

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Журавльов Дмитро Юрійович

УДК 62.592.113

**СИНТЕЗ І АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ
СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ**

Спеціальність 05.05.05 – піднімально-транспортні машини
Галузь знань 13 – механічна інженерія

Реферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу та Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Вольченко Олександр Іванович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри будівельних і дорожніх машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Суглобов Володимир Васильович,
Приазовський державний технічний університет, доктор технічних наук, декан факультету машинобудування та зварювання, професор кафедри підйомно-транспортних машин та деталей машин

доктор технічних наук, професор
Бойко Андрій Олександрович,
Національний університет «Одеська політехніка», доктор технічних наук, директор інституту електромеханіки та електротехніки, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту

доктор технічних наук, професор
Стечишин Мирослав Степанович,
Хмельницький національний університет, доктор технічних наук, професор кафедри машинознавства та агроінженерії

Захист відбудеться “19” грудня 2024 р. о 12:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.05 у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, зала засідань.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна) та на сайті спеціалізованої вченої ради університету: <https://www.khadi.kharkov.ua/science/specializovani-vcheni-radi/d-6405905/>

Автореферат розісланий “18” листопада 2024 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради к.т.н., доц.



В. М. Рагулін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне вітчизняне і зарубіжне гальмобудування розвивається в двох основних напрямках: удосконалення відомих конструкцій, їхніх фрикційних вузлів, методів розрахунку і випробувань і створення принципово нових конструкцій гальмових пристроїв. Удосконалення конструкцій і створення нових фрикційних вузлів гальмових пристроїв тісно пов'язане з вирішенням оптимізаційних завдань, характерних як для окремих елементів пари тертя, так і для розглянутих вузлів тертя. До їх числа відносяться багатокритеріальні задачі вибору раціональних співвідношень геометричних, силових, теплових і зносо-фрикційних характеристик, мінімізації маси металевих елементів тертя, габаритних розмірів і зносу робочих поверхонь виконавчої фрикційної пари гальма. Сучасні методи розрахунків і проєктування фрикційних вузлів гальмових і передавальних пристроїв не вирішують в комплексі завдання поетапного наскрізного проєктування оптимальних вузлів тертя гальмових пристроїв аперіодичного режиму роботи. Основним недоліком відомих методів розрахунку і проєктування фрикційних вузлів гальмових пристроїв є відсутність елементів теорії робастичності. Останній базується на структурній схемі оцінки якості фрикційних вузлів гальмових пристроїв, зокрема стрічково-колодкового гальма бурової лебідки (рис. 1).

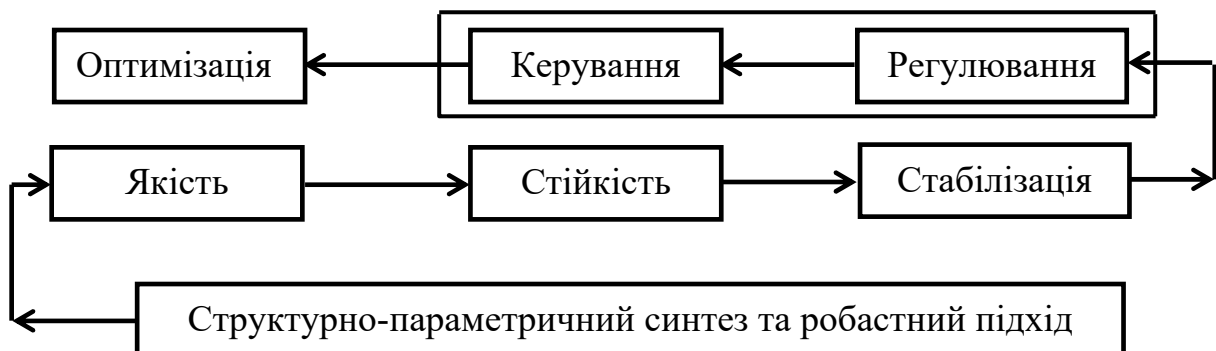


Рисунок 1 – Структурна схема оцінки фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм

Алгоритм синтезу фрикційного вузла формують відповідно до технічних умов на пару тертя гальма, в яких повинні враховуватися для матеріалів пари складові їхніх поверхневих і приповерхневих шарів, що розглядаються на нано-, мікро- та мілі-рівнях. При цьому необхідно враховувати роботу виходу електронів, їхню дебаєвську довжину пробігу, рівень Фермі, тип контакту (омічний, нейтральний, блокуючий) і його електро- і теплопровідність, а також умови зниження трибоефекту. При цьому розглянуто утворення нових пар тертя «полімер-полімер» і «метал-метал» за рахунок масопереносу. Окрім того, необхідно враховувати ефект трибокрекінгу поверхневого шару накладки, який призводить до інтенсифікації водневого зношування металевих елементів тертя, особливо при температурах вище допустимої для її матеріалу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи є частиною планових державних науково-дослідних робіт з розвитку нафтоп-

ромислового комплексу України і базується на результатах держбюджетних науково-дослідних робіт «Наукові обґрунтування раціональних режимів роботи та вибір основних параметрів бурового обладнання», номер державної реєстрації №019511026337. У 2007 р. згідно з грантом президента України виконано науково-дослідну роботу «Теорія, розрахунок та конструювання нових типів фрикційних пристроїв бурових лебідок», номер державної реєстрації №0107U004644. Виконано держбюджетну тему Д-4-15-Ф з терміном закінчення 01.01.2018 р. «Розробка наукових основ створення з'єднань з металополімерних композитних матеріалів та керування їх зносо-фрикційними та втомними властивостями», номер державної реєстрації №0115U002279.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – підвищення ефективності фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм з урахуванням робастних властивостей їхніх трибосистем і запобігання виникненню при цьому негативних наслідків.

Для вирішення комплексної робастної проблеми розглянуто такі задачі:

- провести системний аналіз закономірностей зміни експлуатаційних параметрів стрічково-колодкового гальма з урахуванням їхнього впливу на стан плям контакту мікровиступів металополімерних пар тертя;
- оцінити якість фрикційних систем за допомогою прямих показників і непрямих критеріїв і відслідкувати процеси зародження і розвитку в них перехідних процесів;
- проаналізувати умови забезпечення стійкості дискретного контакту при фрикційній взаємодії мікровиступів пари тертя "накладка-обід шківів" методом розширених амплітудно-фазочастотних характеристик стійкості Найквіста;
- установити вплив збурюючих факторів на ступінь дестабілізації експлуатаційних параметрів фрикційних вузлів гальма;
- оцінити енергонавантаженість пар тертя гальм і вплив на неї умов регулювання і керування експлуатаційними параметрами;
- виконати структурно-параметричний синтез робастних систем при керуванні режимами роботи стрічково-колодкового гальма бурової лебідки;
- оптимізувати конструктивні та експлуатаційні параметри фрикційних вузлів гальма за допомогою геометричного програмування і багатокритеріального методу;
- провести енергетичну оцінку ресурсу фрикційних накладок вузлів тертя гальма.

Об'єкт дослідження. Процеси, явища та ефекти при електротермомеханічній фрикційній взаємодії пар тертя.

Предмет дослідження. Закономірності зміни внутрішніх та зовнішніх експлуатаційних параметрів пар тертя, отриманих на основі структурно-параметричного синтезу.

Методи дослідження. При виконанні досліджень використано: аналітичний, чисельний та розрахунково-експериментальний методи встановлення закономірностей зміни внутрішніх та зовнішніх експлуатаційних параметрів пар тертя, математичної статистики та регресивного аналізу для обробки експериментальних даних; теорії: напружено-деформованого стану; теплопровідності, теплопередавальних процесів для оцінки виду супроводжуваних їх полів та виникаючих при цьому градієнтів; принципи підходу до трибосистеми як до робастної системи, а також методи

прийняття рішень при конструюванні ефективних та енергоємних важконавантажених фрикційних вузлів.

Наукова новизна отриманих результатів. Уперше теоретично обґрунтована і практично підтверджена ефективність робастного підходу до синтезу і аналізу працездатності трибосистеми, якою є фрикційний вузол, при розрахунку та проєктуванні його елементів. При цьому вперше:

- удосконалено методи розрахунку параметричного синтезу пар тертя фрикційних вузлів з урахуванням енергетичних рівнів їхніх поверхневих і приповерхневих шарів;
- запропоновано методи регулювання і керування енергонавантаженистю пар тертя стрічково-колодкових гальм при їхніх прогнозованих зовнішніх експлуатаційних параметрах, які перебувають у стійкому і стабільному стані;
- відкрито нове явище масопереносу продуктів тертя (що є збурюючим фактором) у металополімерних парах тертя стрічково-колодкових гальм;
- розроблено енергетичний метод оцінки інтенсивності зносу робочих поверхонь фрикційних накладок з одночасним вибором їх раціональних конструктивних параметрів;

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримано здобувачем самостійно, вони полягають у такому:

- запропоновано робастний підхід з його підкатегоріями для розрахунку та проєктування фрикційних вузлів [1–4, 23, 24, 27, 28, 36, 50, 82 та ін.] з урахуванням якості процесів [20, 21, 22, 32, 33, 34, 37–39, 43, 44, 47, 49, 69–71, 74, 77 та ін.], стійкості та стабільності експлуатаційних параметрів [19, 21, 29, 30, 41, 45, 48, 51 та ін.], методи регулювання та керування експлуатаційними параметрами [10, 16, 17, 18, 25, 30, та ін.], а також режимами роботи гальма [12, 35, 73, 75, 80–90 та ін.];
- відкрито нове явище масопереносу продуктів електротермомеханічного тертя в металополімерних парах тертя гальма [6];
- оптимізовано конструктивні та експлуатаційні параметри фрикційних вузлів гальма [26, 46, 57, 67, 68 та ін.];
- розроблено нові та вдосконалено існуючі типи фрикційних вузлів різних видів гальм з покращеними ефективністю та енергоємністю [52–56, 58–66 та ін.] й оцінено їхні величини [9, 11, 72, 78 та ін.];
- оцінено довговічність робочих поверхонь фрикційних накладок різних типів фрикційних вузлів гальм [42, 79 та ін.];

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи доповідались і обговорювались на: 10-му та 12-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків (2011, 2015, 2023 рр., м. Львів); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», (2011р., м. Вінниця); міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 50-ти річчю з дня створення кафедри машини і обладнання технологічних процесів КНУБА «Енергоощадні машини і технології» (2013 р., м. Київ); п'ятій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINT-2013)» (2013 р., м. Херсон); LXXI науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Київського національного транспортного університету

(2015 р., м. Київ); всеукраїнській науково-технічній конференції «Нафта і газ. Наука-освіта-виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку» (2015, 2017, 2022, 2023 рр., м. Дрогобич); міжнародній науково-технічній конференції "Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу" (2016 р., м. Івано-Франківськ); IV міжнародній науково-технічній конференції "Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей" (2016 р., м. Луцьк); V міжнародній науково-технічній конференції студентів та молодих вчених: «Перспективи 21 сторіччя» (19 квітня та 15 вересня 2017 р, м. Краматорськ); VI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи інновацій у суспільстві та розвитку технологій» (2017 р., м. Харків); Scientific thought transformation: proceedings of X International scientific conference (Morrisville, 2017 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи нарощування ресурсної бази» (ІГГ – 2018 р., м. Івано-Франківськ, 2018 р.); IX міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи сучасної науки» (2018 р., м. Дніпро); Perspectives of science and education: proceedings of 6th International youth conference (2018 р., New York, USA); Science progress in European countries: new concepts and modern solutions: Papers of the 5th International Scientific Conference (2019 р., Stuttgart, Germany); Perspectives of science and education: proceedings of 12th International youth conference (2019 р., New York, USA); Advances of science: proceedings of articles the international scientific conference (2019 р., Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv); Dynamics of the development of world science 24 hours of participation (2020, 2021 р., Canada, Vancouver); міжнародній конференції Розбудова і відновлення машинобудівного комплексу України, ХНАДУ (Харків, 2023 р.), наукових семінарах кафедр: технічної механіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (м. Івано-Франківськ); будівельних і дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості цілеспрямованого розрахунку і проектування фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма на основі:

- систематизованого визначення допустимих меж зміни динамічних і теплових параметрів та їхніх градієнтів з урахуванням причинно-наслідкового зв'язку;
- розроблення принципів вирівнювання питомих навантажень та поверхневих температур шляхом квазістабілізації їх величин за допомогою комбінованих гальмових стрічок та складених з дисків гальмових шківів;
- систематизованої послідовності закономірностей зміни основних експлуатаційних параметрів пар тертя гальма для ефективного їх проектування;
- удосконалення і розроблення нових конструктивних типів важконавантажених фрикційних вузлів гальмових пристроїв для: підвищення ефективності шляхом регулювання питомих навантажень і збільшення коефіцієнта взаємного перекриття; прогнозування для запобігання утворення мікротріщин на робочій поверхні ободу шківів.

Запропоновані нові типи фрикційних вузлів та гальмових шківів з можливістю керування їхніми динамічними і тепловими режимами захищено патентами на винаходи (патенти на винаходи України та Азербайджану), деякі з них відзначено облас-

ною премією імені Г. І. Терсенова та Азербайджанської республіки).

Одержані результати впроваджено у навчальний процес при викладанні загально-інженерної дисципліни «Механіка машин» ІФНТУНГ і використано у навчальному посібнику «Курс лекцій з підйомно-транспортних машин і тестові завдання» для студентів таких напрямів підготовки: нафтогазова і гірнича справа, сільськогосподарське і загальне машинобудування.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 113 наукових праць, з них, 6 монографій, 3 навчальні посібники, 22 матеріалів конференцій, 7 патентів на винаходи України та Азербайджану, 10 статей з індексом цитування Scopus; 43 статті у фахових виданнях України; 22 статті у наукових виданнях інших країн.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, восьми розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який містить 225 найменувань, 4 додатків. Основну частину дисертаційної роботи викладено на 399 сторінках комп'ютерного набору, дисертація містить 106 рисунків і 33 таблиці.

По тексту автореферату використано такі скорочення: БЛ – бурова лебідка; СКГ – стрічково-колодкове гальмо; ФВ – фрикційний вузол; ПТ – пара тертя; ГС – гальмова стрічка; ФН – фрикційна накладка; ГШ – гальмовий шків; КП і ЕП – конструктивні й експлуатаційні параметри; ПН – питомі навантаження; ДКТ – динамічний коефіцієнт тертя; ПТР – поверхнева температура; ОТР – об'ємна температура; ГТР – градієнт температури; ТО – термічний опір; КВ – коефіцієнт тепловіддачі; КТ – коефіцієнт теплопередачі; МН – механічні напруження; ТН – температурні напруження.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність пошуку напрямків робастного підходу до розрахунку та проєктування фрикційних вузлів СКГ бурових лебідок для підвищення ефективності й енергоємності нових, удосконалених та існуючих важконавантажених їхніх ПТ, які використовуються не тільки в підйомно-транспортних машинах, але й багатьох галузях народного господарства.

Наведено: мету роботи, задачі та методи дослідження, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, а також перелік місць апробацій отриманих результатів.

У **першому розділі** докладно проаналізовано особливості конструкції та режимів роботи фрикційних вузлів СКГ БЛ, навантаженість їхніх пар тертя, енергетичне зношування робочих поверхонь мікроступів та умови утворення мікротріщин на робочій поверхні металевих елементів тертя. Розглянуто робастні системи та їхні складові в різних галузях техніки. Оцінено збурюючі фактори та їхній вплив при робастному підході до трибосистеми, якою виступає ФВ гальма. Наведено аналіз методів оптимізації конструктивних та експлуатаційних параметрів в різних видах гальмових пристроїв. Проаналізовано методи та засоби підвищення ефективності фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма.

Дослідженню динамічних і теплових процесів у парах тертя різних видів гальмових пристроїв та фрикційних муфт присвячено праці В. О. Богомоллова, Є. С. Венцеля, О. І. Вольченка, А. Б. Гредескула, О. В. Григорова, Г. С. Гудза, В. А. Дем'янюка, А. Х. Джанахмедова, Б. І. Костецького, М. В. Кіндрачука, В. С. Ловейкіна, М. А. Подригала, Ю. О. Ромасевича, В. Ф. Семенюка, Я. Є. Фаробіна, F. Char-

ron, H. Dorner, R. Krauser, T. Newcomb, A. Sisson, G. Fazekas, Y. Weib та інших учених. Проте в їхніх роботах не використовувався робастний підхід до розрахунку та проектуванню фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок з їхніми підкатегоріями.

У **другому розділі** сформульовано наукову проблему, висловлено гіпотезу та ідею роботи. Намічено шляхи та етапи досліджень для її вирішення.

Науковою проблемою є розкриття механізму представлення трибосистеми гальма як робастної системи з її неординарними властивостями.

Гіпотеза – необхідність урахування збурюючих факторів, які діють на нано-, мікро- і макрорівнях, при структурно-параметричному синтезі фрикційних елементів стрічково-колодкового гальма бурової лебідки.

Ідеєю роботи є залучення робастного підходу з його складовими властивостями до розрахунку і проектування фрикційних вузлів СКГ.

Показано особливості робастних систем та їхніх підкатегорій. Параметричний структурний синтез спрямовано на: оцінку зовнішніх і внутрішніх параметрів матеріалів ПТ з обов'язковим урахуванням енергетичних рівнів їхніх поверхневих і приповерхневих шарів, розрахунок експлуатаційних параметрів ФВ та конструювання його елементів. При цьому експлуатаційні параметри ФВ повинні забезпечити якість реалізованих процесів, ефектів і явищ, що відбуваються на його робочих поверхнях. Окрім того, при електротермомеханічній фрикційній взаємодії ЕП повинні бути стійкими, стабільними і регульованими. Після проводиться оцінка якості керування режимами гальмування ФВ гальма при отриманих для них ЕП. На останньому етапі розрахунку і проектування ФВ гальма проводиться оптимізація КП їхніх елементів і ЕП вузла тертя.

У **третьому розділі** приділено увагу структурно-параметричному синтезу фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок.

Розглянуто конструкцію і роботу серійного СКГ БЛ, кінематичну схему якого в розімкнутому і замкнутому станах наведено на рис. 2 а, б, в. Гальмо (див. рис. 2 а, б) має ФН 9, встановлені на гальмових стрічках 11, які одним кінцем (з боку збігаючої гілки II стрічки) прикріплені до балансира, а другим (з боку набігаючої гілки I стрічки) – до мотильових шийок колінчастого вала.

Серійні стрічково-колодкові гальма бурових лебідок працюють так. Переміщенням важеля здійснюється поворот колінчастого вала, в результаті якого бурильник затягує гальмову стрічку 11 з ФН 9, і вони сідають на ГШ 1. Процес гальмування в стрічково-колодковому гальмі характеризується такими стадіями: початковою (першою), проміжною (другою) і заключною (третьою). У початковій стадії гальмування ФН 9, розташовані в середній частині ГС 11, взаємодіють з робочою поверхнею гальмового шківів 1. Фронт фрикційної взаємодії поширюється в бік набігаючої I гілки стрічки 11.

Проміжна стадія гальмування характеризується подальшим поширенням фронту фрикційної взаємодії накладок 9 у бік збігаючої II гілки стрічки 11.

Заключна стадія гальмування характеризується тим, що всі майже нерухомі накладки 9 стрічки 11 взаємодіють з робочою поверхнею ободу 2 шківів 1, який обертається. При пригальмуванні послідовність входження поверхонь тертя накладок у контакт з робочою поверхнею ободу шківів є аналогічною. Повний цикл гальмування вважають завершеним, якщо гальмові шківів з барабаном лебідки стають нерухомими.

