємодії не деформується. А другу шорсткість можна представити у вигляді пружини з певною жорсткістю c , яка за рахунок сил молекулярно-механічної взаємодії періодично займає два положення, в одному з яких пружина не напружена, а в іншому стисла або розтягнута на величину Δl . При цьому робота пружної сили пружини A , між двома її положеннями може бути визначена по формулі:

$$A = \pm \frac{1}{2} c (\Delta l)^2.$$

Знак плюс береться у разі розвантаження пружини (деформація змінюється від Δl до 0), знак мінус – при навантаженні (деформація змінюється від 0 до Δl).

Отримана формула залишається справедливою і у тому випадку, коли вільний кінець пружини рухається уздовж будь-якої криволінійної траєкторії, послідовно займаючи положення m_1 і m_2 .

Якщо пружина деформована в обох даних положеннях (в кінцевому – на величину Δl_2 , в початковому – на Δl_1), то має місце формула:

$$A_{m_1 m_2} = -\frac{c}{2} [(\Delta l_2)^2 - (\Delta l_1)^2]. \quad (7)$$

З урахуванням прийнятої вираз (7) представляє собою елементарну роботу кінетичного нанополя.

Узагальнену роботу ΔA сил тертя, можна представити виразом узагальненої сили P на узагальнену кінетичну взаємодію ΔE за певний період роботи трибосистеми:

$$\Delta A = P \Delta E. \quad (8)$$

В структурно-енергетичній теорії тертя та зношування загальноприйнятим є термін механохімічний знос, який являється результатом різних видів робіт (механічної, термічної, електричної, хімічної, кінетичної і пов'язаної з нею хвильової і т.д.). Кожна дана робота специфічна, неповторювана і не може бути підмінена ніякою іншою. Робота кожного роду пов'язана з відповідним механізмом дисипації U , який може бути представлений виразом:

$$dU = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta A_i. \quad (9)$$

Робота зіставляється зі зміною енергії системи. Отже, робота є кількісною мірою взаємодії системи і навколишнього середовища та представляє собою функцію процесу бо виконується в процесі перенесення і перетворення різних видів енергій трибосистеми. У момент закінчення процесу робота припиняється, а в процесі дисипації підведеної до трибосистеми енергії продовжується достатньо тривало в часі [9]. Про якісну і кількісну сторону виконаної роботи трибосистеми можна судити по непрямим ознаках. По змінах перерахованих вище механізмів дисипації підведеної механічної енергії через узагальнену силу з урахуванням суперпозиції енергетичного складання, кожної з перерахованої раніше сил механізмів дисипації.

З виразу (9) видно, що позитивна робота супроводжується збільшенням енергії системи, при цьому обидві величини dU і ΔA являються позитивними. Енергія зростає, якщо над системою роботу виконує навколишнє середовище. Отже, позитивною вважається робота, що виконується навколишнім середовищем.

Для аналізу дисипації енергії, що підводиться ззовні авторами роботи [6] показано, що в умовах аномально низького тертя та зношування на поверхні утворюється квазіупругий шар. В центральній її частині гіпотетично можлива гідродинамічна деформація, а на периферії в перехідній зоні слід очікувати інтенсивну ротаційну пружно-пластичну

деформацію, аналогічну структурі вихроутворення в пристінному шарі при перебігу рідини. Такий підхід, на наш погляд, є обґрунтованим в описі квазіупругої взаємодії поверхневого шару і ротаційної пластичної деформації підповерхневого шару при аномально низькому терті та зношуванні заснованої на реологічній моделі Шведова, рис. 1.

Мірою енергії хвиль є об'ємна щільність кінетичної енергії середовища 1, а об'ємна щільність потенційної енергії середовища представлена комбінацією тіла Ньютона і Гука в підповерхневому шарі 2. При досягненні енергії критичної величини відбувається дисипація в тілі Сен-Венана, яка частково перетворюється в кінетичну при подальшому взаємодії, і частково перетворюється в тепло в результаті ротаційної рухомості, а також накопичується у вигляді внутрішньої енергії в результаті мікроструктурних змін (по суті, відбувається наноструктурування в цій області). Таким чином, ротаційна рухомість представляє собою також імпульсний (хвильовий) процес.