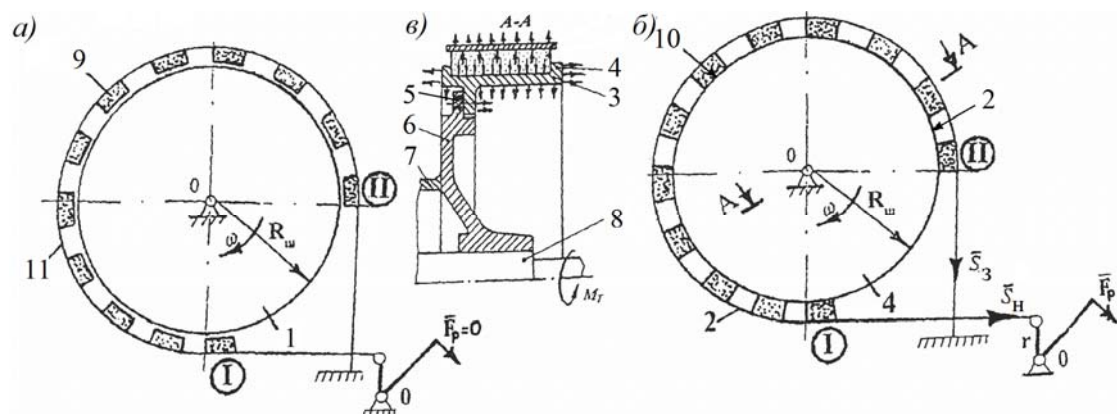


Рисунок 2 а, б, в – Кінематична схема серійного СКГ з розімкненими (а) і замкнутими (б) ФВ (в): 1, 2, 3, 4, 5 – ГШ, робоча і неробоча поверхні ободу, реборди і кріпильний виступ; 6, 7 – фланець барабана; 8 – підйомний вал; 9, 10 – ФН з робочою поверхнею; 11 – ГС з набігаючою (I) і збігаючою (II) гілками; S_H , S_3 – натяги набігаючої і збігаючої гілок ГС; M_T – гальмовий момент; F_p – зусилля робочого; ω – кутова швидкість ГШ; R_w , r – радіуси: робочої поверхні ободу ГШ і кривошипу колінчастого вала

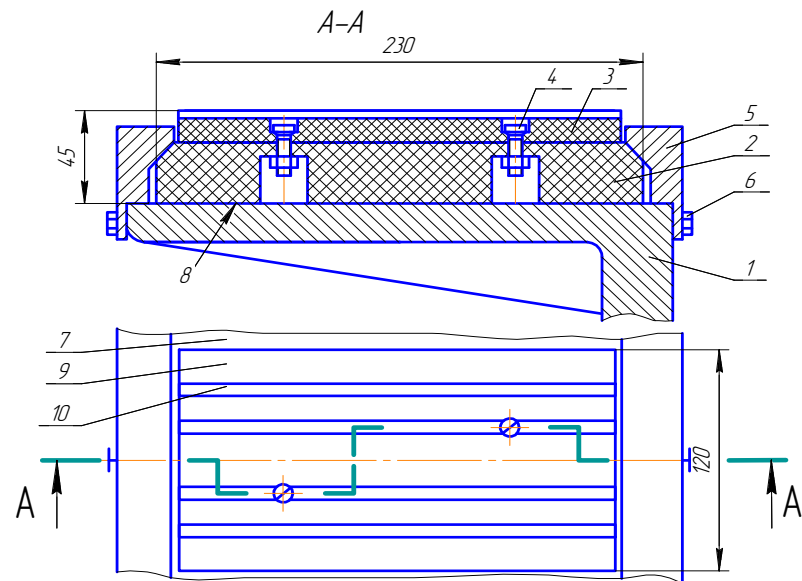


Рисунок 3 – Удосконалений багагопарний ФВ модельного СКГ: 1 – ГШ; 2, 3 – основна (нижня) і додаткова (верхня) ФН; 4 – гвинтове з'єднання; 5 – спеціальні реборди; 6 – болти кріплення реборд; 7, 8, 9 – робочі поверхні ФВ: ГШ, основної та додаткової ФН; 10 – вентиляційні пази

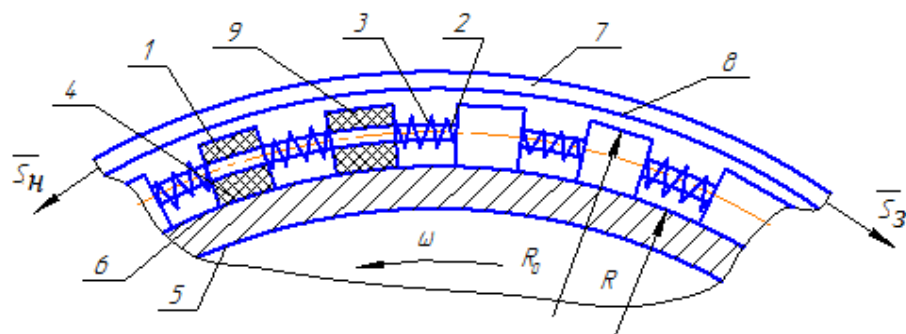


Рисунок 4 – Схема фрикційного вузла стрічково-колодкового гальма з рухомими фрикційними накладками: 1, 4, 9 – фрикційна накладка з внутрішньою і зовнішньою поверхнями; 2, 3 – циліндричні стрижні та пружини; 5, 6 – гальмовий шків і його робоча поверхня; 7, 8 – гальмова стрічка з робочою поверхнею

На рис. 3 і 4 наведено схеми багатопарних фрикційних вузлів СКГ. Перший ФВ має ту особливість, що двоповерхові накладки відносно робочої поверхні ободу є рухомими, а в другому ФВ накладки між собою підпружинені і посаджені з натягом на робочу поверхню ободу шківів. В обох випадках ГС звільнена від ФН, але на конкретних стадіях гальмування виконує функцію металевго елемента тертя, взаємодіючи із зовнішньою поверхнею серійної і двоповерхової накладок. Початкові стадії у фрикційних вузлах проходять аналогічно, тобто має місце фрикційна взаємодія зовнішніх поверхонь накладок з внутрішньою (робочою) поверхнею гальмової стрічки. У другому ФВ це триває до тих пір, поки не відбудеться зрив натягу між робочими поверхнями накладок і ободу шківів. На заключній стадії гальмування перші і другі фрикційні вузли працюють як серійні, оскільки на дузі охоплення гальмової стрічки зовнішніми поверхнями накладок вони нібито «прилипають» до її внутрішньої поверхні.

Сформульовано технічні вимоги до елементів фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм, пари тертя якого при фрикційній взаємодії знаходяться під дією механічної, електричної, теплової, хімічної та електромагнітної енергії полів. При цьому полірована і матові поверхні гальмового шківів перебувають під дією швидкісних полів середовищ, що його омивають.

Установлено ступінь впливу кожного із зазначених вище полів на зміну вихідних параметрів (динамічного коефіцієнта тертя і об'ємної інтенсивності зношування) при допустимій величині енергетичного стану поверхневих і приповерхневих шарів пар тертя гальма.

Відведення теплоти від плям контакту мікровиступів ободу гальмового шківів (в однопарній парі тертя) і гальмової стрічки (у двопарній парі тертя) у глибину його об'єму і в тертьові тіла здійснюється пружними тепловими коливаннями мікрочастинок і тепловим рухом електронів та іонів провідності. У початкові моменти фрикційної взаємодії «стрічка-накладка» відбувається прогрів поверхневих шарів металевих елементів і поширення теплового потоку всередину зі швидкістю, що зменшується. Густина тепловиділення на границі фрикційного контакту є пропорційною роботі тертя:

$$q(\tau) = f(\tau_{me})p(\tau_{me})g_{ков}(\tau_{me}), \quad (1)$$

Установлено, що тепловиділенню передуює електрична складова потужності тертя фрикційного вузла гальма, яка дорівнює:

$$P_{el} = k_{\epsilon} \cdot I \cdot U, \quad \text{Дж/с} \quad (2)$$

де k_{ϵ} – коефіцієнт, що враховує час контакту мікровиступів фрикційної накладки з мікровиступами металевго елемента тертя, $k_{\epsilon}=2 \cdot 10^2$; I – сила струму, яка генерується мікровиступами металополімерних пар тертя за умови, що фактична площа контактування A_r є малою в порівнянні з номінальною A_a , $A_r < A_a$. При $A_r = A_a$ трибоЕРС в спряженні є однаковою; U – трибоЕРС в кінці процесу гальмування, В.

Сила струму I визначається за залежністю вигляду:

$$I = \sqrt{\frac{t_{\max} \cdot \alpha_{\bar{e}} \cdot (dt/dl_k) \cdot V_i \cdot \tau_{\bar{e}ii}}{R_k^* \cdot \rho_a^* \cdot N}}, \quad (3)$$

де t_{max} – максимальна температура на плямі контакту мікровиступів, °С; α_l – коефіцієнт зовнішньої тепловіддачі, Вт/(м²·°С); (dt/dl_k) – ГРТ по довжині контакту, °С/мм; V_m – об'єм мікровиступів плями контакту, м³; $\tau_{кон}$ – час контактування, с; R_k^* – термічний опір контакту, °С/Вт; ρ_e^* – питомий електричний опір, (Ом·мм²)/м; N – імпульсне нормальне зусилля, Н.

Дійсна теплова складова потужності тертя ФВ гальма дорівнює:

$$P_{тепл} = 0,68 \cdot 10^{-3} \omega \cdot M_{\Gamma} = 0,68 \cdot 10^{-3} \frac{g_{ков} \cdot f \cdot N}{2 \cdot \pi}, \quad \text{Дж/с} \quad (4)$$

де M_{Γ} – гальмовий момент, що розвивається парою тертя гальма, Нм.

Хімічна складова потужності перетворень у приповерхневому шарі фрикційної накладки в інтервалі ПТР нижче та вище за допустиму становить:

$$P_{хім} = \sum_{V_1}^{V_2} p_i \Delta V_i, \quad (5)$$

де p_i – поточні питомі навантаження, МПа; ΔV_i – зміна об'єму поверхневого шару накладки внаслідок зношування за одну секунду, м³/с.

Механічна складова потужності тертя фрикційного вузла при заданих параметрах полімерної накладки (на підставі розрахунково-експериментальних даних) визначається за такою залежністю:

$$P_{мех} = 2,63 \frac{r_m \cdot g_{ков} \cdot N}{l_n}, \quad \text{Дж/с} \quad (6)$$

де r_m – зведений радіус мікровиступів поверхонь металевих елементів тертя, м; l_n – довжина ФН; ω – кутова швидкість обертання гальмового шківів, с⁻¹.

З поверхонь (полірованих і матових) гальмового шківів і гальмової стрічки здійснюється тепловіддача випромінюванням омиваючому їх повітрю. Відповідно до закону Стефана-Больцмана коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначається за залежностями, наведеними в табл. 1.

Результати розрахунку за формулою (3) показали, що коефіцієнт α_l збільшується з підвищенням температури поверхонь гальмового шківів і ГС.

Установлено, що величина відношення коефіцієнтів тепловіддачі матової і полірованої поверхонь дорівнює відношенню площ охолоджувальної до нагрівальної поверхні гальмового шківів. Тобто:

$$C_{лм}/C_{лп} = A_o/A_n. \quad (7)$$

Відношення $C_{лм}/C_{лп}$ є величиною сталою, зі збільшенням діаметра гальмового шківів зростає площа його матової поверхні при коефіцієнті взаємного перекриття $k_{63} = 0,7 - 0,8$. Установлено, що площу A_o охолоджувальної матової поверхні гальмового шківів необхідно враховувати в процесах теплообміну через кожні його чотири оберти, а площу A_n нагрівальної полірованої поверхні бігової доріжки тертя – через три оберти гальмового шківів.

Розрахункові залежності складових теплового балансу багатопарних фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма наведено в табл. 1.

У табл.1 в залежностях (8-16) використано такі умовні позначення: $q_1(\tau)$, $q_2(\tau)$ – густина теплового потоку, спрямованого в ГШ і в ГС, відповідно; $q_3(\tau)$ – гус-

Таблиця 1

Оцінка теплового балансу багатопарних фрикційних вузлів СКГ

Складові теплового балансу	Розрахункові залежності
Розподіл теплових потоків між ГШ і ГС, ФН і навколишнім середовищем	$q(\tau) = q_1(\tau) + q_2(\tau) + q_3(\tau) + q_4(\tau). \quad (8)$
Визначення складових виразу (8)	$q_1(\tau) = k_1 q(\tau); \quad (9) \quad q_2(\tau) = k_2 q(\tau); \quad (10)$ $q_3(\tau) = (1 - k_1)q(\tau) + (1 - k_2)q(\tau). \quad (11)$
Густина теплового потоку q_3 , відведеного в навколишнє середовище	$q_3(t) = \alpha_n(t)[t_{uu}(0, \tau) - t_c]. \quad (12)$
У системі «обід шків-накладки- навколишнє середовище» за час τ шків поглинає кількість теплоти Q_1	$\tau = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{n_{uu}}{4}, \quad (12) \quad Q_1 = 2q_1(\tau)A_{uu1} \cdot \tau \quad (13)$
Кількість теплоти Q , відведена за час τ з полірованої доріжки тертя ободу гальмового шків у навколишнє середовище	$Q = \alpha_n(\tau)[t_1(0, \tau) - t_{uu}](nA_{uu} - A_{uu})\tau, \quad (14)$
Сумарна кількість теплоти, що надійшла в обід гальмового шків за час τ	$Q = (2q_1(\tau)A_{uu} - \alpha_n(\tau)[t_1(0, \tau) - t_0](nA_{uu} - A_{uu}))\frac{2\pi n}{\omega 4}. \quad (15)$
Після перетворення виразу (14) отримали середнє значення теплового потоку, акумульованого в тілі ободу ГШ	$q_1(\tau) = q_1(\tau)k_{\text{вз}} - \alpha_n(\tau)[t_1(0, \tau) - t_{uu}](1 - k_{\text{вз}}). \quad (16)$

тина теплового потоку, спрямованого під ФН; $q_4(\tau)$ – густина теплового потоку, відведена в навколишнє середовище конвективним теплообміном і тепловіддачею випромінюванням від полірованої і матової поверхонь ГШ і ГС; k_1, k_2 – коефіцієнти розподілу теплових потоків між ободом ГШ і ГС; α_n – коефіцієнт тепловіддачі; t_{uu}, t_c – температури: робочих поверхонь ободу ГШ і ГС; n_{uu} – кількість обертів ГШ; t_1 – температура поверхні бігової доріжки тертя після чотирьох обертів ГШ при гальмуванні, °С; A_{uu} – площа доріжки тертя ободу ГШ, $A_{uu} = 2\pi R_{uu} B_n$; R_{uu} – радіус ободу ГШ; B_n – ширина ФН; $k_{\text{вз}}$ – коефіцієнт взаємного перекриття, $k_{\text{вз}} = 2A_a / A = l_n / \pi R_{uu}$; l_n – довжина фрикційної накладки.

Оцінку теплового балансу пар тертя проведено у такій послідовності:

1. Визначили інтенсивність взаємодії їхніх полірованих і матових поверхонь зі швидкісними струмами омиваючого повітря.
2. Обчислили коефіцієнти розподілу теплових потоків між елементами пар тертя фрикційних вузлів.
3. Оцінили напружено-деформований стан ободу гальмового шків від дії температурних напружень та їх градієнтів.
4. Розраховували основні характеристики пар тертя фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма в залежності від їхньої енергонавантаженості.

При прогнозуванні характеристик зносу полімерних накладок в сумарній складовій потужності тертя фрикційного вузла гальма істотна роль відводиться тепловій і хімічній складовим.

Структурно-параметричний синтез фрикційного вузла СКГ виконується в такій послідовності: попередній вибір матеріалів пари тертя; вибір конструкції ФВ; проведення циклів випробувань і остаточна конструкція ФВ.

Четвертий розділ присвячено факторам, які мають місце в металополімерних

парах тертя стрічково-колодкових гальм бурових лебідок.

Для дослідження збурюючих факторів у металополімерних парах тертя розглянуто модель трибосистеми ковзання з шістьма рівнями системного підходу, що включає в себе термодинамічну модель з рідинним та газовим середовищем і з урахуванням процесу трибокрекінгу поверхневих шарів фрикційних накладок в інтервалі поверхневих температур 390-450 °С.

Для оцінки температур поверхневих і приповерхневих шарів фрикційних накладок, які є збурюючим фактором, що зумовлює накопичення позитивних і негативних зарядів у фазових переходах 1-го і 2-го роду, застосовано метод рівноважної і нерівноважної статичної механіки. Завдяки останній за допомогою математичного апарату із залученням сингулярних функцій (функцій Дірака) і регулярних функцій імпульсів при фрикційній взаємодії мікрровиступів пар тертя з урахуванням кількості електронів та іонів поверхневого шару фрикційної накладки створено послідовну систему трьох станів, критерієм оцінки параметрів яких є їхня термодинамічна границя.

Детальний розгляд термодинамічної границі стосовно елементів трибосистеми дозволив установити таке: фізична інтерпретація стану спряжених поверхонь ґрунтується на емпіричному принципі макроскопічної еквівалентності, що відноситься до реальних макроскопічних систем; при дослідженнях локальної поведінки макроскопічної системи об'єм, що утворився при фазових переходах 1-го і 2-го роду при трибокрекінгу поверхневих і приповерхневих шарів фрикційних накладок, є несуттєвим параметром; виходячи з визначення класу макроскопічних еквівалентних систем при вивченні локальної поведінки мікроскопічної системи об'єм є істотним параметром.

Установлено невідоме раніше явище масопереносу продуктів тертя в метало-полімерних парах фрикційних вузлів СКГ. Воно полягає в тому, що продукти, які утворилися під дією виникаючого при терті електротермічного вибуху, потрапляючи в зазори між мікрровиступами поверхонь тертя, сприяють генеруванню об'ємного електричного заряду і виникненню електротерморозряду, що призводить до пробоя шару продуктів, які залишилися при їх масоперенесенні на робочій поверхні металевго елемента пари тертя.

Збурюючим фактором є частки продуктів вибуху мідної дротини, яка знаходиться у фрикційній накладці, за рахунок дії потужного імпульсного електричного струму, який зумовлює її сублимацію. Частки продуктів вибуху потрапляють у міжконтактний простір пар тертя гальма. Розліт частинок продуктів вибуху супроводжується формуванням навколо великих часток ланцюгових структур з дрібних частинок, що пояснюється взаємодією протилежних зарядів між ними. Установлено, що згрупування заряджених частинок впливає на: енергетичні рівні мікрровиступів метало-полімерних пар; інтенсивність поширення солітонів і на їх форму в міжконтактному об'ємі; зносо-фрикційні властивості метало-полімерних пар тертя.

Математичним шляхом на підставі розрахункової моделі для оцінки температур при дискретному контактуванні в ПТ «метал-полімер» (рис. 5, а, б) отримано закономірності зміни електротермічних і механічних характеристик мікрровиступів

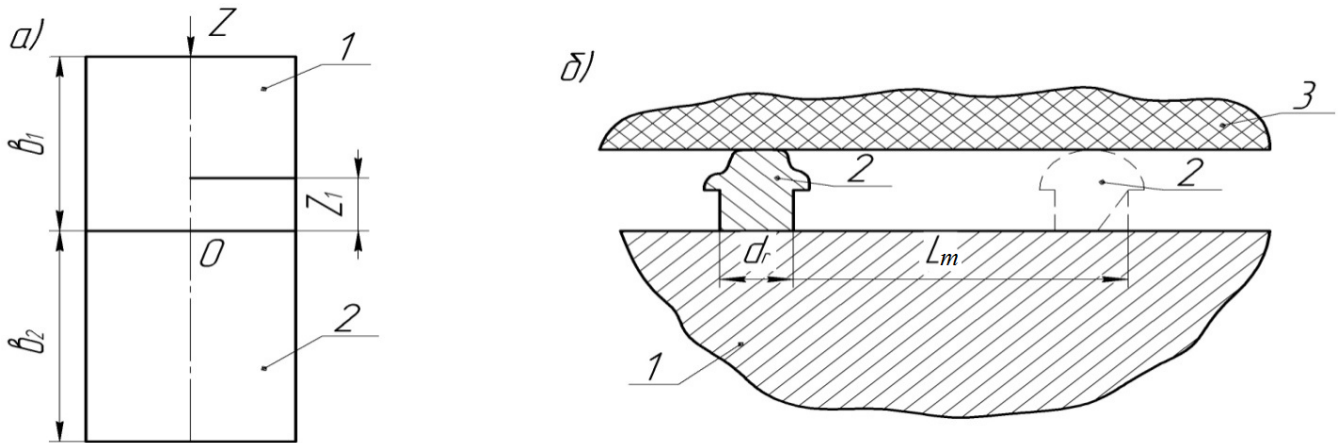


Рисунок 5 а, б – Розрахункові моделі для оцінки температур при дискретному контактуванні в парі тертя «метал 1 - полімер 3»: а – спрощена стрижнева модель одновимірної теплової задачі двох контактуючих тіл; б – шлях тертя одиничної плями контакту мікрориступів 2

плям контактів металополімерних пар тертя при їх фрикційній взаємодії. Отримано розрахункові залежності для визначення:

- максимальної температури на поверхні тертя за часом:

$$t_{\max} = \frac{2\dot{q}\sqrt{l_m d_r}}{\sqrt{\pi g_{\text{ков}} \left(\sqrt{L_r \lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{d_r \lambda_2 c_2 \rho_2} \right) + \sqrt{d_r \lambda_3 c_3 \rho_3}}} + t_2^*, \quad (17)$$

де: $\dot{q}$ – тепловий потік, що генерується при фрикційній взаємодії; l_m – шлях тертя; d_r – діаметр плями контакту; ρ_1, ρ_2, ρ_3 і c_1, c_2, c_3 – густини і теплоємності матеріалів напівпростору 1 і 3 і мікрориступу 2 та їхні коефіцієнти теплопровідності ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$); t_2^* – середня температура мікрориступів;

- величини електричних мікрострумів в залежності від поверхневої температури і градієнта температур по довжині плям контактів за часом (рис. 6);

- твердості матеріалів мікрориступів пар тертя, виходячи з установлених для них допустимих температур:

$$HB_1(t_{\max}) = HB_3(t_0),$$

де HB_1, HB_3 – твердості металевого і полімерного матеріалів; t_0 – допустима поверхнева температура для полімеру.

Із залежностей твердості від температури (див. рис. 6 б) визначено допустимі температури, при яких вищенаведена умова виконується. Наприклад, якщо локальні контакти з матеріалом ретинакс ФК-16Л мають температуру $t_0 = 400$ °С при поточній твердості $HB_3 = 78$ МПа, то мікрориступ зі сталі 30ХГСА на плямах контактів для виконання умови (17) повинен мати допустиму температуру $t_{\max} = 620$ °С.

Аналіз графічної залежності, наведеної на рис. 7, показує, що зі збільшенням поверхневої температури твердість HB полімерного матеріалу ретинакс ФК-16Л зменшується. В інтервалі ПТР 400-800 °С відношення d_r/l_m , змінюючись від 0,1 до 1,2, істотного впливу на твердість HB полімерного матеріалу не чинить.

Установлено, що збільшення d_r (діаметра плями контакту мікрориступів) сприяє кількісному зростанню позитивних і негативних зарядів на ділянках контак-

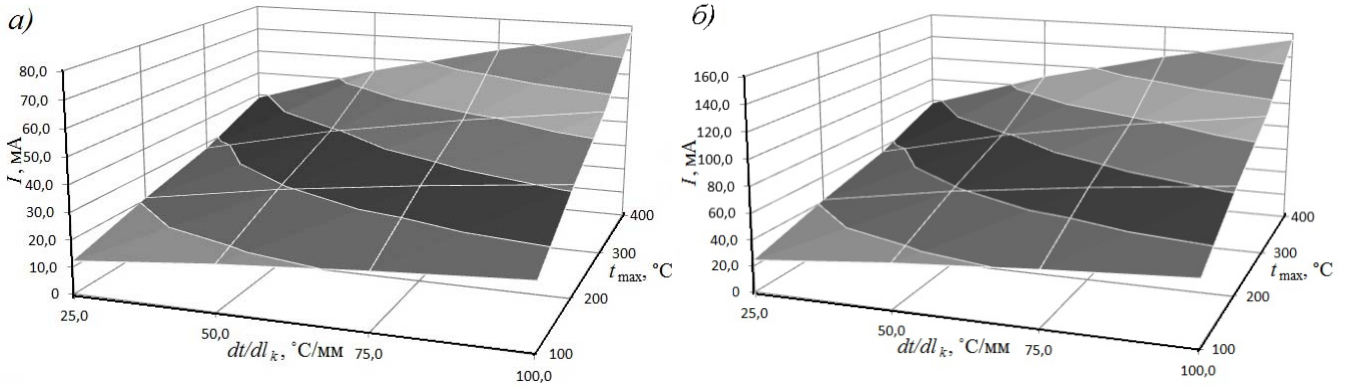


Рисунок 6 а, б – Закономірності зміни мікрострумів на плямі контактів мікровиступів трибоспряжень в залежності від ПТР (t_{max}) і ГТР по довжині плям контактів (d_t/dl_k) при різній електротермомеханічній фрикційній взаємодії (а – $\tau = 0,005$ с; б – $\tau = 0,02$ с) при сталому імпульсному нормальному навантаженні ($N = 4,0$ кН)

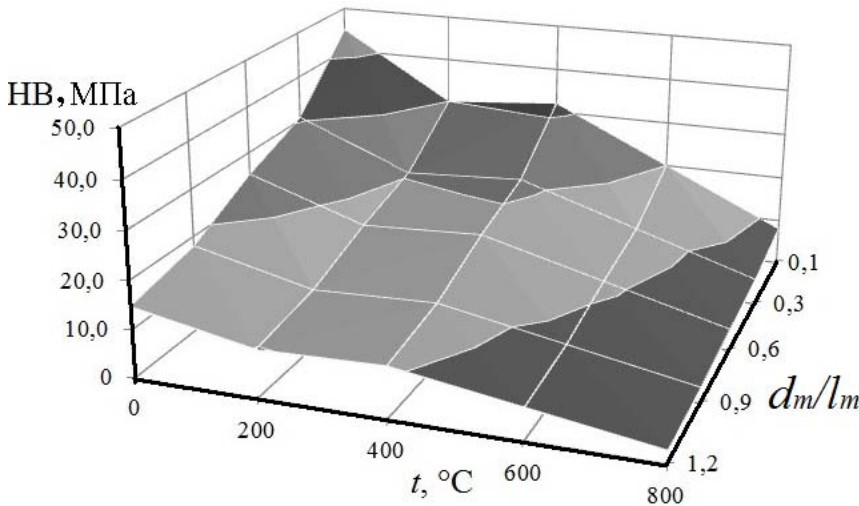


Рисунок 7 – Залежності твердості HB полімерного ма-теріалу ретинакс ФК-16Л від температури t і величини від-ношення d_m/l_m (d_m , l_m – діаметр плями контакту мікро-виступу і його шлях тертя)

тів мікровиступів пари тертя, а отже, і збільшенню коефіцієнта їх взаємного перекриття. Зі збільшенням l_m (шляху тертя) зростає робота тертя, тобто енергонавантаженість пари тертя.

Можливий шлях тертя мікровиступів до їх руйнування з урахуванням діаметра плями контакту, швидкості ковзання і теплофізичних властивостей матеріалу мікрориступів дорівнює:

$$\sqrt{l_m} \leq \frac{(t_{max} - t_2^*) \sqrt{\pi} \sqrt{\vartheta_{ков}} \sqrt{d_r \lambda_2 c_2 \rho_2}}{2 \dot{q} \sqrt{d_r} - (t_{max} - t_2^*) \sqrt{\pi \vartheta_{ков} \lambda_1 c_1 \rho_1} \sqrt{\pi \vartheta_{ков} \lambda_3 c_3 \rho_3}}. \quad (18)$$

За залежністю (18) виконано розрахунки, за результатами яких побудовано графічні залежності (рис. 7). Аналіз останніх показав:

- збільшення поверхневої температури, часу гальмування і поверхневого градієнта температур при сталих значеннях α_n , R_k^* і ρ при $t = 100; 200; 300$ і 400 °C і сталих значеннях $\vartheta_{ков}$ і N зумовлюють зростання мікрострумів I ;

- збільшення часу гальмування з $0,005$ с до $0,02$ с, тобто в чотири рази, мікроструми зросли в два рази, що свідчить про вплив теплових струмів на зарядно-розрядні властивості плям контакту мікрориступів трибоспряжень.

Головним збурюючим фактором у фрикційних вузлах стрічково-колодкового

гальма є натяг набігаючої S_n і збігаючої S_z гілок гальмової стрічки.

П'ятий розділ присвячено керуванню режимами гальмування ФВ СКГ в технологічних операціях спуско-підйомного комплексу бурової установки.

Розглянуто адаптивну стійкість ЕП спуско-підйомного комплексу бурової установки. Проаналізовано діаграму спуску бурильної колони на довжину однієї свічки. Вона складається з трьох етапів: перший – розгону, другий – усталеного руху і третій – гальмування. Установлено, що при сталій швидкості усталеного руху однієї свічки збільшення часу розгону призводить до зростання тривалості другого етапу. Зменшення часу етапу розгону сприяє в кінцевому підсумку зниженню сумарного часу повного циклу спуску колони бурильних труб на довжину однієї свічки, проте призводить до значного збільшення динамічної і теплової навантаженості пар тертя фрикційних вузлів СКГ бурової лебідки. При зменшенні тривалості гальмування також зростає навантаженість ФВ гальма. Для оцінки тривалості фрикційної взаємодії серійних ФВ гальма в залежності від величини динамічного коефіцієнта взаємного перекриття їх спряжених поверхонь запропоновано математичну модель контактної фрикційної взаємодії пар «накладки-шків», що значно спростило обґрунтований розгляд різних режимів гальмування. При цьому встановлено, що вони залежать від величини відношення $\gamma = F_{TP}/F_{TP.П}$ (де F_{TP} , $F_{TP.П}$ – імпульсна сила тертя та її граничне значення). Зокрема, якщо $\gamma > 1,0$ то фрикційна взаємодія відбувається при максимальному коефіцієнті взаємного перекриття пар тертя гальма.

Запропоновано метод регулювання експлуатаційних параметрів серійних фрикційних вузлів гальма із застосуванням сталих і змінних імпульсних сил тертя в процесі гальмування. При цьому розглянуто спільну дію стрічково-колодкового і гідродинамічного гальм. У момент часу, коли гальмовий момент, створюваний гідродинамічним гальмом, досягає величини діючого обертового моменту, прискорення стає рівним нулю, і подальший спуск колони бурильних труб відбувається при рівномірному обертанні барабана лебідки. Теоретично цей час прямує до нескінченності. Для реальної конструкції бурової лебідки прискорення барабана швидко зменшується і практично стає близьким до нуля.

У табл. 2 наведено аналітичні залежності для визначення основних експлуатаційних параметрів стрічково-колодкових гальм з різними типами ФВ.

У табл. 2 використано такі позначення: S_0 , $\bar{S}_0$ – сталий приріст натягу ГС; C – жорсткість ГС; n – кількість накладок у бандажі; α – кут обхвату накладками поверхні гальмового шківа; m – маса ГШ; J – момент інерції ГШ; φ – кут повороту ГШ; ω_0 , ε – кутова швидкість ободу гальмового шківа та його сповільнення; $R_{ш}$ – радіус ГШ; θ – кут фрикційної взаємодії пар тертя; F_{TP} – імпульсна сила тертя; f_1 , f_2 – динамічний коефіцієнт тертя, відповідно, зовнішніх і внутрішніх ПТ гальма; $M_{Г}$ – гальмовий момент; τ – тривалість гальмування.

На підставі виразів (19-40) побудовано графічні залежності (рис. 8-10).

На рис. 8-9 наведено криві залежності шківа від сили натягу пружного елемента $\bar{T}(\theta_1, \bar{\tau}) = CR_{ш}\varphi$ і кута фрикційної взаємодії θ_1 від часу з урахуванням таких безрозмірних величин і параметрів

Таблиця 2

Оцінка ЕП серійних та багатопарних ФВ СКГ стосовно режимів гальмування и можливості керування ними

Визначення ЕП в процесі фрикційної взаємодії ПТ серійного (I) і багатопарного (II) СКГ за рахунок зміни:		
імпульсних сил тертя (I)		періодів динамічного навантаження (II)
сталих	змінних	
Імпульсна сила тертя (вихідна): $F_{TP} = CR_{uu}\varphi - S_3 - mR_{uu}^2\theta_1\varphi. \quad (19)$ Натяг ГС в її середній частині: $S = \left[S_0 - \frac{\omega m R_{uu}^2}{f} (k \sin \bar{\tau} + f \omega_0 \cos^2 k \bar{\tau}) \right] e^{f\alpha} + \frac{m R_{uu}^2}{f} \omega_0 (k \sin \bar{\tau} + f \omega_0 \cos^2 k \bar{\tau}). \quad (20)$ Кут фрикційної взаємодії пар тертя: $\theta_1 = \frac{1}{f} \ln \left[1 + \frac{f \sin \bar{\tau}}{\lambda \omega_0 f - \alpha (\omega_0 \sin k \bar{\tau} + f \cos^2 k \bar{\tau})} \right], \quad (21)$ де $\lambda = S_0 / (CR_{uu})$; $\omega_0 = k_{жс} / \omega_0$; $\alpha = R_o^3 m / J$. Уточнена імпульсна сила тертя: $F_{TP} = R_{uu} \int_0^{\alpha_0} \alpha d\alpha = 1/f \left[S_0 f + m R_{uu}^2 (\ddot{\varphi} - f \dot{\varphi}^2) \right] \times \left(e^{f\alpha_0} - 1 \right) - m R_{uu}^2 \alpha_0 \ddot{\varphi}. \quad (22)$ Тривалість завершення гальмування в момент часу: $\tau = \tau_0 + \pi / 2k. \quad (23)$ Сповільнення ободу шківів: $\varepsilon = R_{uu} \omega_0 k \quad (24)$	Імпульсна сила тертя змінюється за законом: $S_3 = \bar{S}_0 \tau. \quad (25)$ Швидкість ободу гальмового шківів дорівнює 0 в момент часу: $\tau = \tau_1 = \sqrt{\frac{2\omega_0 J}{R_{uu} \bar{S}_0 (e^{f\alpha_1} - 1)}}. \quad (26)$ При $\tau = \tau_2$ ($\tau_2 < \tau_1$) прискорення ободу гальмового шківів досягає різниці: $(\bar{S}_0 \tau - R_o C \varphi_1) R_o / J, \quad (27)$ а час τ_2 у даному випадку дорівнює: $\tau_2 = \sqrt{6\omega_0 J \left(1 - \frac{\bar{S}_0 e^{f\alpha_0}}{\omega_0 R_o C} \right) / [R_o \bar{S}_0 (e^{f\alpha_0} - 1)]}. \quad (28)$ Умова обмеження: при $\tau_2 < \tau_1$: $\bar{S}_0 / (\omega_0 R_{uu} C) > 2e^{-f\alpha_0} / 3; \quad 0 < \bar{S}_0 / (\omega_0 R_{uu} C) < 2e^{-f\alpha_0} / 3 -$ шківів зупиняється. $2e^{-f\alpha_0} / 3 < \bar{S}_0 / (\omega_0 R_{uu} C) < e^{-f\alpha_0}$. Гальмування шківів відбувається, коли $\bar{S}_0$ задовольняє умові: $CR_{uu} \omega e^{-f\alpha_0} \leq \bar{S}_0 \leq CR_{uu} \omega_0 / 2. \quad (29)$ Довжина зони фрикційної взаємодії складає: $\theta_1 = \frac{1}{f} \ln \left[1 + \frac{(\omega R_{uu} C - \bar{S}_0) \sin k \tau}{\bar{S}_0 k \tau} \right]. \quad (30)$ При виконанні умови $\bar{S}_0 \geq CR_{uu} \omega_0$, а також при $\pi / k \leq \tau \leq 2\pi / k$ маємо: $\theta_1 = \frac{1}{f} \ln \left[1 + \frac{(\bar{S}_0 - \omega_0 R_{uu} C) \sin k \bar{\tau}}{\bar{S}_0 (\bar{\tau} + \pi / k) k} \right], \text{ де } (\bar{\tau} = \tau - \pi / k). \quad (31)$	Сумарні імпульсні сили тертя: $F_{TP2} = \sum_{i=1}^n F_{iTP2} = S_3 \left(e^{f_2 \cdot \alpha_i \cdot n R_{uu} / R_o} - 1 \right); \quad (32)$ $F_{TP1} = f_1 n \Phi_i - \frac{f_1}{f_2} S_3 \left(e^{f_2 \cdot \alpha_i \cdot n R_{uu} / R_o} - 1 \right). \quad (33)$ Гальмові моменти: $M_{Г2} = (F_{TP2} - m F_{ii}) R_{uu}; \quad (34) \quad M_{Г1} = F_{TP1} \cdot R_{uu} \quad (35)$ Умова працездатності СКГ: $S_3 (e^{f_2 \alpha} - 1) (1 + f_1 / f_2) \geq n m R_{uu} (f_1 \omega^2 + \varepsilon) \quad (36)$ Режими гальмування, які виконуються за законами: лінійним $\omega = \omega_0 (1 - \tau / \tau_k), \quad \varepsilon = \omega_0 / \tau_k; \quad (37)$ параболічним $\omega = \omega_0 (1 - \tau^3 / \tau_k^3), \quad \varepsilon = 3\omega_0 (1 - \tau^3 / \tau_k^3); \quad (38)$ косинусоїдальним $\omega = \omega_0 (1 - \cos^2 \pi \tau / 2\tau_k), \quad \varepsilon = \omega_0 \pi / 2\tau_k \sin \pi \tau / \tau_k. \quad (39)$ Тривалість першого періоду для лінійного режиму гальмування $\tau_1 \geq \tau k \left(1 - \sqrt{\frac{S_3 (e^{f_2 \alpha} - 1) (1 + f_1 / f_2) + \omega_0}{n m R_{uu} \tau_k}} \right). \quad (40)$

$$\bar{\tau} = \omega\tau; \quad v = \frac{\dot{\phi}}{\omega}; \quad \bar{T} = \frac{T(\theta_1, \bar{\tau})}{CR}; \quad \alpha = \frac{mR_{ш}^3}{J}; \quad \lambda = \frac{T_0}{CR_{ш}}; \quad w_0 = \frac{k_{жс}}{\omega_0}.$$

Аналіз кривих, наведених на рис. 8 а, показує, що зі збільшенням ДКТ час гальмування істотно зменшується, так, наприклад, при $f = 0,20$ цей час (у безрозмірному вигляді) дорівнює 30,0, а при $f = 0,5$ він не досягає 8,0. Зі збільшенням величини відношення $w_0 = \frac{k_{жс}}{\omega_0}$ (тобто, зі зростанням коефіцієнта жорсткості пружного елемента або зі зменшенням початкової кутової швидкості гальмового шківів (див. рис. 8, б, в) час гальмування зменшується, але при цьому час процесу фрикційної взаємодії зростає. Установлено, що на режим гальмування гальмового шківів при дії сталої імпульсної сили тертя істотно впливають динамічний коефіцієнт тертя і жорсткість гальмової стрічки.

Аналіз розподілу зусиль натягу гальмової стрічки уздовж дуги її обхвату фрикційних накладок показує, що найбільше його значення досягається в місці контакту з ними. Побудовано криві залежності зусилля натягу гальмової стрічки від часу при $\theta = \theta_1$, (рис. 9 а, б).

Установлено, що найбільшого значення зусилля натягу збігаючого кінця гальмової стрічки досягає в момент зупинки барабана лебідки. Зі зростанням динамічного коефіцієнта тертя максимуми $\bar{T} = \frac{T(\theta_1, \bar{\tau})}{CR}$ істотно зменшуються, так, наприклад, при $f = 0,20$ $\bar{T} = 13,0$, при $f = 0,4$ $\bar{T} = 4,0$.

На рис. 10 а, б наведено криві залежності кута фрикційної взаємодії θ_1 від величини $\bar{\tau}$ при різних значеннях параметрів гальмування.

Для обраних параметрів фрикційної взаємодії ковзання робочих поверхонь фрикційних накладок ГС по поверхні ободу ГШ в момент гальмування відбувається для всіх значень w_0 , які задовольняють нерівність $0 \leq w_0 \leq 1,25$ (див. рис. 10 а). При цьому установлено, що величина ДКТ впливає на величину кута охоплення, і це більш помітно при малих значеннях w_0 (див. рис. 10 б).

Для розрахунку змінних імпульсних сил тертя в серійних фрикційних вузлах гальма отримано вирази (25-31) (див. табл. 2), за якими побудовано графічні залежності. Вони виражають закономірності зміни швидкості і кута ковзання θ_1 від безрозмірного часу $\bar{\tau} = \omega_0\tau$ при різних значеннях параметрів f , w_0 , α , $\lambda = \bar{T}_0 / (CR\omega_0)$.

Установлено, що швидкість гальмування, в основному, залежить від динамічного коефіцієнта тертя і від безрозмірних величин w_0 і λ . При цьому на час гальмування сильно впливає параметр λ . Так, наприклад, при $w_0 = 0,1$ $\lambda = 0,05$, $f = 0,2$, час гальмування становить $\bar{\tau} = 60,0$; при $w_0 = 1,0$ $\bar{\tau} = 5,0$. Зі збільшенням параметра λ час гальмування істотно зменшується, особливо це помітно при малих значеннях ДКТ. При великих значеннях f діапазон зміни параметра λ , при якому реалізується розглянутий режим гальмування, істотно звужується, так, наприклад при $f = 0,2$ цей інтервал становить 0-0,3, при $f = 0,4$ – 0-0,15.