Як відомо в теорії коливань найпоширеніша характеристика динаміки взаємодії мас описуються рівняннями Лагранжа. Класичним прикладом такої характеристики є врівноваження лінійного осцилятора вимушеною гармонічною силою $P(t) = P \sin \omega t$ і здійсненням пружних коливань з амплітудою $X(t)$.

Енергетичний обмін в цьому випадку може бути оцінений за схемою, запропонованою А.Д. Дубініним [10].

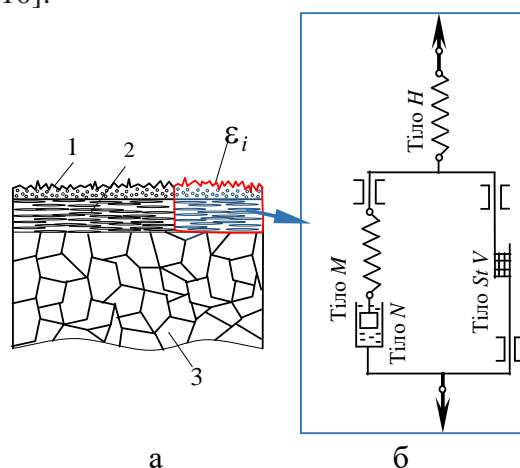


Рис. 1. Реологічні і фрактографічні особливості поверхневого шару трибоелементів, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування: а – реологічні особливості (1 – квазіупругий поверхневий шар тіло H (Гука); 2 – шар наноструктурування (ϵ_i – окремо взаємодіючі елементи ансамблю); 3 – основа); б – реологічна модель (Шведова) лінійного осцилятора в поверхневому шарі, що працює за принципом аномально низького тертя та зношування

Пружне середовище, (трибоелементи, робоче середовище), в якій генеруються і поширюються поперечні та поверхневі хвилі, оцінюються мірою об'ємної щільності кінетичної енергії середовища E_k :

$$E_k = \frac{dE_k}{dV} = \frac{\rho v_1^2}{2},$$

а об'ємна щільність потенційної енергії E_p , яка накопичується в підповерхневому шарі трибоелементів в результаті адгезійної та деформаційної взаємодії, оцінюється так:

$$E_p = \frac{dE_p}{dV} = \frac{\rho v_2^2 \epsilon}{2},$$

де dE_k і dE_p – кінетична та потенційна енергія елементарних об'ємів dV ;

v – фазова швидкість хвиль у середовищі;

ϵ – відносна деформація.

Загальна енергія в результаті пружної взаємодії мікрошорсткості дорівнює:

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho(v_1^2 + v_2^2)\epsilon}{2}.$$

Так як об'ємна щільність енергії хвиль залежить від координат і часу, то швидкість її перенесення дорівнює швидкості переміщення в просторі. Досягнення квантової теорії дозволяє стверджувати, що енергія хвиль переноситься дискретно – фононами.

Основною формою поглиненої внутрішньої енергії при зовнішньому терті є тепло-виділення. При наявності «ідеальної» дисипативної структури в умовах аномально низького тертя та зношування матиме місце повний баланс між поглинутою внутрішньою енергією і виділенням теплом, що підтверджено результатами експериментальних досліджень [1]. Такий термодинамічний цикл відноситься до сталого режиму тертя з мінімальною інтенсивністю зношування, енергетичні витрати на який практично дорівнюють нулю.

При порушенні балансу, коли зовнішня енергетична взаємодія буде перевищувати виробництво тепла, частина поглиненої енергії почне накопичуватися в контактних шарах і трансформуватися в інші недисипативні форми. Цей ланцюжок енергетичних перетворень буде довершатися доти, поки поглинена внутрішня енергія не виродиться в дисипативний вид і відновиться баланс між енергією, що підводиться і виділенням теплом.