З аналізу даних для θ_1 випливає, що процес гальмування фрикційними вузлами стрічково-колодкового гальма реалізується у вузькому діапазоні зміни параметра λ , а протяжність цього інтервалу, в основному, залежить від величини f і практично

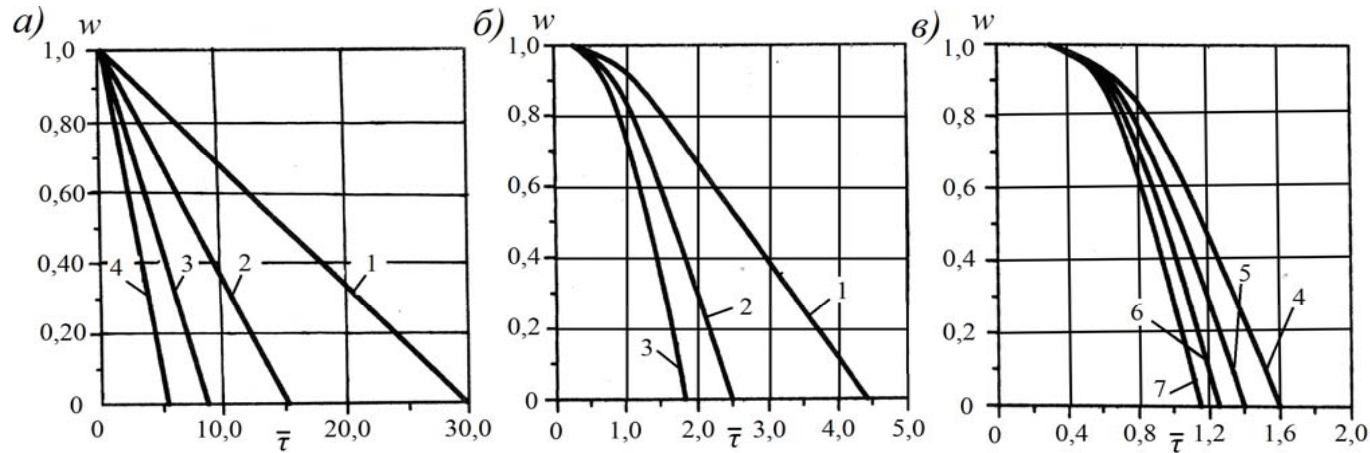


Рисунок 8 а, б, в – Закономірності зміни кутової швидкості шківів $w = \dot{\phi} / \omega$ від часу гальмування $\bar{t}$ при сталих $\alpha = 0,02$; $w_0 = 0,25$; $\lambda = 0,35$; $\theta_0 = 4,71$ рад і різних: а – ДКТ: 1 – $f = 0,2$; 2 – $f = 0,3$; 3 – $f = 0,4$; 4 – $f = 0,5$; б – w_0 : 1 – $w_0 = 0,50$; 2 – $w_0 = 0,75$; 3 – $w_0 = 1,0$; в – w_0 : 4 – $w_0 = 1,25$; 5 – $w_0 = 1,50$; 6 – $w_0 = 1,75$; 7 – $w_0 = 2,0$

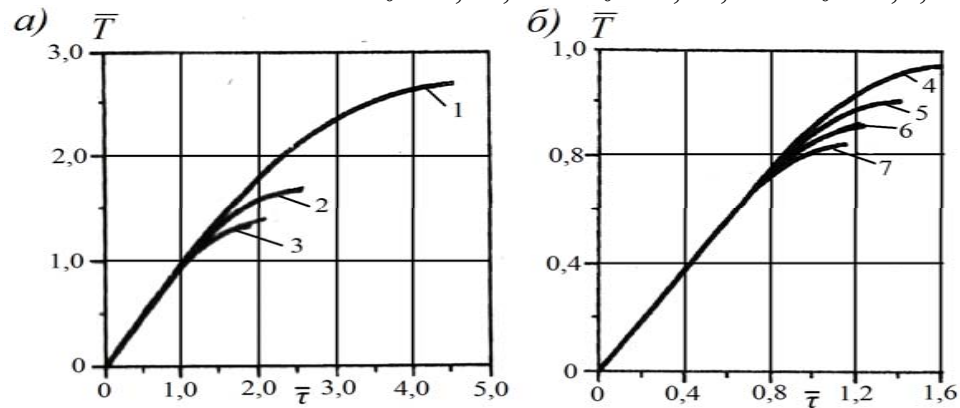


Рисунок 9 а, б – Закономірності зміни зусиль натягів ГС $\bar{T} = T(\theta_1 t) / (CR)$ від часу гальмування $\bar{t}$ при сталих $\alpha = 0,02$; $f = 0,3$; $\lambda = 0,35$; $\theta_0 = 4,71$ рад і різних: а – w_0 : 1 – $w_0 = 0,50$; 2 – $w_0 = 0,75$; 3 – $w_0 = 1,0$; б – w_0 : 4 – $w_0 = 1,25$; 5 – $w_0 = 1,50$; 6 – $w_0 = 1,75$; 7 – $w_0 = 2,0$

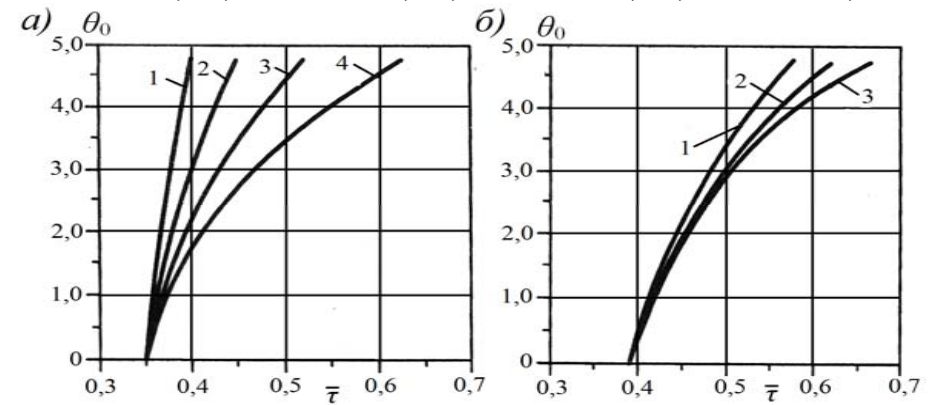


Рисунок 10 а, б – Закономірності зміни кута фрикційної взаємодії θ_1 від часу гальмування $\bar{t}$ при сталих $\alpha = 0,02$; $w_0 = 0,25$; $\lambda = 0,35$; $\theta_0 = 4,71$ рад і різних: а – ДКТ: 1 – $f = 0,2$; 2 – $f = 0,3$; 3 – $f = 0,4$; 4 – $f = 0,5$; б – w_0 : 1 – $w_0 = 0,40$; 2 – $w_0 = 0,75$; 3 – $w_0 = 1,0$

не залежить від параметра w_0 . Так, при $f = 0,2$, $w_0 = 0,1$ або $1,0$ інтервал зміни λ складає $0,36-0,53$, при $f = 0,4$ – $0,11-0,53$.

Аналіз процесу ковзання робочих поверхонь полімерних ФН, які знаходяться на ГС по біговій доріжці ободу ГШ показав, що воно відбувається з різким контактом робочих поверхонь накладок збігаючої гілки стрічки, що спричиняє їх коливання і негативно впливає на динаміку гальмування.

Аналіз залежностей величин ω і θ від τ при $\lambda > e^{-f\theta_0}$ ($f \geq \theta_0^{-1} \ln 2$) і різних значеннях f , w_0 показав, що швидкість шківа при $e^{-f\theta_0} \leq \lambda \leq 0,5$ дорівнює нулю за імпульсний проміжок часу. При $\lambda > 0,5$ швидкість ободу гальмового шківа не дорівнює нулю, а його поверхня знаходиться в повній фрикційній взаємодії з накладками. Кут ковзання θ при $\tau = 0$ має максимальне значення і далі зі збільшенням часу фрикційної взаємодії зменшується, причому зі зростанням величини λ максимальне значення θ зменшується, і при $\lambda = 0,3$ зона ковзання повністю відсутня, тобто пари тертя є роз'єднаними.

Режими динамічної навантаженості багатопарних фрикційних вузлів модельного стрічково-колодкового гальма математично описано виразами 31-38 (див. табл. 2) для першого періоду (взаємодія внутрішньої поверхні гальмової стрічки із зовнішніми поверхнями ФН (рис.11). Розглянуто режими гальмування при зміні кутової швидкості ГШ за лінійним, параболічним і косинусоїдальним законами. Тривалість першого періоду для лінійного закону гальмування представлена аналітичним виразом (40), для косинусоїдального і параболічного режимів гальмування – графічним рішенням рівнянь (див. рис. 11 а, б).

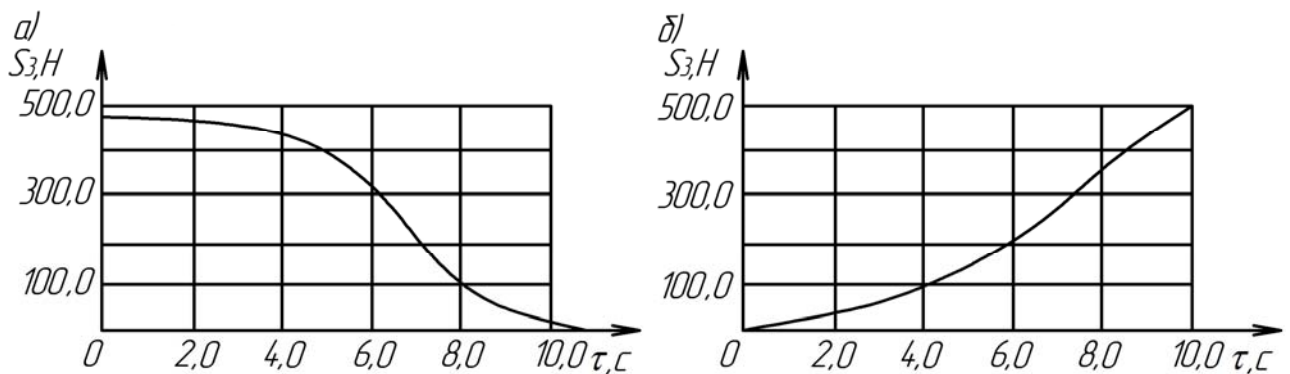


Рисунок 11 а, б – Графічний розв'язок рівнянь для косинусоїдального (а) і параболічного (б) режимів гальмування

Для підсилення ефекту фрикційної взаємодії пар тертя серійних фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма та з метою вирівнювання в них ПН запропоновано комбіновану ГС. Остання складається з додаткової та основної стрічок. До додаткової стрічки кріпляться серійні ФН, і вона несе тільки вагове навантаження. Основна стрічка сприймає зусилля розтягу набігаючої та збігаючої гілок. Наявність додаткової фрикційної взаємодії поверхонь стрічок та додаткової стрічки з неробочими поверхнями полімерних накладок утворює багатопарні вузли тертя і значно підвищує енергетичну спроможність гальма.

Шостий розділ присвячено експериментальним дослідженням енергоємності металополімерних пар тертя СКГ.

Експериментальні дослідження проведено на фізичних моделях: серійних та багатопарних ФВ СКГ БЛ У2-5-5 у стендових і промислових умовах.

Дослідження серійного та багатопарного стрічково-колодкового гальма БЛ проводили на гальмовому стенді з масштабами геометричної і динамічної подібності, відповідно, 2,9 і 20,0. ФВ мали високі ФН, підпружинені та посаджені з натягом на обід ГШ. Наведено докладний опис випробувального обладнання і комплексу вимірювальної апаратури. Матеріали пар тертя проходили випробовування на приладі-мікроскопі Axiovert 40MAT. Для ФВ СКГ БЛ вимірювали і визначали такі параметри: зносо-фрикційні властивості матеріалів ПТ та їхню твердість; натяги ділянок ГС; нормальні зусилля в ПТ; ДКТ ковзання; статичний і динамічний коефіцієнти взаємного перекриття ПТ; гальмовий момент; температури поверхонь тертя; температуру внутрішньої поверхні ободу ГШ; час гальмування і кутову швидкість ГШ; знос робочих поверхонь ФН.

Під час проведення випробувань вирішено такі задачі: оцінено енергетичні рівні поверхневих і приповерхневих шарів ободу ГШ; встановлено взаємозв'язок між поверхневими температурами і термічними напруженнями в ободі шківів; отримано закономірності зміни основних ЕП ФВ гальм. Запропоновано метод оцінки зовнішніх і внутрішніх експлуатаційних параметрів ФВ в лабораторних умовах. Розроблено метод експериментальних досліджень енергоємності пар тертя ФВ СКГ в лабораторних і промислових умовах, що базується на структурній розвиваючій моделі реального складного багаторівневого трибологічного спряження їхніх пар тертя.

У результаті проведення експериментальних досліджень енергоємності серійних, удосконалених і нових конструкцій фрикційних вузлів СКГ БЛ в:

лабораторних умовах:

- отримано графічні залежності модуля пружності E , коефіцієнта Пуассона μ і коефіцієнта лінійного розширення α сталі 30ХГСА від температури t , з яких випливає, що зазначені параметри в інтервалі температур 50,0-100,0 °С є сталими. Це зумовлено тим, що в зазначеному інтервалі поверхневих температур зазвичай настає усталений тепловий стан пар тертя;

- встановлено вплив поверхневих температур на твердість HB сталі 30ХГСА і чавуну ЧНМХ при фрикційній взаємодії з фрикційними матеріалами марок ФМК-845, ФМК-11, МВК-50А і ретинакс ФК-16Л величини d_r/l_m ; на стан мікровиступів металевих елементів тертя вплив температури від 300 до 500 °С невідчутний. У поверхневих шарах фрикційних накладок у зазначеному вище інтервалі температур спостерігалось явище трибокрекінгу, що суттєво знизило твердість їхніх поверхневих шарів (рис. 12 а, б, в, г);

- наведено закономірності зміни температури поверхневих шарів при електро-термомеханічному терті, які підкоряються хвильовій природі. Другий етап режиму гальмування характеризується їх сталим станом;

- встановлено тимчасові залежності зміни імпульсних питомих навантажень, що діють на плямах контактів мікровиступів металополімерного трибоспряження з рівномірним розподілом амплітуди фрикційної взаємодії. Необхідно зауважити, що в інтервалі часу від 0,5 до 1,0 с піки амплітуд ПН за часом зміщені по відношенню до піків амплітуд електротермоопорів ділянок мікровиступів, що свідчить про настання змінного режиму фрикційної взаємодії;

– отримано спектри термостимульованих струмів в залежності від допустимої поверхневої температури (в інтервалі до і вище t_0) при фрикційній взаємодії пар тертя «полімер-метал» (ФК-24А - сталь 35ХНЛ), при товщині ФН 15,0 і 25,0 мм питомі навантаження змінювалися від 0,15 до 0,75 МПа. Установлено, що позитивні і негативні термоструми є результатом роботи мікротермобатарей в режимах термоелектрогенераторів і термоелектроохолодильників;

– розглянуто перехідні процеси в металополімерних парах тертя модельного стрічково-колодкового гальма при зміні режимів навантаження;

промислових умовах:

– установлено, що температури в місці контакту пар «накладки-шків» при фрикційній взаємодії коливалися від 100,0 до 1000,0 °С, у тілі гальмового шківа об'ємна температура змінювалася від 54,0 до 471,0 °С. Для оцінки ГТР методом моделювання на РС-сітках обід ГШ умовно ділили на шари в горизонтальній і вертикальній площинах. У першому і другому випадках (до і вище допустимої ПТР для матеріалу ФН) градієнт температури по довжині робочої поверхні ободу ГШ склав, відповідно, 1,8 °С/мм і 1,1 °С/мм, на неробочій поверхні ободу він дорівнював, відповідно, 0,8 °С/мм і 0,6 °С/мм. У виступі кріплення ободу ГШ ГТР по висоті склав, відповідно 0,8 °С/мм і 0,5 °С/мм. При вертикальному поділі ободу ГШ на шари ГТР по його товщині змінювався від вільного краю ободу до защемленого, відповідно, від 2,05 °С/мм до 4,7 °С/мм і від 1,8 °С/мм до 3,95 °С/мм. ГТР по товщині кріпильного виступу склав, відповідно, 0,4 °С/мм і 0,3 °С/мм, що вказує на повне прогрівання ободу гальмового шківа;

– енергонавантаженість ободу ГШ при імпульсному підведенні теплоти до його поверхні на 19% є вищою, ніж при тривалому. У першому випадку спостерігаються локальні зони прогріву з великим ГТР, що призводить до виникнення і розвитку мікротріщин у поверхневому шарі ободу; у другому випадку має місце рівномірний прогрів поверхневого шару ободу гальмового шківа;

– коливання температури на поверхні ободу гальмового шківа з розмахом в декілька десятків градусів призводять до виникнення коливань напружень в його поверхневих шарах розмахом в сотні МПа. Високочастотні коливання напружень збільшують навантаженість пар тертя гальма і суттєво зменшують їх термін служби.

У цьому розділі розглянуто оптимізацію КП та ЕП ФВ СКГ.

В основу оптимізації конструктивних та експлуатаційних параметрів фрикційних вузлів СКГ покладено термодинамічну границю поверхневого стану полімерної ФН, металоємність, термостабілізаційний і термонапружений стан, а також енергонавантаженість ободів ГШ при їх проєктуванні за допомогою методу геометричного програмування. За допомогою багатокритеріального проєктування фрикційних вузлів визначено їхні конструктивні та експлуатаційні параметри з різними варіантами розташування ФН на стрічці і шківі.

Основними обмежувальними умовами при проєктуванні ободу шківа є: мінімізація махових мас $m_{об}$ і обмеження термічних напружень σ_{max} .

Визначення основних конструктивних параметрів ГШ наведено у табл. 3.

У табл.3 використано такі позначення: a_1 , a_2 – вагові коефіцієнти, які враховують мінімізацію маси гальмового шківа і вплив термічних напружень;

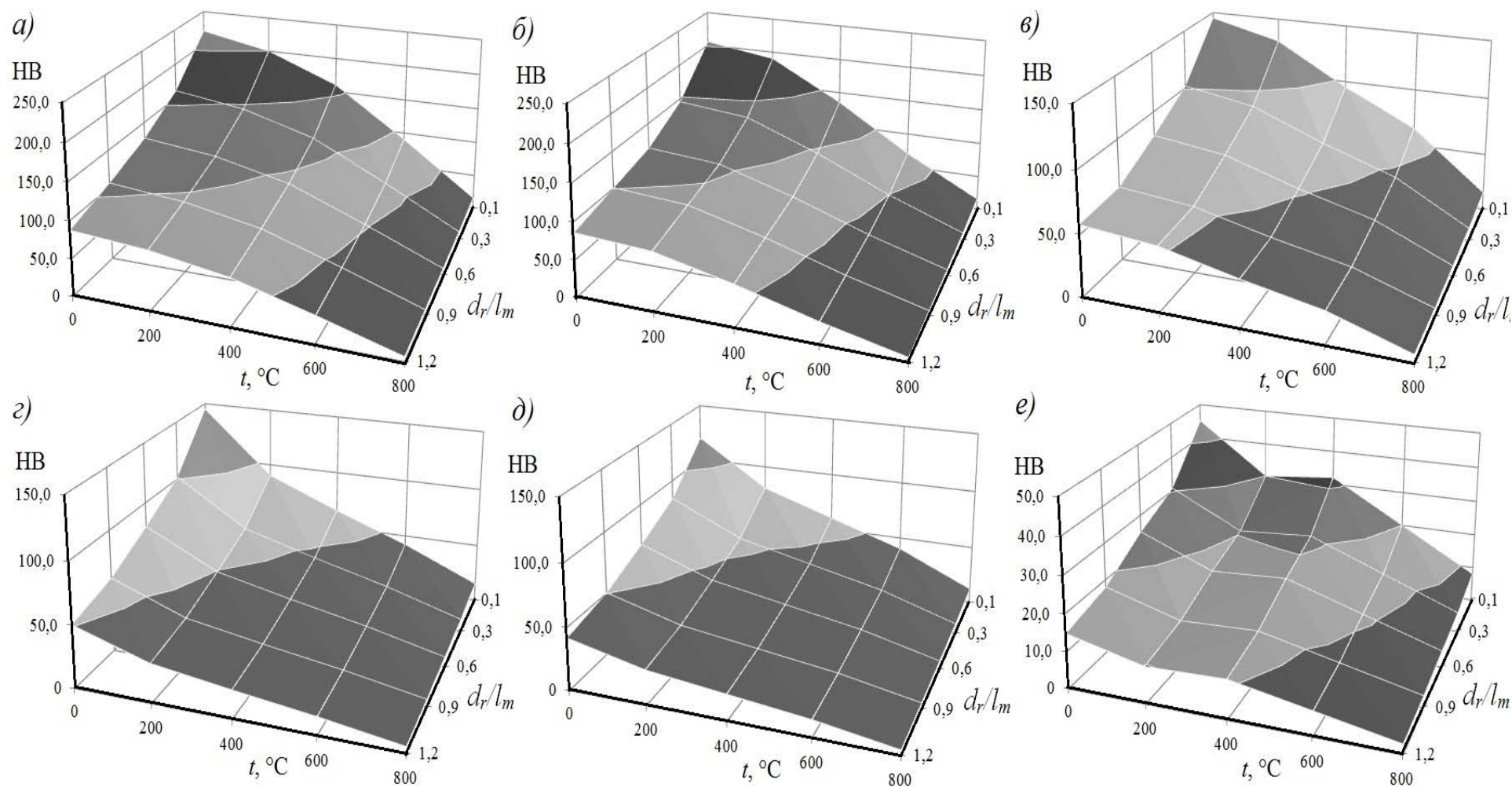


Рисунок 12 а, б, в, г, е – Закономірності зміни твердості HB різних матеріалів, що використовуються у вузлах тертя, від температури t і відносної величини d_r/l_m (де d_r , l_m – діаметр і шлях тертя плями контакту): а – сталь 30ХГСА; б – чавун ЧНМХ; в – ФПрМ марки ФМК-845; г – ФМК-11; е – ФПрМ марки МВК-50А; е – ретинакс ФК-16Л

Визначення конструктивних параметрів гальмових шківів

Параметри		Розрахункові залежності	
Цільова функція		$g(D_6, \delta_{36}) = C_1 D_6^{a_{11}} \delta_{36}^{a_{12}} + C_2 D_6^{a_{21}} \delta_{36}^{a_{22}} \rightarrow \min,$	(41)
Коефіцієнти мономів		$C_1 = \frac{a_1 \pi \rho n_2}{(1 - n_1)}; \quad (16) \quad C_2 = \frac{a_2 \alpha E p f \sigma D_6 \omega_T \Delta \tau (1 - n_1)}{2(1 - \mu^2) c \rho}.$	(42)
Конструктивні параметри ободу шківів:	зведена товщина	$\delta_{36} = \sqrt[3]{\frac{a_2 \alpha E p f \sigma \omega \Delta \tau (1 - n_1)^2}{2(1 - \mu^2) c \rho^2 a_1 \pi n_2}};$	(43)
	внутрішній діаметр	$D_6 = \sqrt[3]{\frac{4 K_6 a_c G_k l (1 - \mu^2) c \rho}{f^2 p^2 \alpha_0 n_2 a_2 E \sigma \omega \Delta \tau (1 - n_1)}};$	(44)
	робоча ширина	$B = \sqrt[3]{\frac{a_2 \alpha E p f \sigma \omega \Delta \tau n_2^2 (1 - n_1)^2}{2(1 - \mu^2) c \rho^2 a_1 \pi}}.$	(45)
Маса		$m_{ш} = \pi \rho \delta_{36}^2 (n'_1 D_3 + n'_2 \delta_{36}),$	(46)

n_1, n_2 – коефіцієнти цільової функції; α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ободу ГШ, м²/с; E – модуль Юнга, МПа; p – ПН, що діють на поверхню ободу ГШ, МПа; f – ДКТ; σ – коефіцієнт, що враховує частку акумульованої енергії ободом ГШ у процесі гальмування; ω – кутова швидкість ободу ГШ перед початком гальмування, с⁻¹; $\Delta \tau$ – інтервал часу гальмування, с; μ – коефіцієнт Пуассона; K_6 – коефіцієнт безпеки гальма; a_c – сповільнення колони бурильних труб при спуску, м/с²; G_k – вага колони бурильних труб, кН; l – довжина однієї свічки, м; α_0 – КВ від матової поверхні ободу ГШ, Вт/(м²·°С); n'_1, n'_2 – коефіцієнти, що визначаються залежно від того, на яку кількість дисків умовно поділено по довжині обід ГШ; D_3 – зовнішній діаметр ободу гальмового шківів, мм.

Спираючись на досвід робастного підходу до розрахунку (застосування методів оцінки динамічної і теплової навантаженості ободу шківів) і оптимізаційного проектування розглянуто обмеження кожного з КП і ЕП.

З вихідних даних виділено інтервали зміни: питомих навантажень p , динамічного коефіцієнта тертя f і гальмові моменти M_{Γ} , які розвиває гальмо.

1. За допомогою методу геометричного програмування визначено конструктивні параметри ободу ГШ (рис. 13): зведена товщина δ_{36} , внутрішній діаметр D_6 і робоча ширина B . Аналітичні залежності наведено в табл. 3.

2. Розраховано напружено-деформованого стану ободу шківів з урахуванням отриманих конструктивних параметрів.

3. Визначено в межах отриманого інтервалу конструктивних параметрів ободу шківів його масу $m_{об}$.

4. Оцінено термодинамічну границю поверхневого шару ФН і термостабілізаційно-термонапружений стан ободу ГШ з точки зору темпів нагрівання і вимушеного охолодження його полірованої і матових поверхонь з урахуванням виникаючих

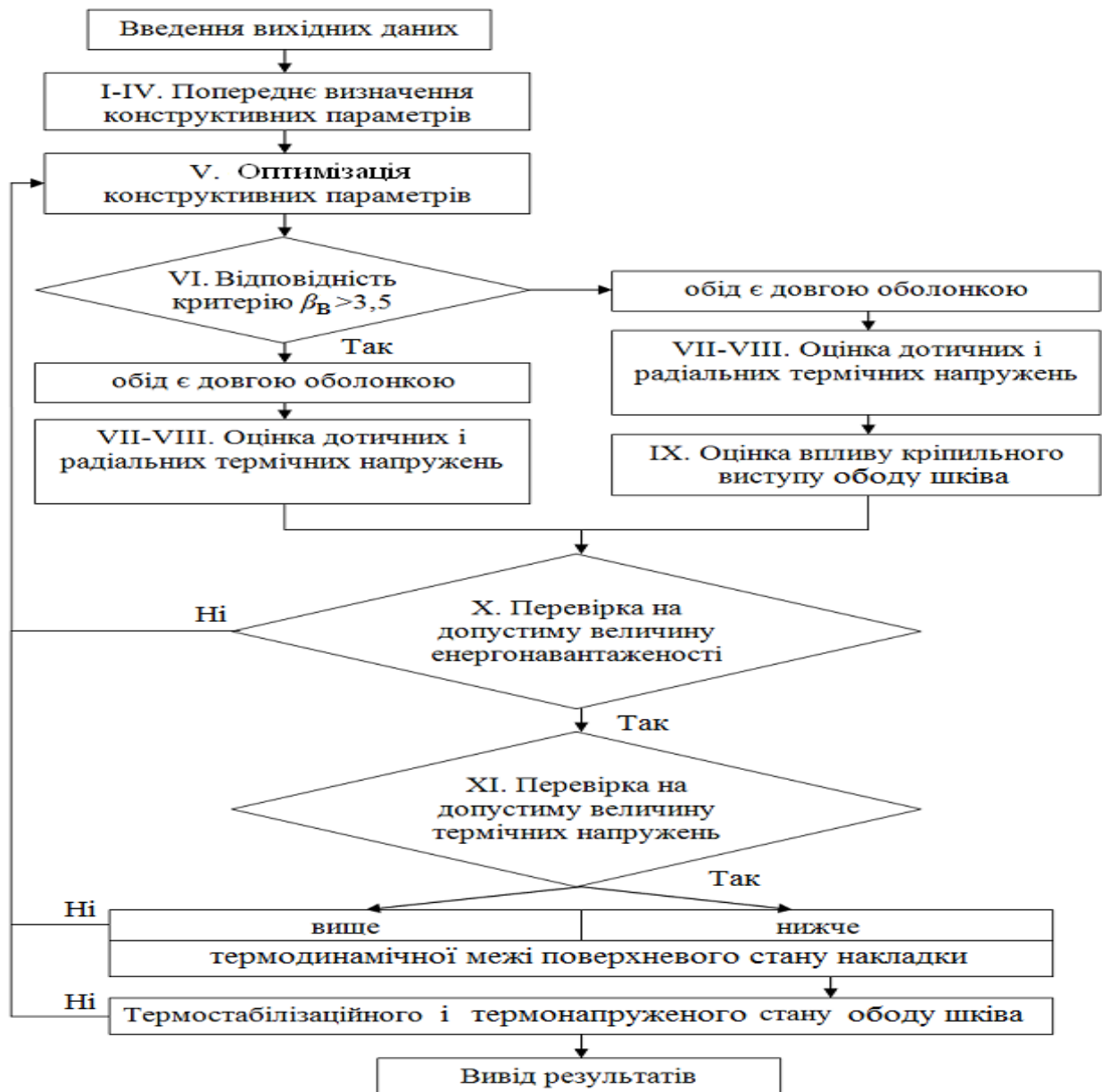


Рис. 13 – Алгоритм визначення конструктивних параметрів ГШ СКГ БЛ

тангенціальних і радіальних ГТР. При цьому удосконалено метод визначення термічних напружень в елементах ГШ умовним поділом його на диски однакової товщини та з різними зовнішніми і внутрішніми діаметрами. Обчислені за цим методом напруження істотно перевищують середні радіальні та осьові навантаження. Досліджено вплив конструктивних параметрів гальмового шківів на величини МН і ТН. Обчислені за цим методом зазначені напруження істотно перевищують їх середні значення. Установлено, що із зменшенням коефіцієнта взаємного перекриття пар тертя у 2,0 рази максимальні нормальні і термічні напруження зростають, відповідно, у 1,5-2,0 рази і 2,5-3,0 рази.

5. За основним КП ободу ГШ і ділянки гальмової стрічки з накладкою визначено ЕП фрикційних вузлів: динамічні коефіцієнти взаємного перекриття $K_{\text{вз}}$ пар тертя, імпульсні нормальні N і тертя F_{TR} сили, ДКТ f , роботу тертя W .

6. Оптимізовано основні конструктивні параметри ободу ГШ за часом гальму-

вання ($\tau_r \rightarrow \min$) і паузами між гальмуваннями ($\tau_n \rightarrow \max$) при коливаннях ПН у ФВ від $p_{\min}$ до $p_{\max}$ при допустимій енергоємності E_T гальмового шківів.

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень проведено порівняльний аналіз показників енергоємності та ефективності серійних і удосконалених фрикційних вузлів СКГ бурової лебідки У2-5-5 (табл. 4).

Оцінку конструктивних і експлуатаційних параметрів фрикційних вузлів СКГ БЛ У2-5-5 проведено на основі багатокритеріального підходу.

Аналіз показав, що параметри енергоємності удосконалених і конструктивно модернізованих (спроектованих за розробленим алгоритмом) ФВ зменшилися на 21,3% у порівнянні з серійними, ефективність зросла на 25,4%. Завдяки розробленим методам металомісткості ГШ СКГ БЛ знижено на 18% порівняно з серійним шківом за рахунок його раціональних КП.

У **восьмому розділі** розглянуто методи і засоби зниження енергонавантаженості фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок.

Аналіз даних табл. 4 показав, що другий (II) конструктивний варіант удосконаленого ФВ є ефективнішим за перший (I) за рахунок збільшення площ внутрішніх і зовнішніх поверхонь і, відповідно, коефіцієнтів взаємного перекриття. Це сприяє зменшенню питомих навантажень і, як наслідок, збільшенню ДКТ. Ваговий знос робочих поверхонь фрикційних накладок зменшився на 33,0% у порівнянні з першим конструктивним варіантом. В останньому робота тертя була набагато більшою, ніж у другому конструктивному варіанті.

Наведено результати прогнозування раціональних КП і ЕП фрикційних вузлів СКГ БЛ У2-5-5, працюючих у переважаючих режимах гальмування.

Для зниження загальної енергонавантаженості ГШ запропоновано їхні нові конструкції. Вони є складеними, тобто складаються з декількох елементів. Це значно полегшує визначення загальної енергонавантаженості ободу ГШ. У конструкції основного ГШ теплота розподіляється між його боковинами і торцевими поверхнями пакета дисків і відводиться від пар тертя кондуктивним теплообміном.

На рис. 14 а наведено кінематичну схему СКГ; на рис. 14 б – поперечний розріз по А-А СКГ; на рис. 14 в – вигляд Б на кульку в сепараторній обоймі.

Стрічково-колодкове гальмо бурової лебідки працює в двох режимах.

При першому гальмовому режимі відбувається взаємодія робочих поверхонь фрикційних накладок 30 із зовнішньою поверхнею металевих елементів тертя. У результаті цього генеруються електро-рушійні сили термострумів, і виникають теплові струми електризації через електронні властивості приповерхневих шарів полімерних накладок. Як наслідок, у приповерхневих шарах контактуючих елементів акумулюється теплота. Далі відбувається стік теплоти в тіла напівшківів 1, 2 і по парах «полімер-метал» – у тіло дисків 18, зібраних в пакет. Після чого теплота від їхніх поверхонь розсіюється в навколишнє середовище. Перший гальмовий режим за часом є короткочасним.

Другий гальмовий режим за часом є тривалим. Повторюються всі процеси першого гальмового режиму, коли працюють зовнішні пари тертя, і до процесу гальмування долучаються внутрішні пари тертя «метал-метал». Вони виникають у результаті обертання комбінованого гальмового шківів, що взаємодіє з нерухомою

Порівняльний аналіз експлуатаційних параметрів СКГ з ефективними та енергоємними удосконаленими фрикційними вузлами

№ п/п	Найменування параметра	Символ позначення	Одиниця виміру	Числові значення параметра	
				I*	II*
1	Площа робочої поверхні гальмового шків	$A_{ш}$	мм ²	376800	376800
2	Площі поверхонь ФН: внутрішньої зовнішньої	$A_{вн}$ $A_{зов}$	мм ² мм ² мм ²	27360 -	37959,8 37959,8
3	Коефіцієнт взаємного тертя: внутрішніх зовнішніх	$\kappa_{B3} = \frac{A_{ш} A_{н}}{A_0}$	- -	0,704 -	0,833 0,679
4	ПН в ПТ внутрішніх: максимальні мінімальні зовнішніх: максимальні мінімальні	$p = \frac{N}{A}$ p_{max1} p_{min1} p_{max2} p_{min2}	МПа МПа МПа МПа МПа	0,6 0,4 - -	0,5 0,35 0,35 0,2
5	Динамічний коефіцієнт тертя в ПТ внутрішніх: мінімальний максимальний зовнішніх: мінімальний максимальний	$f = \frac{F_m}{N}$ f_{min1} f_{max1} f_{min2} f_{max2}	- - - -	0,29 0,365 - -	0,31 0,38 0,28 0,32
6	Гальмовий момент ПТ: внутрішніх: максимальний мінімальний зовнішніх: максимальний мінімальний	$M_{\Gamma} = (S_H - S_3) R_O$ $M_{\Gamma_{max1}}$ $M_{\Gamma_{min1}}$ $M_{\Gamma_{max2}}$ $M_{\Gamma_{min2}}$	Н·м Н·м Н·м Н·м Н·м	170,0 63,75 - -	200,0 75,0 40,0 15,0
7	Тривалість гальмування	τ_{Γ}	с	12,0	12,0
8	Кількість циклічних гальмувань	n	-	150	150
9	Ваговий знос робочих поверхонь ФН	Δg_1	г	60,3	44,4

Примітка: I* – фрикційні накладки вільно посаджені на робочу поверхню гальмового шків; II* – широкі фрикційні накладки посаджені з натягом на робочу поверхню, наслідок: акумулюється менша кількість теплоти

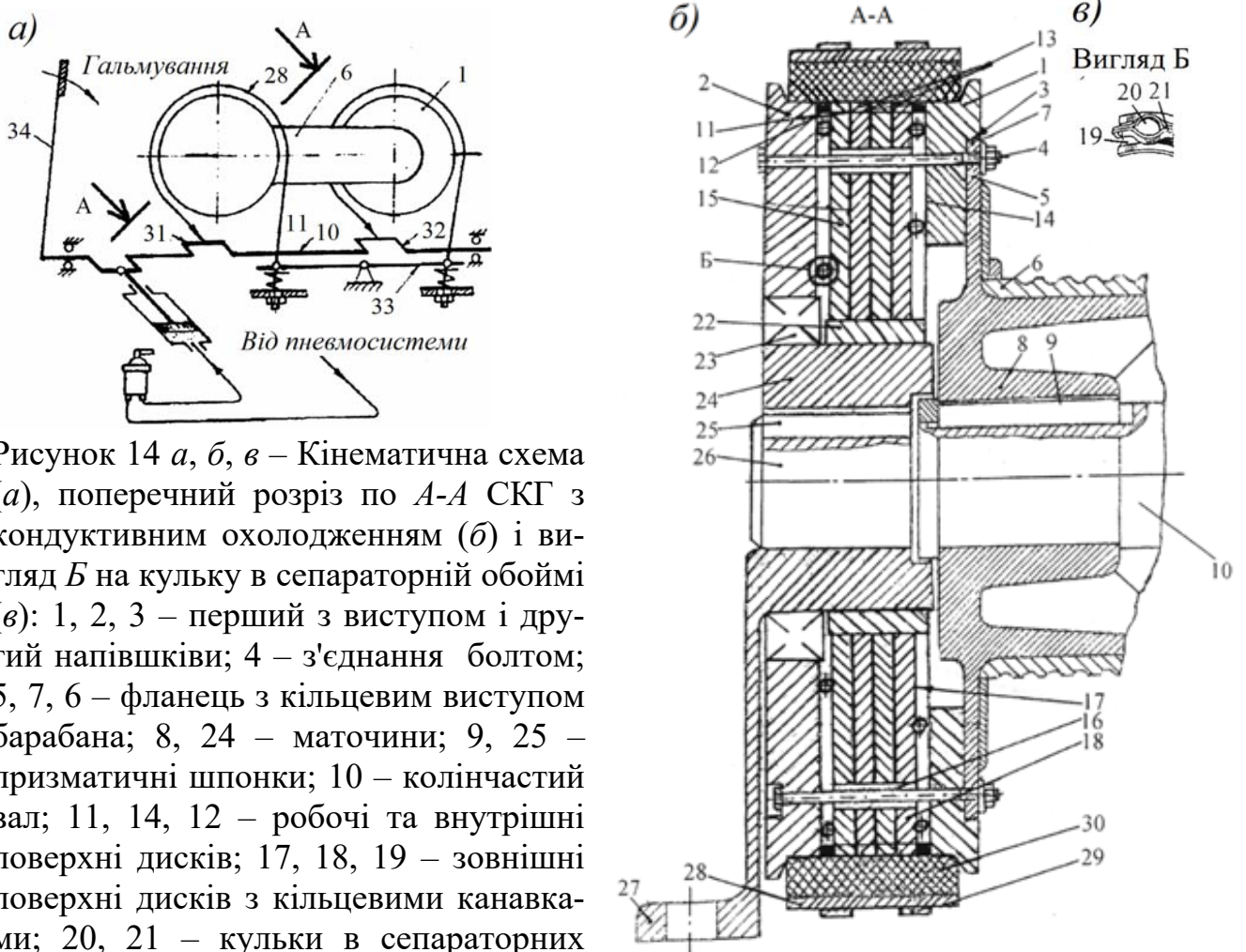


Рисунок 14 а, б, в – Кінематична схема (а), поперечний розріз по А-А СКГ з кондуктивним охолодженням (б) і вигляд Б на кульку в сепараторній обоймі (в): 1, 2, 3 – перший з виступом і другий напівшків; 4 – з'єднання болтом; 5, 7, 6 – фланець з кільцевим виступом барабана; 8, 24 – маточини; 9, 25 – призматичні шпонки; 10 – колінчастий вал; 11, 14, 12 – робочі та внутрішні поверхні дисків; 17, 18, 19 – зовнішні поверхні дисків з кільцевими канавками; 20, 21 – кульки в сепараторних обоймах; 22, 23 – підшипники: ковзання, кочення; 26 – вісь вала; 27 – установча лапа; 28 – гальмова стрічка з набігаючою (I) і збігаючою (II) гілками; 29, 30 – кріпильні вусики накладок; 31, 32 – мотильові шийки колінчастого вала; 33 – балансір; 34 – важіль керування

торцевою поверхнею пакета дисків. У цьому випадку трибоефект є меншим порівняно із зовнішніми парами тертя, генеровані ЕРС термоструму слабшими, виникаючі теплові струми є меншими, і, як наслідок, акумулюється менша кількість теплоти.

Якщо розглядати одночасну взаємодію зовнішніх і внутрішніх ПТ, тобто як багатопарну систему, то по товщині взаємодії виникає позитивний градієнт електричного і теплового струмів, що сприяє ефективному кондуктивному відведенню теплоти за наступною схемою: пари тертя «полімер-метал» - пакет дисків - підшипник ковзання 22 - маточина 24 - вісь 26 - установча лапа 27. Після чого теплота розсіюється в навколишнє середовище від поверхонь зазначених вище вузлів і елементів. У другому гальмовому режимі гальмо може працювати як стрічково-дискове, оскільки сумарна сила тертя в зонах контактної взаємодії у внутрішніх ПТ здатна змістити пакет дисків у бік, протилежний напрямку обертання комбінованого шків, зірвавши натяг між торцевою поверхнею пакета дисків поверхнею підшипника ковзання 22. При цьому поверхні ПТ «метал-полімер» 13 починають взаємодіяти, збільшуючи загальну сумарну силу тертя, внаслідок чого підвищується ефективність гальмування.