При переході трибосистем з умов нормального механохімічного зношування до умов аномально низького тертя та зношування [11] механічна енергія, що підводиться поглинається поверхневим шаром, тілом, що третє у вигляді пружної енергії деформації. Пружні коливання на плямах фактичного контакту мають потенційні можливості для перетворення в інші енергетичні види, а саме відбувається дисипація поглинання внутрішньою енергією в результаті кінетичного стану (прискорення) як проміжна стадія між механічною енергією, що підводиться і її виродженням при кінетичній взаємодії. Дані взаємодії відносяться до зворотної енергетичної форми. Вони контролюють процеси структурних перетворень і в своїй подальшій еволюції наближаються до необоротних форм. Зворотні енергетичні форми мають потенційні можливості для перетворення поглиненої внутрішньої енергії при зовнішньому терті в інші енергетичні види, а саме зниження накопиченої енергії в контактних шарах при припиненні енергетичної взаємодії. Найбільш природним в поясненні квазіпружної взаємодії ефективного об'єму мікрошорсткості уявлення його як марківського процесу з двома дискретними станами, зокрема «Двосторонньої реакції», що пропонує можливість в системі тільки перехід 1→2 (1-ий стан x_k – відновлення, 2-ий стан x_j – розпад), наприклад, деформації та відновлення первісної форми ефективного об'єму.

Для зазначеного процесу справедливе рівняння А. М. Колмогорова:

$$\frac{\partial p_1(t_1 x_k)}{\partial t} = \sum_i A_{jk}(t) p_1(t_1 x_j), \quad (10)$$

де $p_1(t_1 x_k)$ – одновірність стану;

$$A_{jk} = \left[\frac{\partial p(u_1 x_k / t_1 x_j)}{\partial u} \right]_{u=t};$$

де $p(u_1 x_k / t_1 x_j)$ – ймовірність переход із стану x_k у стан x_j , так що з урахуванням нормування $A_{jk}(t) \geq 0 (j \neq k)$;

$$\sum_k A_{jk}(t) = 0.$$

Стосовно до безлічі локальних взаємодій, мікросороткість розглядають як в теоретичному, так і в експериментальному ключі. Ймовірність знаходження елементарного контакту в одному зі станів двохстадійної моделі, залежить від часу t_n і не залежить від передісторії. Рішення раніше сформульованого рівняння є дифузійним марківським процесом. Очевидно, що для його вирішення потрібно накласти обмеження на праву частину рівняння, зокрема прийняти, що вектор навантаження $q(t)$ являє собою дельта корельований в часі процес. Дана умова досягається при проведенні експериментальних досліджень програмним навантаженням.

При імпульсному впливі на завершальному етапі програмного навантаження відбувається найпотужніша питома концентрація енергії на мікроконтактах, що переводять матеріал в стан «магма-плазми» [6] з особливими властивостями.

Умови нерівноважної самоорганізації в цьому випадку супроводжуються процесами, неузгодженими з традиційними принципами термодинаміки рівноважних систем, зокрема в даному випадку виникає стан авторегулювання ентропії, що обумовлений процесами симетрії флуктуацій відповідно до принципів найменшої дії (за Г. Ніколісом та І. Пригожиним) [11].

Вводячи позначення $p_1(t,1) = p_1(t)$ – ймовірність існування в системі стану 1 (відновлення), вважаючи процес однорідним в часі і α, β – постійними величинами, запишемо:

$$A_{12} = \alpha \delta t; A_{21} = \beta \delta t; \alpha + \beta = \lambda,$$

де $\alpha \delta t; \beta \delta t$ – ймовірності переходів $1 \rightarrow 2$ (розпад) і $2 \rightarrow 1$ (відновлення) за час δt .