На рис. 15 а наведено термограму складеного ГШ, отриманого застосуванням

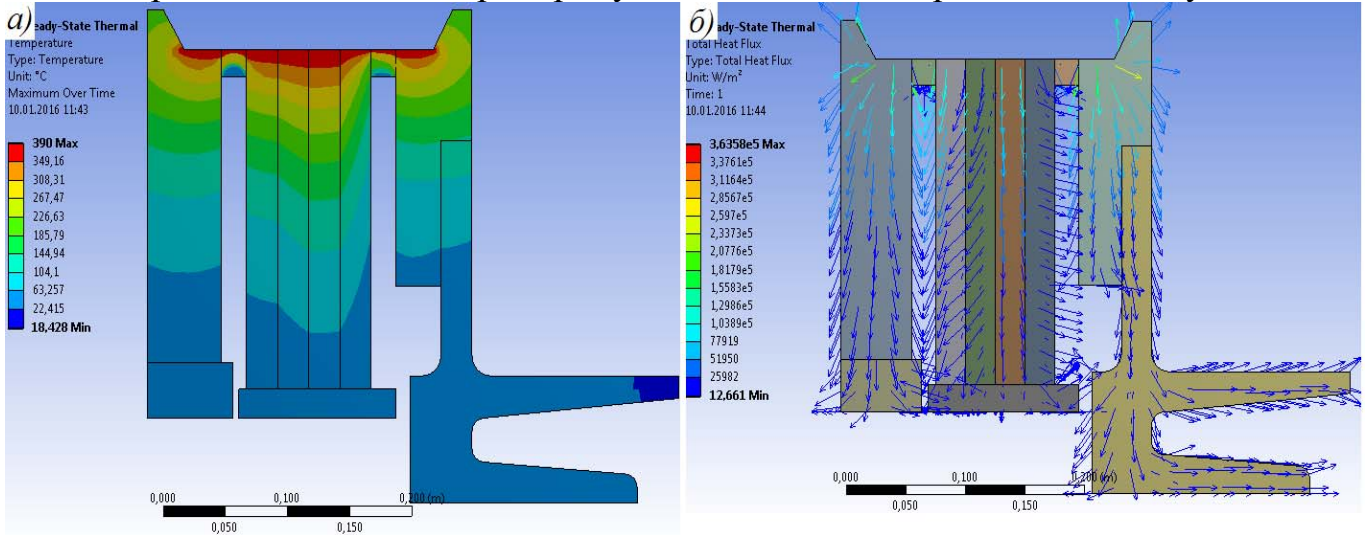


Рисунок 15 а, б – Термограма (а) і циркуляція теплових струмів (б) в тілі складеного з теплопровідних дисків шківа СКГ БЛ

пакета теплопровідних дисків, які розділені між собою теплоізоляційними кільцями. Пакет дисків зовнішньою поверхнею контактує з внутрішніми поверхнями правого і лівого напівшківів. При цьому має місце рівномірний прогрів поверхневих шарів бігової доріжки ободу шківа, що свідчить про мінімальні поверхневі градієнти температур. Проте в такій конструкції ободу гальмового шківа спостерігаються максимальні об'ємні градієнти температур.

На рис. 15 б наведено схему циркуляції теплових струмів у тілі складеного гальмового шківа з пакетом теплопровідних дисків. Циркуляція відбувається за такою схемою: «полімер-метал - пакет теплопровідних дисків - підшипник ковзання - маточина - вісь - установча лапа». За такої схеми спостерігається два види теплообміну – кондуктивний і вимушений конвективний, до складу якої входить і радіаційний теплообмін.

Складений обід гальмового шківа у випадку використання пакета теплопровідних дисків з різними коефіцієнтами теплопровідності має середні градієнти поверхневих (12,0 °C/мм) і об'ємних (2,45 °C/мм) температур значно менші, ніж в ободі серійного гальмового шківа.

Виконано моделювання процесів механічного і теплового впливу на робочі і неробочі поверхні складеного ГШ. Шків має правий і лівий напівшків, які розділені теплоізоляційними кільцями різної теплопровідності, що утворюють обід шківа. (рис. 16 а, б, в). Концентратори еквівалентних напружень виникають у місцях з'єднань робочої поверхні ободу з реборами і правого напівшківа з фланцем барабана. Результати моделювання наведено на рис. 16. З рис. 16 а випливає, що для механічних напружень:

- спостерігається чотири вогнища напружень (зона I – 2,87 МПа, зона II – 3,54 МПа, зона III – 4,3 МПа, IV – 3,5 МПа), які відповідають спряженню відповідно, лівого і правого теплоізоляційних кілець з напівшківками, правого напівшківа з фланцем барабана і конструктивній особливості фланця барабана, що є свого роду концентратором напружень;
- всі вищевказані зони виникають через прогин правої частини складеного

ободу шківів від дії питомих навантажень з максимальними напруженнями в зоні III (оскільки товщина фланця барабана в цій зоні є найменшою).

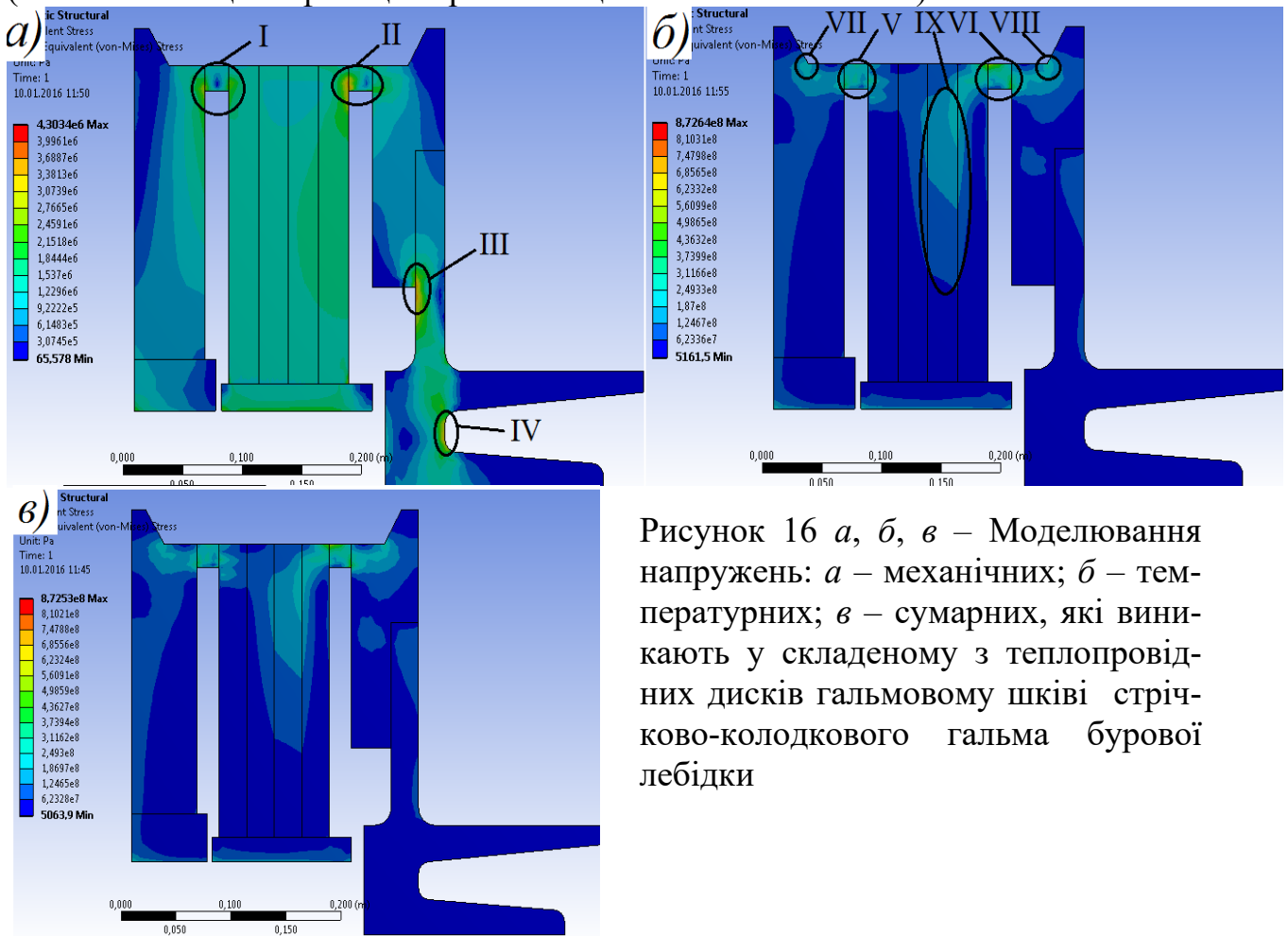


Рисунок 16 а, б, в – Моделювання напружень: а – механічних; б – температурних; в – сумарних, які виникають у складеному з теплопровідних дисків гальмовому шківі стрічково-колодкового гальма бурової лебідки

З рис. 16 б випливає, що для температурних напружень:

- спостерігається два вогнища напружень (зона V – 872,6 МПа і зона VI – 648,2 МПа), які відповідають з'єднанню теплоізоляційних кілець, відповідно, з лівим і з правим напівшківками. Пояснюється це тим, що правий і лівий напівшківки, а також металеві кільцеві диски через великий коефіцієнт теплопровідності мають сумарне теплове розширення більше, ніж теплоізоляційні кільця, що зумовлює їх стискання;
- слід відзначити зони концентраторів напружень в місцях з'єднання лівого та правого напівшківків з ребордами (зона VII – 234,2 МПа і зона VIII – 296,8 МПа), які зливаються з зонами V і VI, відповідно;
- зона підвищених напружень (зона IX) утворилася внаслідок різної теплопровідності сусідніх кільцевих дисків.

Оскільки ТН на порядки більші за МН, то зони сумарних (механічні+температурні) напружень збігаються з зонами максимальних температурних напружень в місцях з'єднань теплоізоляційних кілець з правим і лівим напівшківками (див. рис. 16 в).

На останньому етапі енергетичної оцінки ресурсу нових фрикційних накладок вузлів тертя гальма здійснюють перевірний розрахунок їхньої ширини і гальмового моменту $M_{ГЛ}$.

Розрахункові залежності для перевірної оцінки КП і ЕП ФВ СКГ мають такий

вигляд для визначення: ширини ФН – $B_n = K_{\text{вз}} 2\pi R_{\text{ш}} / n_n$; гальмового моменту – $M_{\Gamma} = (S_n - S_3) R_{\text{ш}}$ де $K_{\text{вз}}$ – коефіцієнт взаємного перекриття пар тертя; $R_{\text{ш}}$ – радіус робочої поверхні ободу гальмового шківів; n_n – кількість накладок.

За умови, що M_{Γ} (гальмовий момент, закладений в теплову складову потужності тертя) приблизно дорівнює величині $M_{\Gamma 1}$, визначення конструктивних параметрів ФН завершується. У разі, якщо $M_{\Gamma 1}$ відрізняється від M_{Γ} понад 10,0%, для M_{Γ} проводять нові розрахунки з відкоригованими конструктивними та експлуатаційними параметрами стрічково-колодкового гальма.

Оцінено ресурс фрикційних накладок стрічково-колодкового гальма, згідно із залежностями (47 - 51), наведеними в табл. 5.

Таблиця 5

Енергетична оцінка ресурсу фрикційних накладок СКГ

Пара тертя	Розрахункові залежності
Визначення об'ємної інтенсивності зношування робочої поверхні ФН	$u_v = U_W^{-1} \cdot \sum P = i_h \cdot \frac{\sum P}{f \cdot HB}, \text{ мм}^3/\text{с}. \quad (47)$
Розрахунок фактичного ресурсу ФН	$\tau_r = \frac{l_n \cdot B_n \cdot 2/3 \delta_n}{u_v}, \text{ с}. \quad (48)$
Визначення площі робочої поверхні ФН	$A_{\text{фн}} = \frac{n(\tau_r) \cdot \tau_r \cdot U_W^{-1} \cdot \left(0,6 \cdot 10^3 \frac{\varrho_{\text{ков}} \cdot f \cdot N}{2 \cdot \pi} + k_{\text{с}} \cdot I \cdot U + 263 \frac{r_{\text{max}} \cdot \varrho_{\text{ков}} \cdot N}{l_n} \right)}{2/3 \cdot \delta_n}. \quad (49)$
Визначення зведеного радіуса мікровиступів поверхонь ободу ГШ	$r_{\text{max}} = \frac{\left(\frac{2/3 \cdot \delta_n \cdot A_{\text{фн}}}{n(\tau_r) \cdot \tau_r \cdot U_W^{-1}} - \frac{0,6 \cdot 10^3 \frac{\varrho_{\text{ков}} \cdot f \cdot N}{2 \cdot \pi} - k_{\text{с}} \cdot I \cdot U}{0,8} \right) \cdot l_n}{263 \cdot \varrho_{\text{ков}} \cdot N}. \quad (50)$
Визначення довжини ФН	$l_n = \frac{263 \cdot r \cdot \varrho_{\text{ков}} \cdot N}{\left(\frac{2/3 \cdot \delta_n \cdot A_{\text{фн}}}{n(\tau_r) \cdot \tau_r \cdot U_W^{-1}} - \frac{0,6 \cdot 10^3 \frac{\varrho_{\text{ков}} \cdot f \cdot N}{2 \cdot \pi} - k_{\text{с}} \cdot I \cdot U}{0,8} \right)}. \quad (51)$

У наведених залежностях (47-51) використано такі умовні позначення: U_W – енергетична інтенсивність зносу, в Дж/мм³; $\sum P$ – сумарна складова потужності тертя, Дж/с; f – ДКТ; HB – твердість металевго елемента тертя, МПа; $n(\tau_r)$ – приріст ресурсу ФН; l_n , B_n , δ_n – довжина, ширина і товщина ФН, мм; N – імпульсні нормальні зусилля, Н; $k_{\text{с}}$ – коефіцієнт, що враховує час контакту мікровиступів ФН з мікровиступами металевго елемента тертя; I – сила струму, що генерується мікровиступами металополімерних ПТ, А; U – трибоЕРС у кінці процесу гальмування, В.

На основі вихідних і розрахунково-експериментальних даних фактичного ресурсу ФН при їх зношуванні до допустимої товщини при заданих КП ПТ «сталь 35ХНЛ-ФК 24А» СКГ БЛ У2-5-5 побудовано графічні залежності вигляду $\tau_r = \mu(N, f)$ при $\varrho_{\text{ков}} = 1,5; 3,0$; $\varrho_{\text{ков}} = 4,5; 6,0$ м/с. Аналіз графіків показав таке.

Для збільшення в 1,20 рази ресурсу фрикційних накладок необхідно дотримуватися регламентованої величини коефіцієнтів взаємного перекриття пар тертя, при цьому представляється можливим в:

- 1,20 рази збільшити площу робочої поверхні ФН при збереженні незмінною величину відношення її довжини до ширини (вона складає $0,0276 \text{ м}^2$);
- 1,80 рази збільшити довжину фрикційної накладки за рахунок зменшення її ширини при збереженні площі на попередньому рівні. Нові конструктивні параметри складають: довжина $0,43 \text{ м}$, ширина $0,064 \text{ м}$;
- 2,20 рази зменшити зведений радіус мікровиступів поверхонь ободу ГШ за рахунок підвищення чистоти механічної обробки його робочої поверхні.

Результати обчислень показали, що відхилення $M_{Г1}$, отриманого за залежністю (33), від $M_{Г}$, що фігурує в залежності (4), не перевищує $1,5\%$, для подібних розрахунків це є добрим результатом.

Упровадження в практику конструкторсько-дослідних робіт розроблених методів і засобів стосовно ФВ СКГ БЛ, представлених у вигляді робастної системи, дозволяють ще на стадії концептуального проектування об'єктивно оцінити енергоємність ФВ даного гальма з метою підвищення ефективності його дії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Уперше за результатами теоретичних і експериментальних досліджень вирішено науково-технічну проблему розрахунку і проектування фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурової лебідки. При цьому реалізовано структурно-параметричний синтез з елементами робастного підходу з підкритеріями (якістю, стійкістю, стабільністю, регулюванням, керуванням та оптимізацією) до їхніх трибосистем з метою підвищення енергоємності й ефективності фрикційних вузлів гальма. Уперше запропоновано методи і засоби, які забезпечують якість, стійкість і стабільність поверхневого шару елементів тертя та експлуатаційних параметрів гальм. А саме:

1. Розроблено моделі контактної фрикційної взаємодії мікровиступів робочих поверхонь трибосистеми "накладки-шків":

- динамічна (математична) модель, яка дозволила ефективно дослідити різні режими гальмування. При цьому встановлено, що вони залежать від величини відношення $\gamma = F_{TP} / F_{TP.П.}$ (де F_{TP} , $F_{TP.П.}$ – імпульсна сила тертя та її граничне значення). Установлено, що при $\gamma > 1$ фрикційна взаємодія відбувається при максимальному коефіцієнті взаємного перекриття пар тертя гальма;

- введенням в динамічну модель безрозмірних величин у вигляді симплексів та комплексів, до складу яких входять: час (до $30,0 \text{ с}$), кут (до $360,0^\circ$) повороту ободу шківів та його кутова швидкість (до $200,0 \text{ хв}^{-1}$); кут (до $270,0^\circ$) обхвату накладкою шківів та довжина фрикційної накладки (до 150 мм), натяги (від 0 до 50 кН) і жорсткість ділянок набігаючих та збігаючих гілок стрічки; радіус ($0,725 \text{ м}$), маса ($235,85 \text{ кг}$) і момент інерції ($171 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) шківів, встановлено повторюваність функціональних залежностей і вплив зазначених параметрів на динамічний коефіцієнт тертя фрикційного вузла;

- оцінено енергетичну активність локальної контактної фрикційної взаємодії пар тертя при імпульсних питомих навантаженнях та поверхнево-об'ємних температурах у взаємозв'язку з роботою виходу електронів-іонів з поверхневих шарів ободу шківів (W_m) і полімерної накладки (W_n) за таких умов: при $W_m > W_n$ інтенсивно здійснюється тепловідвід від поверхонь ободу; при $W_m = W_n$ виникає квазістаціонарна те-

плова навантаженість поверхонь тертя; при $W_n > W_n$ екранується робоча поверхня ободу, що сприяє виникненню нового явища – надпровідності.

2. За експериментальними результатами встановлено закономірності розподілу контактних питомих навантажень (0,2-0,8 МПа), поверхнево-об'ємних температур (180 – 350 °С) та еквівалентних напружень (651,07-876,9 МПа) з урахуванням інтенсивності теплоутворення при електротермомеханічному терті і зношуванні мікровиступів тертьових пар гальма:

- встановлено, що навантаження, необхідне для утворення плям контактів мікровиступів, зменшуються зі збільшенням швидкості ковзання (від 2,0 до 6,0 м/с);
- для допустимої швидкості ковзання (до 8,0 м/с) при збільшенні змінної сили тертя визначено граничне значення розмірів плям контактів мікровиступів;
- шорсткість спряжених поверхонь суттєво впливає на розподіл питомих навантажень і температурних градієнтів (від 2,5 до 160 °С/мм);
- збільшення шорсткості спряжених поверхонь тертя призводить до зниження максимальної контактної температури та еквівалентних напружень при короткотривалому гальмуванні, для довготривалого тертя наявні максимальні значення питомих навантажень на локальних контактах при зростанні шорсткості робочих поверхонь тертя.

3. Проведені синтез і аналіз трибосистем, якими є фрикційні вузли, до їх розрахунку характеризується універсальністю (з позицій їх придатності до розрахунку різних типів вузлів), яка забезпечується за рахунок:

- уточненого методу визначення теплового балансу з урахуванням динамічних і теплових параметрів трибосистем «робочої поверхні ободу шків - внутрішньої поверхні накладки» і «зовнішньої поверхні накладки - робочої поверхні гальмової стрічки», а також інтенсивності випромінювального та конвективного теплообміну при взаємодії з навколишнім середовищем;

- методу багатофакторних досліджень термограм, теплових струмів, які циркулюють в тілі серійного та удосконаленого гальмового шків, температурних напружень на робочій поверхні відокремленого ободу шків із залученням теорій кінцевих елементів і скінченних різниць;

- запропонованих нових типів гальмових шківів зі збільшеними додатковими та нерухомими площами поверхонь для інтенсифікації кондуктивного, випромінювального та конвекційного теплообміну. Це дозволило збільшити ефективність теплопередачі на 22,5%. Встановлено, що різна інтенсивність енергетичної активності фрикційної взаємодії спряжених поверхонь та процесів теплообміну між елементами трибосистеми сприяє виникненню ділянок з неоднаковою тепловою навантаженістю і, як наслідок, змінними температурними градієнтами;

- методу енергетичної оцінки ресурсу фрикційних накладок з урахуванням складових потужності тертя (електричної, теплової, механічної) і потужності хімічних перетворень у приповерхневому шарі накладки з подальшим визначенням їхніх раціональних конструктивних параметрів.

Структурно-параметричний синтез фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм виконано у такій послідовності: попередній вибір матеріалів пари тертя; підбір конструкції фрикційного вузла; проведення циклів випробувань і остаточний вибір фрикційного вузла. Це дозволило ще на стадії проектування вибирати ефективні

фрикційні матеріали для пар тертя, визначати конструктивні параметри елементів фрикційного вузла з достатньою енергоємністю і прогнозувати зносо-фрикційні властивості його пар тертя.

4. Сформульовано загальні принципи керування енергонавантаженістю різних типів фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм на основі їхніх розрахункових схем, законів і стратегій стосовно конкретних стадій гальмування, а також шляхи і методи оцінки якості керування. Установлено закономірності зміни кутової швидкості гальмового шківів при різних формах тахограм: лінійної, параболічної і косинусоїдальної при спільній дії багатопарних фрикційних вузлів стрічково-колодкового і гідродинамічного гальм і без останнього на величини гальмових моментів, які ними реалізуються. Доведено, що комбінацією тахограм гальмового шківів і почерговою зміною поверхонь взаємодії за умови неперевикнення на них допустимих градієнтів питомих навантажень, поверхнево-об'ємних температур і температурних напружень забезпечується раціональне керування навантаженістю фрикційних вузлів гальма.

5. При математичному описі методу оптимізації конструктивних параметрів гальмового шківів (діаметра його робочої поверхні, ширини і товщини його ободу) враховано обмеження, які стосуються імпульсних допустимих питомих навантажень і поверхневих температур, а також умову, що приріст об'ємної температури ободу шківів не повинен перевищувати приросту його поверхневої температури. Розглянуто попередній проєктний розрахунок гальмових шківів, що містить вісім етапів, починаючи з визначення реалізовуваного гальмового моменту (M_G) заданим типом фрикційного вузла гальма і завершуючи уточненням конструктивних параметрів шківів. Із застосуванням теорії геометричного програмування, що містить в собі цільову функцію, яка мінімізує негативні фактори вартості власне гальмового шківів (C_{III1}) і виникнення на його робочій поверхні термічних напружень (C_{III2}), отримали, що $C_{III} = C_{III1} + C_{III2}$.

6. Оцінено енергонавантаженість і термостабілізаційний стан ободу шківів при короткотривалому і довготривалому підведенні до його робочої поверхні теплоти. Установлено взаємозв'язок між конструктивними та експлуатаційними параметрами пар тертя різних конструктивних схем з урахуванням інтенсивності теплообмінних процесів в них.

7. Математично описано оптимізацію конструктивних параметрів гальмових шківів різних конструкцій і отримано аналітичні залежності для визначення товщини, ширини і діаметрів їхніх робочих поверхонь. Використання даного методу сприяє зменшенню металомісткості серійного гальмового шківів на 17,0%.

Металомісткість удосконаленого гальмового шківів збільшилася на 15,5% і на стільки ж зменшився його момент інерції в зв'язку з тим, що середня частина шківів є нерухомою.

8. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень особливостей роботи різних типів фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурової лебідки розроблено ряд нових і вдосконалених методів і засобів для зниження їхньої енергоємності та підвищення ефективності пар тертя гальма. При цьому оцінено енергонавантаженість поверхневих і приповерхневих шарів полімерної накладок з урахуванням термодинамічної границі, термостимульованого і термостабілізаційного станів ободу шківів та зносо-фрикційних властивостей їхніх пар тертя, а також напружено-

деформованого стану робочих поверхонь ободу шків. Оптимізовано конструктивні параметри фрикційного вузла, що дозволило:

- сформулювати новий клас задач теплової динаміки з подальшою оцінкою термограм і схем циркуляції теплових струмів у тілі дисків, на які поділено гальмові шків. Диски виготовлені з матеріалів, що мають різні коефіцієнти теплопровідності, між дисками встановлено теплоізоляційні прокладки;
- установити динаміку розподілу температурних напружень на робочих поверхнях дисків шків для запобігання зародження і розвитку на них мікро-тріщин;
- підвищити точність запропонованих методів розрахунку до 15%.

9. Упровадження в практику конструкторсько-дослідних робіт розроблених методів і засобів стосовно фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма бурової лебідки дозволяють ще на стадії концептуального проектування об'єктивно оцінити енергоємність фрикційних вузлів даного гальма з метою підвищення ефективності його дії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії, навчальні посібники

1. Курс лекцій з деталей машин та тестові завдання. Навчальний посібник / О. І. Вольченко, В. С. Ловейкін, **Д. Ю. Журавльов**, В. Я. Малик. Івано-Франківськ: в-во Прикарпат. націон. ун-ту імені Василя Стефаника, 2010. 246 с. (*Докторанту належить удосконалення методу проектування фрикційних вузлів гальмових пристроїв*).

2. Курс лекцій з підйомно-транспортних машин та тестові завдання: навчальний посібник / О. І. Вольченко, Д. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, М. І. Клендій, І. О. Бекіш / ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ-Бережани: Вид-во Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2012. – 308 с. (*Докторантом запропоновано методи до розрахунку фрикційних вузлів гальмових пристроїв*).

3. Ленточно-колодочные тормозные устройства: [монография] / Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, С. И. Крыштопа, А. В. Возный. Кубанский государственный технологический университет. Ивано-Франковск: Изд-во Прикарпатского нац. ун-та имени Василя Стефаника, 2013. 441 с. (*Докторантом проведено теоретичні дослідження нових фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок*).

4. Трибология. Электротермомеханические основы, анализ и синтез на нано-, микро- и миллиуровнях и технические приложения: учебник для вузов / А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, П. С. Красин. Под ред. А. И. Вольченко. Киев, 2015. 371 с. (*Докторантом представлені методи дослідження напружено-деформівного стану полімерної накладки і металевого елемента тертя при їх електротермомеханічному навантаженні*).

5. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, И. А. Ширали, Э. А. Джанахмедов, Н. А. Вольченко, В. С. Скрыпник, **Д. Ю. Журавлев**. Под общ. ред. акад. А. Х. Джанахмедова. Стандарт. Баку: "Апострофф", 2016. 312 с. (*Докторантом запропоновано удосконалений метод визначення основних конструктивних і експлуатаційних параметрів фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма*).

6. Научное открытие № 482. Явление массопереноса продуктов трения в металлополимерных парах. / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Э. С. Пирвердиев, Д. А. Вольченко, Э. А. Джанахмедов, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев** // Баку, «АПОСТРОФФ», 2016. – 136 с. (*Докторантом запропоновано залежності для визначення електропровідності поверхневого шару полімерної накладки*).

7. Дисковые и дисково-колодочные тормоза в машиностроении. Том 2. Монография / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, **Д. Ю. Журавлев**, Е. Ф. Скляренко // Баку: «APOSTROF-A», 2021. 392 с. (*Докторанту належить розробка методу проєктування фрикційних вузлів дисково-колодкових гальм*).

8. Дисковые и дисково-колодочные тормоза в машиностроении. Том 3. Монография / А. Х. Джанахмедов, Н. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, Д. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, В. Н. Вольченко // Баку: «APOSTROF-A», 2022. 304 с. (*Докторантом запропоновано методи розрахунку фрикційних вузлів дисково-колодкових гальм*).

9. Фрикционные узлы в машиностроении. Монография / К. Т. Набизаде, М. Я. Джавадов, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, Н. Н. Фидровская, **Д. Ю. Журавлев**, А. С. Евченко // Баку: “APOSTROF-A”, 2023. 460 с. (*Докторантом проведено теоретичні дослідження нових фрикційних вузлів*).

Статті у наукових фахових виданнях України:

10. Вольченко Д. О. Експериментальні дослідження багаторядних стрічково-колодкових гальм бурових лебідок / Д. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, А. В. Лешишин А. В // Науковий Вісник ІФНТУНГ, 2008. №1(17). С. 68 – 75. (*Докторантом запропоновано залежність для визначення зусилля, необхідного для переміщення по опорній циліндричній поверхні шків двостороннього клинового сухаря*).

11. Модель трибологических систем в парах трения тормозных устройств / Є. І. Крижанівський, М. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, В. І. Снурніков // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. 2009. № 5 (86). С. 104 – 107. (*Докторантом визначено фактори, що впливають на термічну стійкість матеріалів пар тертя*).

12. Вольченко Д. О. Особливості навантаження гальмівної стрічки багаторядного стрічково-колодкового гальма / Д. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, О. Ю. Журавльов // Науковий Вісник ІФНТУНГ. 2010. № 3(25). С. 34 – 38. (*Докторантом запропоновано розрахункові залежності для визначення навантаження гальмової стрічки*).

13. Теплонавантаженість ободу гальмівного шків бурової лебідки при роботі індукторного гальма (частина перша) / О. І. Вольченко, Д. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, М. В. Кашуба // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2011. № 1(38). С. 17 – 23. (*Докторантом встановлено закономірності розповсюдження теплових хвиль з поверхонь ободу шків в його товщину та порівняно варіанти їх взаємодії при роботі комбінованого гальма*).

14. Нанотрибология при контактно-термическом взаимодействии в металлополимерных парах трения тормозных устройств / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, С. И. Крыштопа, **Д. Ю. Журавлев** // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2012. Том 58. С. 5 – 16. (*Докторантом обґрунтовано*

умови формування на поверхнях металополімерних пар тертя термоелементів з напівпровідниками з р-п переходом і їх об'єднання в мікротермобатареї).

15. Работоспособность многопарных фрикционных узлов в ленточно-колодочном тормозе буровой лебедки / Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, С. И. Крыштопа, **Д. Ю. Журавлев**, А. В. Возный // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукр. наук.-техн. журн. Івано-Франківськ: Факел, 2012. № 2(43). С. 40 – 48. (*Докторантом оцінено роботоздатність комбінованої гальмової стрічки стрічково-колодкового гальма*).

16. Контактно-імпульсна взаємодія металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв / О. І. Вольченко, Д. О. Вольченко, С. І. Криштопа, **Д. Ю. Журавльов**, М. В. Кашуба // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукр. наук.-техн. журн. Івано-Франківськ: Факел, 2013. № 1(34) С. 111 – 119. (*Докторантом отримано графічні закономірності зміни електрохімічного потенціалу пар тертя гальмового пристрою у випадку прикладання навантаження*).

17. Журавлев Д. Ю. Единое поле взаимодействия металлополимерных пар трения / Д. Ю. Журавлев // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2013. № 1(60). С. 35 – 41.

18. Контактное и контактно-импульсное взаимодействие в многопарных фрикционных узлах ленточно-колодочного тормоза / М. В. Киндрачук, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, А. В. Возный // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2013. № 2(61). С. 4 – 19. (*Докторантом запропоновано закономірності зміни експлуатаційних параметрів багатопарних вузлів тертя при контактній взаємодії поверхонь стрічок*).

19. Журавлев Д. Ю. Энергонагруженность металлополимерных пар трения при фрикционном взаимодействии / Д. Ю. Журавлев // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2014, № 1 (62). С. 54 – 62.

20. Журавлев Д. Ю. Термодинамический предел поверхностных слоев полимерных накладок при фрикционном взаимодействии / Д. Ю. Журавлев // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Харків. 2014. 2/11(68). С. 20 – 26.

21. Журавлев Д. Ю. Физические явления в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза / Д. Ю. Журавльов // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2014, № 2 (63). С. 51 – 60.

22. Электромеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть II) / А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, **Д. Ю. Журавлев**, А. В. Возный, П. С. Красин // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2014. № 3(64). С. 4 – 16. (*Докторантом визначено напруження опору тріциноутворення та зносу робочих поверхонь ободів шківів*).

23. Компьютерное моделирование энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок (часть I) / **Д. Ю. Журавлев**, С. И. Крыштопа, И.О. Бекиш, А. В. Возный, О. Б. Стаднык. Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2014. № 4(65) С.47–59. (*Докторантом обґрунтовано вплив шорсткості металополімерних пар тертя стрічково-колодкових гальм на їх енергонавантаженість*).

24. Компьютерное моделирование энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок (часть II) / М. В. Кин-

драчук, Д. А. Вольченко, С. И. Крыштопа, **Д. Ю. Журавлев**, О. Б. Стадник // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2015, № 1(66), С. 64 – 81. (Докторантом установлено закономірності руйнування заряду тепловими імпульсами).

25. Нанотрибология при фрикционном взаимодействии металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / Д. О. Вольченко, І. О. Бекіш, М. Я. Джавадов, **Д. Ю. Журавльов**, О. Ю. Журавльов, О. Б. Стадник // Науковий Вісник ІФНТУНГ, 2015. № 1(38) С. 35 – 45. (Докторантом запропонована теплова модель і визначення коефіцієнтів розподілу теплових потоків між парами тертя).

26. Журавлев Д. Ю. Возбуждающие факторы в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов (часть 1). / Д. Ю. Журавлев // Підйомно-транспортна техніка: наук.-техн. та вироб. журн. / Одес. нац. політехн. ун-т, Підйом.-трансп. акад. наук України. Одеса, 2015. № 3. С. 64 – 74.

27. Журавлев Д. Ю. Неравновесная трибология при фрикционном взаимодействии пар трения тормозных устройств (часть первая) / Д. Ю. Журавлев // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2015, № 4 (69). С. 43 – 50.

28. Журавлев Д. Ю. Анализ энергонагруженности деталей фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / Д. Ю. Журавлев // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2016, №2 (71). С. 27 – 37.

29. Журавльов Д. Ю. Розрахунок та проектування фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма / Д. Ю. Журавлев // Наукові нотатки: міжвуз. зб. Луцьк: Вид-во ЛНТУ, 2016. Вип. 55. С. 152 – 156.

30. Журавлев Д. Ю. Возбуждающие факторы в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов (часть 2) / Д. Ю. Журавлев // Підйомно-транспортна техніка: наук.-техн. та вироб. журн. Одес. нац. політехн. ун-т, Підйом.-трансп. акад. наук України. Одеса, 2016. №2. С. 4 – 16.

31. Журавлев Д. Ю. Возбуждающие факторы в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов (часть 3) / Д. Ю. Журавлев // Підйомно-транспортна техніка: наук.-техн. та вироб. журн. Одес. нац. політехн. ун-т, Підйом.-трансп. акад. наук України. Одеса, 2016. №3. С. 16 – 26.

32. Журавльов Д. Ю. Параметрический синтез фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / Д. Ю. Журавльов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукр. наук.-техн. журн. Івано-Франківськ: Факел, 2016. № 2(59). С. 31 – 36.

33. Эргодический подход к энергонагруженности и износа пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, І. О. Бекиш, Н. В. Кашуба // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2017. №3(76). С. 28 – 41. (Докторантом досліджено природу нормального зношування вторинних структур I і II типів при електротермомеханічному терті).

34. Принудительное охлаждение фрикционных узлов: эффект «теплового насоса» / М. В. Киндрачук, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, Е. Ю. Андрейчиков // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2017. № 2(75). С. 38 – 48. (Докторантом обґрунтовано можливість керування тепловими потоками від пар тертя гальм за допомогою електричного струму).

35. Влияние двойных электрических слоев в паре трения «металл-электролит-полимер» на ее энергонагруженность (часть I) / А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, В. Я. Малык, **Д. Ю. Журавльов**, П. С. Красин // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2017. № 1(77). С. 17 – 26. *(Докторантом запропоновано підхід з позицій електротермомеханічного тертя до дослідження стрибка потенціалу у парі тертя фази «метал – електроліт» фрикційних вузлів гальмових пристроїв).*

36. Влияние двойных электрических слоев в паре трения «металл-электролит-полимер» на ее энергонагруженность (часть II) / А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, В. Я. Малык, **Д. Ю. Журавльов**, П. С. Красин // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2018. № 1(78), С. 17 – 26. *(Докторантом досліджено окислювально-відновлювальні процеси у парі тертя «метал – електроліт» при фрикційній взаємодії).*

37. Аналіз методів визначення наробок талевих канатів бурових установок / В. Т. Іващенко, М. М. Лях, **Д. Ю. Журавльов**, В. В. Михайлів // Прикарпатський Вісник НТШ: в-во ІФНТУНГ, 2018. № 1(45). С. 219 – 229. *(Докторантом запропоновано аналітичні залежності для визначення навантаження на гаку спуско-підіймального комплексу бурової установки).*

38. Энергетические уровни контактов при фрикционном взаимодействии металлополимерных и полупроводниковых материалов / А. И. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, Н. В. Кашуба, В. С. Витвицкий, В. М. Чуфус // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2018. № 4(81). С. 21 – 32. *(Докторантом оцінено дію блокуючого контакту мікрОВиступів пар тертя і проілюстровано його вплив на їх загальну енергонавантаженість).*

39. Термоэлектрический метод подбора пар трения тормозных устройств (часть первая) / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, В. С. Скрыпник, **Д. Ю. Журавлев**, Е. С. Федотов // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2019. №3 (84). С. 4 – 13. *(Докторантом проаналізовано контактно-імпульсну взаємодію мікрОВиступів поверхонь тертя з різними градієнтами температур).*

40. Оценка теплопередачи через металлические фрикционные элементы тормозных устройств ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок. Д. А. Вольченко, В. С. Скрыпник, **Д. Ю. Журавлев**, В. М. Чуфус. Збірник наук. пр. Укр. інж.-педагог. акад.: Машинобудування. Харків, 2019. С. 76 – 87. *(Докторантом визначено коефіцієнти теплопередачі крізь елементи пар тертя стрічково-колодкового гальма бурової лебідки).*

41. Экспериментальные исследования мокрых пар трения дисково-колодочных тормозов транспортных средств. / М. В. Киндрачук, В. С. Скрыпник, **Д. Ю. Журавлев**, И. О. Бекиш, А. Н. Вудвуд. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2020. № 2(87). С.11 – 20. *(Докторантом запропоновано конструктивні рішення для видалення вологи з поясів тертя гальмових дисків).*

42. Энергонавантаженість самовентильованих дисків з елементами охолодження гальм транспортних засобів (Частина I) / О. І. Вольченко, В. С. Скрипник, **Д. Ю. Журавлев**, О. М. Вудвуд, Л. Б. Малик // Підйомно-транспортна техніка: наук.-техн. та вироб. журн. Одес. нац. політехн. ун-т, Підйом.-трансп. акад. наук України. Одеса, 2020. № 3(64). С. 27 – 36. *(Докторантом розроблено етапи дослідження самовентильованих дисків гальм транспортних засобів).*

43. Внешнее трение материалов фрикционных узлов тормозных устройств / Д. А. Вольченко, М. В. Кіндрачук, В. С. Скрипник, **Д. Ю. Журавлев**, В. Я. Малык, Е. Ю. Андрейчиков // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2021. № 1(90). С.30 – 41. (*Докторантом досліджено енергетичні рівні і принципи пристосовуваності матеріалів пар тертя*).

44. Дослідження водневого зносу важконавантажених металевих фрикційних елементів гальм / Д. О. Вольченко, М. В. Кіндрачук, В. С. Скрипник, **Д. Ю. Журавлев**, М. М. Романів // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2021. № 2(91). С.37 – 45. (*Докторантом розроблено етапи дослідження водневого зносу робочих поверхонь металевого елемента тертя гальма при електротермомеханічному терті*).

45. Сучасні методи оцінки інтенсивності зносу фрикційних накладок гальм транспортних засобів / Д. О. Вольченко, М. В. Кіндрачук, В. С. Скрипник, **Д. Ю. Журавльов**, А. В. Присяжний, В. Т. Болонний // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2021. № 4(93). С.48 – 57. (*Докторантом запропоновано аналітичні залежності для оцінки ресурсу фрикційних накладок пар тертя дисково-колодкових гальм транспортних засобів*).

46. Термоелектричні інтенсифікатори теплообміну у парах тертя гальм / М. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, В. В. Ніщук, О. С. Бурава, Л. Б. Малик // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2022. № 1(94). С.59 – 68. (*Докторантом запропоновано принципи розробки пристроїв та систем термоелектричних інтенсифікаторів охолодження фрикційних вузлів*).

47. Фізичні методи оцінки навантаженості пар тертя гальмівних пристроїв / М. В. Кіндрачук, Д. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, Е. Ю. Андрейчиков, А. В. Присяжний. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2022. № 3(96). С.53 – 63. (*Докторантом проаналізовано теплонавантаженість поверхневого та приповерхневого шарів елементів тертя металополімерних пар*).

48. Крекінг-процес при електротермомеханічній фрикційній взаємодії в парах тертя (частина 1) / М. В. Кіндрачук, Д. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, Е. Ю. Андрейчиков, А. В. Присяжний // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2022. № 4(97). С.10 – 23. (*Докторантом запропоновано конструкцію випробувального стенда для дослідження крекінг-процесу в робочому шарі полімерної накладки*).

49. Вплив електричного і теплового струмів на поведінку водня у парах тертя / Д. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, О. С. Бурава, В. І. Снурніков, Л. В. Разарьонов // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Вип. 99. – 2022 р. С. 74 – 83. (*Докторантом досліджено вплив електричного струму на поведінку водню в парах тертя гальма*).

50. Деструкція матеріалів фрикційних накладок гальм / Д. О. Вольченко, М. В. Кіндрачук, **Д. Ю. Журавльов**, Є. Ю. Андрейчиков, О. С. Бурава. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2023. № 1(98). С.98 – 107. (*Докторантом проаналізовано деструктивні процеси, які мають місце у матеріалах фрикційних накладок*).

51. Енергонавантаженість металевих фрикційних елементів гальм / О. І. Вольченко, А. Х. Джанахмедов, В. С. Скрипник, **Д. Ю. Журавльов**, Є. Ю. Андрей-

чиков. // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Том 2. Вип. 101. – 2023 р. С. 31 – 39. *(Докторантом проведено аналіз енергонавантажених та визначено напруження в ободі гальмового шківів)*.

52. Взаємозв'язок зносо-фрикційних властивостей та енергонавантажених пар тертя гальмових пристроїв / М. В. Кіндрачук, **Д. Ю. Журавльов**, С. А. Приколотін, Є. Ю. Андрейчиков, О. С. Бурава // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2023. № 3(100). С.4 – 14. *(Докторантом запропоновано попередні аналітичні залежності з визначення основних експлуатаційних параметрів пар тертя стрічково-колодкового гальма)*.

Статті, у наукових виданнях, які мають індексування у міжнародній наукометричній базі даних Scopus:

53. Electrodynamics of frictional interaction in tribolink "metal-polymer" / N. A. Volchenko, P. S. Krasin, A. I. Volchenko, **D. Yu. Zhuravlev** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 327 (3), art. no. 032058. P. 1 – 9. *(Докторантом доведено утворення подвійного електричного шару і асиметричного розподілу заряджених частинок біля межі фази)*.