Рівняння (10) можна записати у вигляді системи:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_1}{\partial t} = -\alpha p_1 + \beta p_2 \\ \frac{\partial p_2}{\partial t} = -\alpha p_2 + \beta p_1 \end{cases} \quad (11)$$

Вирішуючи рівняння (10) при початковій умові $t = 0, p_1 = 1$ (відновлення), отримаємо:

$$p_1(t) = e^{-\lambda t} + \frac{\beta}{\lambda(1 - e^{-\lambda t})}; \quad (12)$$

$$p_2(t) = \frac{\beta}{\lambda(1 - e^{-\lambda t})}. \quad (13)$$

Двохстадійна модель, ототожнюючи стан 1 (відновлення) з контактом, що знаходиться в стані зчеплення, а стан 2 (розпаду зв'язку) – з контактом в стані проковзування, вирази (12) і (13) можна трактувати як ймовірності знаходження контактів в зазначених станах або як відносні числа таких контактів, що знаходяться в системі в кожен даний момент часу t . Таким чином, оцінюючи стаціонарність і, отже, ергодичність [12], розглядаючи моделі мікроконтакту шорсткості відповідно виразам (12) і (13), видно, що при $t \rightarrow \infty$ дане рівняння має стаціонарні рішення:

$$p_1(\infty) = \frac{\beta}{\lambda}; p_2(\infty) = \frac{\beta}{\lambda}.$$

Так як ймовірність $p_1(t)$ пропорційна числу контактів, що знаходяться в стані зчеплення (якщо ввести елементарну силу тертя зчеплення, що припадає на один контакт), то вираз (12) відповідає залежності сили тертя спокою $F_{\text{тсп}}$ (і коефіцієнта тертя μ) від тривалості нерухомого контакту, яка встановлена І. В. Крагельським:

$$F_{\text{тсп}} = F_{\infty} - (F_{\infty} - F_0)e^{-\nu t} = F_0 e^{-\nu t} + F_{\infty}(1 - e^{-\nu t}), \quad (14)$$

де F_∞ – сила тертя, що відповідає нескінченно тривалому контакту;

F_0 – сила тертя при нульовому часі контакту.

У тісному зв'язку з двохстадійною моделлю дана імовірнісна інтерпретація швидкісної залежності сили відриву повзуна від поверхні диска, що обертається володіє рухомістю при певних умовах контактної взаємодії [3].

Так, для оцінки відносного числа (ймовірності) P зв'язків, що існують в системі (і розриваються в момент їх проковзування від поверхні абсолютно пружного тіла при постійній швидкості ковзання v можна записати:

$$P = P_{01}e^{-\alpha v} + P_{02}(1 - e^{-\beta v}),$$

де P_{01} , P_{02} – відносне число мікрошорсткостей, що знаходяться в кожному із станів при $v = 0$, $v = \infty$ відповідно;

α , β – коефіцієнти.

Із порівняння (14) та (12) після переходу до коефіцієнта тертя μ :

$$\mu_\infty = \frac{\beta}{\lambda} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}.$$

Рівняння (13) відноситься до сили тертя руху. При числі станів моделі з великою кількістю мікроконтактів, рівняння містить коливальне рішення, що повинно супроводжуватися зменшенням сили тертя.

З огляду на різницю в висоті мікронерівностей при русі, формується дискретна послідовність імпульсів сили тертя з випадковими амплітудами α_v і моментами виникнення t_v , що відповідає елементарним зсувам взаємодіючих мікроскопічних зон, що труться. На основі цієї системи імпульсів, що апроксимується, наприклад, δ -імпульсами [8], можна побудувати безперервну випадкову функцію $x(t)$ і відповідний їй випадковий процес шляхом усереднення по досить великих інтервалах часу $\partial t'$ між окремими елементарними імпульсами:

$$x(t) = \int \sum_v \alpha_v \delta(t' - t) dt'. \quad (15)$$

Фізично це відповідає фіксуванню результуючих зсувів (пружна хвиля) на досить великих мікроділянці поверхонь тертя. У свою чергу, цей усереднений по інтервалах часу випадковий процес апроксимується марківським, тобто передбачається, що його функція розподілу $v(tx/t_0x_0)$ описується рівнянням Фокера-Планка:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial A(x_1t)v}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B(x_1t)v}{\partial x^2}, \quad (16)$$

де A , B – коефіцієнти [13].

Далі вводимо умовне середнє $\bar{x}(t)$ по зсувах, але вже для процесу (15) в припущенні, що в момент t_0 :

$$\bar{x} = x_0; \quad \bar{x}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} xv \left(\frac{t_1x}{t_0x_0} \right) dx.$$

Побудуємо феноменологічне рівняння руху:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Av dx = A(\bar{x}_1t), \quad (17)$$

шляхом множення рівняння (15) на x і інтегрування по x в межах від $-\infty$ до $+\infty$, припускаючи, що проінтегровані члени в нескінченності звертаються в нуль.

При цьому рівняння (17) збігається зі звичайним рівнянням динаміки для деякої матеріальної точки за умови $A(\bar{x}_1t) = a(t)\bar{x} + b(t)$.

Таким чином, рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова еквівалентне стохастичному рівнянню динаміки [13]. Використання рівняння для опису руху ефективного об'єму взаємодії, що знаходиться в стані зчеплення, так само, як і розбиття діючої на нього стохастичної сили реакції на середню і флуктуючу частини в зазначених рамках, видається цілком зрозумілим і допустимим. При цьому ефективну масу можна розглядати просто як якийсь коефіцієнт пропорційності, що входить в $A(x, t)$. З урахуванням зв'язку рівнянь (15) і (17) можна сформулювати сенс експоненціального розподілу по енергіях для системи мікроконтактів, що знаходяться в стані зчеплення.

Оскільки існує стаціонарне рішення рівняння Фокера-Планка (16) $\partial v / \partial t = 0$, то:

$$j = -Av + \frac{1}{2} \frac{\partial Bv}{\partial x} = \text{const} .$$

Припустимо, що стаціонарний потік j на межі $x(t)$ області зміни дорівнює нулю, тоді після інтегрування отримаємо імпульс сили тертя:

$$v(x) = \frac{C}{B(x)} e^{\int_0^x \frac{A(s)}{2B(s)} ds} ,$$

де C – постійна, що визначається з умов нормування. Якщо при постійних A, B покласти:

$$\int_0^{x(t)} \frac{A(S)}{2B(S)} dS = \frac{Ax}{2B} = -\frac{\Delta E}{\Theta} ,$$

де ΔE – енергія контакту в стані зчеплення;

Θ – модуль канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту [14].

Використовуючи даний підхід функція розподілу імпульсів сили тертя на локальних ділянках апроксимується марківським процесом і описується рівнянням Фокера-Планка. На підставі рішення цього рівняння отримано вираз результуючого імпульсу сили тертя для стаціонарних умов роботи трибосистеми в умовах аномально низького тертя та зношування. Вираз імпульсу сили в цьому випадку не відображає саморегулювання при досягненні рівності між молекулярно-механічною і хвильовою складових сил тертя при зміні зовнішніх умов, наприклад, при зміні навантаження. Тому підсумковий вираз для імпульсу сили тертя матиме такий вигляд:

$$v(x(t)) = e^{-\frac{\Delta E(\bar{\varepsilon})}{\Theta}} .$$

Оскільки введене нами поняття про кількість механічних квантів $\bar{\varepsilon}$ дозволяє стверджувати, що в контактному елементарному об'ємі за рівноважну шорсткість відповідає певна кількість механічних квантів, то енергія контакту в стані зчеплення залежить від $\bar{\varepsilon}$, $\Delta E = \Delta E(\bar{\varepsilon})$. Можна припустити, що енергія контакту в стані зчеплення має нелінійну залежність. По суті це величина накладає граничні умови на швидкість взаємного переміщення, достатній для квантування енергетичного обміну при еволюції трибосистеми від нормального тертя до аномально низького тертя. Даний розподіл $v(x(t))$ є еквівалентним, але вже не для системи мікрозміщень, а для системи індукованих ними в поверхневих шарах біжучої хвилі в кінетичному нанополі, яке задається модулем канонічного розподілу енергії, Θ за всіма взаємодіючим елементарним осциляторам.

Висновки

Проведені дослідження показують, що основною причиною переходу трибосистем до аномального тертя та зношування є реологічні властивості поверхневого шару.

Проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки.

1. Аналіз контактної взаємодії шорсткостей за моделлю твердого тіла у вигляді міжатомних зв'язків дало можливість оцінити енергію, яка виділяється при руйнуванні зв'язків у результаті проковзування мікрошорсткостей. Вона складає чверть від величини енергії, яка витрачена на подолання сил тертя.

2. Оцінка взаємодії, як марківського процесу з двома двосторонніми станами (розпад і відновлення), дозволила отримати математичну залежність узагальненої складової імпульсу сили на плямі контакту від енергії контакту в стані зчеплення і параметру розподілення плям контакту за модулем канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту.

3. Головною умовою при переході аномально низького тертя та зношування є формування на поверхні тертя певного градієнта фізико-механічних властивостей, які описані реологічною моделлю Шведова.

4. Оптимізацією реологічної побудови поверхневого шару реальних трибосистем вдалося досягти умов, коли дисипативний об'єм в умовах контактної взаємодії здатний зворотно трансформувати (розсіювати) енергію зовнішнього руху. Практично вдалося реалізувати «ідеальні» умови дисипації зовнішньої енергії, що підводиться по хвильовому каналу і уникнути процесу зношування в трибосистемі та позбавитися від зовнішнього тертя. Дану технологію можна віднести до розряду ресурсозберігаючих з високим ступенем енергоефективності.

5. Наявність при зовнішньому терті хвильової складової показує значну різницю між молекулярною і механічною складовими сили тертя.

Список використаних джерел

1. Якубов Ф. Я. Синергетика и процессы самоорганизации при трении и изнашивании, *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2010. – № 5. – С. 122–133.
2. Стадніченко В. Н., Трошин О.Н., Приймак А.В. и др. Прогнозирование ресурса трибосистем, работающих в режиме наноизнашивания, методом акустической эмиссии, *Збірник наукових праць ХУПС*. – 2010. – № 4 (26) – С. 41–48.
3. Запорожец В. В., Стадніченко В.М., Трошин О.М. Механізм дисипації енергії при терті металокерамічного шару в технологіях триботехнічного відновлення деталей машин і механізмів, *Системи озброєння і військова техніка*. – 2010. – № 2 (22). – Х.: ХУПС, – С. 113–118.
4. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма, *В кн.: Известия КГТУ*. – Калининград, 2007. – № 11. – С. 22–31.
5. Макаров З. Ю. Рациональный статус случайности в научном детерменизме, *Філософія науки: традиції та інновації*. – 2014, № 2 (10). – С. 60–73.
6. Погодаев Л. И. Структурно-энергетические модели поведения (надежности) материалов при импульсном нагружении, *Трение, износ, смазка*. – 2013. – Т. 15, № 57. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tribo.ru/>.
7. Васильев А. С., Дальский А. М., Золотаревский Ю. М., Кондаков А. И. Направленное формирование свойств изделий машиностроения: монография, – М.: *Машиностроение*, 2005. – 384 с.
8. Ханин М. В. Механическое изнашивание материалов, – М.: *Изд. стандартов*, 1984. – 152 с.
9. Баранов А. В., Вагнер В. А., Тарасевич С. В. и др. Самоорганизация трибосистем при граничном трении металлов, *Ползуновский вестник*, № 1-2, 2009. – С. 155–158.
10. Трошин О. Н. Термодинамические условия достижения аномально низкого трения и изнашивания в трибологии, *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2017. – № 2 (51). – С. 161-165.

11. Stadnichenko V. M., Troshin O. M. Gray's Paradox and Wave Solutions in Explaining Anomalously Low Friction and Wear in Tribology, *International Journal of Materials Science and Applications*. 2016. Vol. 5, № 1. – P. 23–30.
12. Арнольд В. И., Авец А. Эргодические проблемы классической механики, – Ижевск: *Ижевская республиканская типография*, 1999. – 284 с.
13. Лившиц Н. А., Пугачев В.Н. Вероятностный анализ систем автоматического управления, – М.: *Советское радио*, 1963. – 484 с.
14. Корчагин В. Г., Кравцов Л. Я., Садомов Ю. Б., Хохлов Л. М. Измерение вероятностных характеристик случайных процессов стохастических вычислительных устройств, –Л.: *Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние*, 1982. – 128 с.

References

1. Jakubov F. Ja. 2010. Sinergetika i processy samoorganizacii pri trenii i iznashivanii. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni*. – No. 5. – pp. 122-133. [in Russian].
2. Stadnichenko, V.N., Troshin, O.N., Priymak, A.V., Kisel, E.A., Veretelnikov, R.S. and Gurzhiy, K.A. 2010. Prognozirovanie resursa tribosistem, rabotayuschih v rezhime nanoiznashivaniya, metodom akusticheskoy emissii. *Zbirnyk naukovykh prats KhUPS*. – No. 4(26), pp. 41-48. [in Russian].
3. Zaporozhets, V.V., Stadnichenko, V.N. and Troshin, O.M. 2010. Mehanizm disipatsiyi energii pri terti metalokeramichnogo sharu v tehnologiyah tribotekhnichnogo vidnovlennya detaley mashin i mehanizmiv. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. No. 2 (22), pp. 113-118. [in Ukrainian].
4. Fedorov, S. V. 2007. *Obshhie zakonomernosti jevoljucii trenija s pozicij samoorganizacii i sinergizma*. V kn.: *Izvestija KGTU*. – Kaliningrad. – No. 11. – pp. 22–31. [in Russian].
5. Makarov Z. Ju. 2014. Racional'nyj status sluchajnosti v nauchnom determenizme. *Filosofia nauky: tradytsii ta innovatsii*. – No. 2 (10). – pp. 60–73. [in Russian].
6. Pogodaev L. I. 2013. Strukturno-jenergeticheskie modeli povedenija (nadezhnosti) materialov pri impul'snom nagruzenii. *Trenie, iznos, smazka*. – Vol. 15, No 57. available at: www.tribo.ru/ (accessed 17 March 2015). [in Russian].
7. Vasil'ev, A. S., Dal'skij, A. M., Zolotarevskij, Ju. M. and Kondakov, A. I. 2005. Napravlennoe formirovanie svojstv izdelij mashinostroenija: monografija. pod red. A. I. Kondakova. – М.: *Mashinostroenie*, – 384 p. [in Russian].
8. Hanin M. V. 1984. *Mehanicheskoe iznashivanie materialov*. – М.: *Izd. standartov*, – 152 p. [in Russian].
9. Baranov, A. V., Vagner, V. A., Tarasevich, S. V. and Bykova, O. V. 2009. Samoorganizacija tribosistem pri granichnom trenii metallov. *Polzunovskij vestnik* No. 1-2, – pp. 155–158. [in Russian].
10. Troshin O. N. 2017. Termodinamicheskie uslovija dostizhenija anomal'no nizkogo trenija i iznashivaniya v tribologii. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*. – No. 2 (51). – pp. 161-165. [in Russian].
11. Stadnichenko V. M. Gray's Paradox and Wave Solutions in Explaining Anomalously Low Friction and Wear in Tribology / V. M. Stadnichenko, O. M. Troshin // *International Journal of Materials Science and Applications*. 2016. Vol. 5, № 1. – P. 23–30.
12. Arnold, V. I. and Avec, A. 1999. *Jergodicheskie problemy klassicheskoy mehaniki*. Izhevsk: *Izhevskaja respublikanskaja tipografija*. 284 p. [in Russian].
13. Livshic, N. A. and Pugachev, V. N. 1963. Veroyatnostnyj analiz sistem avtomaticheskogo upravlenija. – М.: *Sovetskoe radio* – 484 p. [in Russian].
14. Korchagin, V. G. Kravcov, L. Ja., Sadowov, Ju. B. and Hohlov L. M. 1982. *Izmerenie veroyatnostnykh harakteristik sluchajnykh processov stohasticheskikh vychislitel'nykh ustrojstv* – Jenergoatomizdat: Leningr. otd-nie, – 128 p. [in Russian].