54. Electrodynamics of the Thermal Contact Friction Interaction in Metal-Polymer Friction Couples / M.V. Kindrachuk, A. I. Vol'chenko, D. A. Vol'chenko, **D. Y. Zhuravlev**, V. M. Chufus // Materials Science. 2018. 54 (1), P. 69 – 77. *(Докторантом доведено ефективність використання мікротермоелектробатарей у метало-полімерних парах тертя гальмових пристроїв)*.

55. Features of the estimation of the intensity of heat exchange in self-ventilated disk-shoe brakes of vehicles / N. Volchenko, A. Volchenko, D. Volchenko, P. Polyakov, V. Malyk, **D. Zhuravlev**, V. Vytvytskyi, P. Krasin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. 1/5(97). P. 47 – 53. *(Докторантом визначено інтенсивність процесу теплопередачі від зовнішніх та внутрішніх поверхонь металевих елементів пари тертя)*.

56. Wear Resistance of Spark Ignition Engine Piston Rings in Hydrogen-Containing Environments / Myroslav Kindrachuk, Dmytro Volchenko, Alexander Balitskii, Karol F. Abramek, Mykola Volchenko, Olexiy Balitskii, Vasyl Skrypnyk, **Dmytro Zhuravlev**, Alina Yurchuk, Valerii Kolesnikov // Energies 2021, 14, 4801. <https://doi.org/10.3390/en14164801>. P. 1 – 13. *(Докторантом проведено дослідження взаємодії зовнішнього та внутрішнього водню у парі тертя «циліндр – поршневе кільце»)*.

57. Nanofluids in Cooling Systems and Their Efficiency / D. A. Volchenko, M. V. Kindrachuk, B.V. Dolishniy, V.S. Skrypnyk, **D.Yu. Zhuravlov**, L. B. Malyk, A.O. Yurchuk, A.O. Dukhota. JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS Vol. 13 № 4, 04013 (8pp) (2021). P. 1 – 8. *(Докторантом запропоновано моделі нанорідин, ураховані в базових рівняннях)*.

58. Hydrogen Containing Nanofluids in the Spark Engine's Cylinder Head Cooling System / Alexander Balitskii, Myroslav Kindrachuk, Dmytro Volchenko, Karol F. Abramek, Olexiy Balitskii, Vasyl Skrypnyk, **Dmytro Zhuravlev**, Iryna Bekish, Mykola Ostashuk, Valerii Kolesnikov. Energies 2022, 15, 59. <https://doi.org/10.3390/en15010059>. P. 1 – 21. *(Докторантом встановлено фактори, які впливають на коефіцієнт теп-*

лопровідності нанорідин).

59. Complex Heat Exchange in Friction Steam of Brakes / Ivan Kernitsky, Aleksandr Volchenko, Olga Szlachetka, Orest Horbay, Vasyl Skrypnyk, **Dmytro Zhuravlev**, Vasyl Bolonnyi, Volodymyr Yankiv, Ruslan Humenuk, Pavlo Polansky, Aleksandra Lesniewska, Darius Walasek, Eugeniusz Koda. *Energies* 2022, 15, 7412. <https://doi.org/10.3390/en15197412>. P. 1 – 11. (Докторантом побудовано графіки та проаналізовано закономірності зміни термічного опору гальмових дисків в залежності від їх товщини і коефіцієнтів теплопровідності матеріалів).

60. The Efficiency of Convective Heat Exchange at the Airflow of Metal Friction Elements of Brakes / Vasiliy Skripnik, Oleksandr Vudvud, **Dmitry Zhuravlev**, Sergiy Nikipchuk, and Tetiana Danulyak // *Lecture Notes in Mechanical Engineering* this link is disabled, 2023, ME, pp. 574–583, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_54. pp. 574–583 (Докторантом встановлено фактори, що впливають на ефективність конвективного теплообміну у фрикційних вузлах гальм).

61. Thermoelectric Generators Current Intensifiers / M.V. Kindrachuk, D. O. Volchenko, **D. Yu. Zhuravlev**, M. M. Ostashuk, R.Ya. Kachmar // *JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS* Vol. 15 No 4, 04038(6pp) (2023). pp. 1 – 6. (Докторантом визначено ефекти, які супроводжують роботу термоелектрогенератора).

62. Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes / M. Kindrachuk, D. Volchenko, N. Fidrovskaya, O. Dukhota, **D. Zhuravlev**, M. Ostashuk, Yu. Porokhovskiy, V. Kharchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* ISSN 1729-3774 4/12 (124) 2023. pp. 56 – 61. (Докторантом оцінено інтенсивність зношування матеріалів фрикційних накладок різних шифрів).

Статті у наукових виданнях інших держав:

63. Контактно-импульсное взаимодействие материалов типа "металл-металл" и "полимер-полимер" в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, С. И. Крыштопа, **Д. Ю. Журавлев**, Н. М. Стебелецкая // *Вестник Азербайджанской инженерной академии*. Баку, 2013. № 2 (5). С. 29 – 40. (Докторантом розглянуто електродинаміку контактної взаємодії у приповерхневому шарі полімерної накладки).

64. Фрикционное взаимодействие в электрических полях металлополимерных пар трения / А.Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Э. С. Пирвердиев, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев** // *Вестник Азербайджанской инженерной академии*. Баку, 2014. № 2 (6). С. 30 – 53. (Докторантом здійснено вибір матеріалу електрода та проаналізовано його поведінку при фазовому переході другого роду).

65. The frictional interresection in electrical and thermal fields of metal friction pairs / A. Kh. Jasnahmadov, A. I. Volchenko, E. S. Pirverdiev, D. A. Volchenko, N. A. Volchenko, **D. Yu. Zhuravlov** // *Science and Applied Engineering Quarterly*. London. UK. Issue 03, Apr-May-June - 2014, 2014. P. 5 – 19. (Докторантом досліджено термічний вплив на властивості металополімерних пар тертя).

66. Электротермомеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть I) / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Э. С. Пирвердиев, **Д. Ю. Журавлев**, А. В. Возный, П. С. Красин. Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2015. № 1 (7). С. 36 – 56. *(Докторантом оцінено напружений стан ободу гальмового шків стрічково-колодкового гальма).*

67. Электротермомеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть II). А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Э. С. Пирвердиев, **Д. Ю. Журавлев**, А. В. Возный, П. С. Красин // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2015. № 2(7). С. 44 – 64. *(Докторантом встановлено закономірності зародження і розвитку тріщин на робочій поверхні ободу шків).*

68. Оценка энергетических уровней различных типов контактов микровыступов пар трения трибосистемы / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, С. И. Крыштопа, **Д. Ю. Журавлев** // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2015. № 3(7). С. 26 – 37. *(Докторантом визначено омічний опір пар тертя гальм).*

69. Электротермомеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть III) / А. Х. Джанахмедов, Э. С. Пирвердиев, Б. В. Копей, Л. М. Замиховский, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, А. В. Возный // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2016. № 1 (8). С. 27 – 51. *(Докторантом досліджено фактори поверхневого руйнування при електро-термомеханічному терті металополімерних пар тертя).*

70. Электротермомеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть IV) / А. Х. Джанахмедов, Э. С. Пирвердиев, Б. В. Копей, Л. М. Замиховский, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, А. В. Возный // Вестник Азербайджанской Инженерной Академии. Баку, 2016. № 2 (8). С. 18 – 33. *(Докторантом досліджено динаміку розподілу напружень у складених з циліндричних дисків гальмових шків).*

71. Расчет и конструирование пар трения дисково-колодочных тормозов транспортных средств (часть I) / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Э. С. Пирвердиев, **Д. Ю. Журавлев**, А. В. Возный, В. С. Витвицкий. Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2018. № 4 (10). С. 7 – 17. *(Докторантом досліджено властивості електротеплого шару поясу тертя гальмового диска).*

72. Влияние влаги на эксплуатационные параметры трибосопряжений тормозных устройств и ее удаление с их поверхностей / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, М. Я. Джавадов, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, Е. С. Федотов // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2019. № 2(11). С.15 – 23. *(Докторантом проаналізовано особливості конструкції та роботи пристрою для видалення вологи з поверхонь тертя барабанно-колодкового гальма).*

73. Тепловой баланс самовентилируемых с шипами дисково-колодочных тормозов транспортных средств / М. Я. Джавадов, **Д. Ю. Журавлев**, М. М. Насирова, В. Я. Попович, И. О. Бекиш, А. Н. Вудвуд // Вестник Азербайджанской инженерной академии, Баку, т. 12, №1, 2020. – С. 26 – 38. *(Докторантом сформульовано умови невиникнення мікротріщин).*

74. Напряженно-деформируемое состояние самовентилируемых с шипами дисково-колодочных тормозов транспортных средств / М. Я. Джавадов, **Д. Ю. Журавлев**, М. М. Насирова, В. С. Скрыпник, В. С. Витвицкий, В. С. Федотов // Вестник

Азербайджанской инженерной академии, Баку, т. 12, №2, 2020. – С. 32 – 42. (*Докторантом показано вплив енергонавантажності самовентильованих гальмових дисків з циліндричними шипами на їх напружено-деформований стан*).

75. Оценка термического потенциала в сплошном диске тормоза транспортного средства / М. Я. Джавадов, Б. В. Долишний, В. С. Скрыпник, **Д. Ю. Журавлев**, М. М. Насирова, Н. А. Вольченко, Л. Б. Малык // Вестник Азербайджанской инженерной академии, Баку, т. 13, №2, 2021. – С. 27 – 39. (*Докторантом обґрунтовано виникнення потенціалів, що діють у полях пар тертя гальм*).

76. Водородный износ рабочих поверхностей металлических фрикционных элементов тормозов / А. Х. Джанахмедов, В. С. Скрыпник, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, А. Н. Вудвуд // Вестник Азербайджанской инженерной академии, Баку, т. 13, №3, 2021. – С. 14 – 24. (*Докторантом запропоновано засоби, які запобігають виділенню водню із сталеві поверхні ободу шківів за рахунок обмеження руху його іонів*).

77. Оценка энергетических уровней контактов и трибологических свойств материалов пар трения / А. Х. Джанахмедов, Н. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, **Д. Ю. Журавлев**, С. А. Шешерина, Н. Н. Романив // Вестник Азербайджанской инженерной академии, Баку, т. 13, №4, 2021. – С. 14 – 21. (*Докторантом встановлено вплив дифузійної металізації і поверхневого пластичного деформування на відносну зносостійкість та шорсткість зразків із сталі X12МФ*).

78. Роль пятен контактов микровыступов пар трения в энергонагруженности тормозных устройств / Д. А. Вольченко, Г. Ф. Мираламов, В. С. Скрыпник, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**. // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2022. № 2(14). С.64 – 73. (*Докторантом встановлено вплив площі плям контактів мікрОВиступів на інтенсивність формування теплових полів у парах тертя гальмових пристроїв*).

79. Неравновесная термодинамика с линейными режимами в трибосопряжении (часть II) / А. Х. Джанахмедов, **Д. Ю. Журавлев**, В. Н. Вольченко, В. Т. Болонный, В. Я. Малык // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2022. № 3(14). С.12 – 23. (*Докторантом проаналізовано закони та ефекти, які супроводжують дифузію і термодифузію у трибоспряженнях*).

80. Водородное изнашивание пар трения ленточно-колодочного тормоза / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, **Д. Ю. Журавлев**, Е. Ю. Андрейчиков, В. В. Нищук, Н. А. Вольченко, А. С. Евченко. // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2023. № 1(15). С. 43 – 55. (*Докторантом з урахуванням компонентів сталі 35ХНЛ та їх взаємодії з атомарним воднем здійснено аналіз особливостей водневого зношування пар тертя стрічково-колодочного гальма бурової лебідки*).

81. Седиментация и диффузия в наножидкости во вращающихся системах металлических фрикционных элементов тормозов (ч. I) / А. Х. Джанахмедов, Н. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, В. В. Нищук, Е. Ю. Андрейчиков, В. С. Скрыпник, **Д. Ю. Журавлев** // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2023. №2 (15). С. 15 – 23. (*Докторантом оцінено седиментацію з використанням градієнтної теорії до тиску, швидкості, парціального та питомого об'єму, масової та мольної концентрації, а також визначено коефіцієнт седиментації*).

82. Седиментация и диффузия в наножидкости во вращающихся системах металлических фрикционных элементов тормозов (ч. II) / А. Х. Джанахмедов, Н. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, Д. А. Вольченко, А. С. Бурава, А. В. Присяжный, **Д. Ю. Журавлев** // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2023. №3 (15). С. 28 – 38. *(Докторантом аналітично описано дифузійно-седиментальні процеси в обертових металевих фрикційних елементах гальмових пристроїв).*

83. Седиментация и диффузия в наножидкости во вращающихся системах металлических фрикционных элементов тормозов (ч. III) / А. Х. Джанахмедов, Н. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, Д. А. Вольченко, Н. Н. Фидровская, **Д. Ю. Журавлев**, О. М. Алейникова, В. С. Скрипник, Е. Д. Слепужников // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2023. №4 (15). С. 14 – 20. *(Докторантом отримано результати експериментальних досліджень на модельному стрічково-колодковому гальмі та встановлено ефективність охолодження пар тертя).*

84. Эффект сверхпроводимости в парах трения тормозов / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, М. Я. Джавадов, Н. Н. Фидровская, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, В. Н. Луний // Вестник Азербайджанской инженерной академии. Баку, 2024. №1 (16). С. 19 – 30. *(Докторантом визначено функції спареного електрона у надпровідності).*

Патенти на винахід України:

85. Пат. 112900 України, F16D 49/08, F16D 49/10, F16D 49/12, B66D 5/02, B66D 5/08, B66D 5/10. Пневмокамерне двоступеневе стрічково-колодкове гальмо. Вольченко О. І., Вольченко Д. О., **Журавльов Д. Ю.**, Возний А. В., Стадник О. Б.; заявник і патентовласник ІФНТУНГ. № а201500336; заявл. 16.01.2015; опубл. 10.11.2016. Бюл. №21. 7 с. *(Докторантом здійснено патентний пошук та запропоновано нові конструкції пневмокамер гальма).*

86. Пат. 116249 Україна, МПК F16D 65/78 (2006.01), F16D 69/02 (2006.01). Энергоёмні пари тертя важконавантажених фрикційних вузлів / Вольченко Д. О., Кіндрачук В. М., Вольченко М. О., Криштопа С. І., **Журавльов Д. Ю.**, Возний А. В.; заявник і патентовласник ІФНТУНГ. № а201512824; заявл. 24.12.2015; опубл. 26.02.2018. Бюл. № 4. 18 с. *(Докторантом запропоновано нові матеріали для фрикційного вузла гальмового пристрою).*

87. Пат. UA 118819 C2 України. Стрічково-колодкове гальмо. / М. М. Лях, **Д. Ю. Журавльов**, О. Ю. Журавльов, В. В. Михайлів. Заявник та патентовласник ІФНТУНГ. № а 201707992; заявл. 31.07.2017; опубл. 11.03.2019, Бюл. №5. 4 с. *(Докторантом за результатами патентного пошуку запропоновано нову конструкцію стрічково-колодкового гальма).*

88. Пат. UA 126018 C2 України. Спосіб дослідження процесів трибокрекінгу під час фрикційної взаємодії в металополімерних парах тертя та пристрій його здійснення. / О. І. Вольченко, Д. О. Вольченко, М. Й. Бурда, Л. Я. Роп'як, **Д. Ю. Журавльов**, В. С. Витвицький, М. В. Шовкопляс. Заявник та патентовласник ІФНТУНГ. № 201809783; заявл. 01.10.2018; опубл. 04.08.2022, Бюл. №31. 11 с. *(Докторантом запропоновано пристрій для дослідження процесів трибокрекінгу в металополімерних парах тертя).*

Патенти інших держав на винахід:

89. Пат. і 20150016 Азербайджанської республіки F16D49/08. № а 20130058 – Ленточно-колодочный тормоз с многопарными фрикционными узлами. Вольченко А. И., Джанахмедов А. Х., Вольченко Н. А., Джавадов М. Я., **Журавлев Д. Ю.** Заявник та власник Азербайджанськ. інжен. акад. №а 20130037. Заявл. 16.04.2013. Опубл. 29.05.2015., Бюл. №2. 2 с. (*Докторантом запропоновано конструкцію багатопарного фрикційного вузла*).

90. Пат. і 20130076 Азербайджанської республіки F16D49/08. Ленточно-колодочный тормоз с кондуктивным охлаждением. Пашаев Ариф Мирцелал Огли, Джанахмедов Ехед Ханахмед Огли, Алієв Елесгер Мехеррем Огли, Вольченко Н. А., Вольченко Д. О., **Журавлев Д. Ю.** Заявник та власник Азербайджанська інженерна академія №а 20130038 Заявл. 16.03.2013. Опубл. 27.12.2013., Бюл. №6. 10 с. (*Докторантом удосконалено конструкцію гальмового шків стрічково-колодкового гальма*).

91. Пат. і 20130077 Азербайджанської республіки. Ленточно-колодочный тормоз буровой лебедки. Пашаев Ариф Мирцелал Огли, Джанахмедов Ехед Ханахмед Огли, Алієв Елесгер Мехеррем Огли, Вольченко Н. А., Вольченко Д. О., **Журавлев Д. Ю.** Заявник та власник Азербайджанськ. інжен. акад. №а 20130077. Заявл. 16.03.2013. Опубл. 27.12.2013., Бюл. №5. 10 с (*Докторантом запропоновано нові конструкції стрічково-колодкових гальм*).

Тези наукових доповідей українських конференцій:

92. Вольченко Д. О. Оцінка теплової навантаженості металевих фрикційних елементів гальмівних пристроїв при визначенні їх раціональних конструктивних параметрів / Д. О. Вольченко, **Д. Ю. Журавльов**, В. І. Снурніков // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали IV міжнародної наук.-практ. конф. (24 – 26 жовтня 2011, м. Вінниця). Вінниця, 2011. С. 26 (*Докторантом визначено співвідношення коефіцієнтів випромінювання з матової та полірованої поверхонь барабана*).

93. Журавльов Д. Ю. Обґрунтування конструктивних параметрів багаторядних стрічково-колодкових гальм / **Д. Ю. Журавльов**, О. Ю. Журавльов // 10-й міжнар. симпоз. укр. інж.-мех. у Львові: тези доповідей (25 – 27 травня 2011, м. Львів). Львів, 2011. С. 338. (*Докторантом запропоновано різні типи конструкцій вузлів гальма*).

94. Журавльов Д. Ю. Энергетические уровни в едином поле металлополимерных пар трения тормозных устройств. / Д. Ю. Журавльов // Енергоощадні машини і технології. Секція: підйомно-транспортні машини та системи, сервіс та надійність машин: міжнар. наук.-техн. конф. (28-30 травня 2013, м. Київ). Київ, 2013. С. 25-27.

95. Скрипник В. С. До питання визначення теплових втрат від металевих фрикційних елементів гальмівних пристроїв / В. С. Скрипник **Д. Ю. Журавльов**, Є. Ю. Адрейчіков // LXXI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. Київ, 2015. С. 552. (*Докторантом визначено теплові втрати від металевого фрикційного елемента*).

96. Бекіш І.О. Технічні вимоги і умови роботи фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма бурової лебідки. / І. О. Бекіш, Д. Ю. **Журавльов**, В. С. Витвицький / *Машини, обладнання для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу: матеріали міжнар. науково-техн. конф (16-20 травня 2016, м. Івано-Франківськ). Івано-Франківськ, 2016. С. 296 – 299 (Докторантом проаналізовано умови роботи фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм).*

97. Журавльов Д. Ю. Розрахунок та проєктування фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма / Д. Ю. Журавльов // *Наукові нотатки: міжвуз. зб. (за галузями знань «Технічні науки»)*, Луцьк: Вид-во ЛНТУ. Луцьк, 2016. Липень-вересень, 2016 Випуск 55. С. 152-156.

98. Журавльов Д. Ю. Аналіз методів охолодження шківів стрічково-колодкового гальма бурових лебідок / Д. Ю. Журавльов // *Наука-освіта-виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку: матеріали всеукр. науково-техн. конф. (2 – 3 березня 2017, м. Дрогобич). Дрогобич, 2017. С. 80 – 84.*

99. Вольченко Д. А. Градиентная теория оценки коэффициентов теплопередачи в усовершенствованных парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. / Д. О. Вольченко, Д. Ю. **Журавльов**, В. М. Чуфус // *Наукові розробки: перспективи 21 сторіччя: матеріали V міжнар. науково-практ. конф. студентів та молодих вчених (19 квітня 2017, м. Краматорськ). Краматорськ, 2017. С. 31 – 40 (Докторантом визначено коефіцієнти теплопередачі в удосконалених парах тертя).*

100. Влияние двойных электрических слоев в паре трения «металл – электролит – полимер» на ее энергонагруженность / П. С. Красин, А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. Ю. **Журавлев** // *Нові виклики. Нові досягнення: матеріали X міжнар. науково-практ. конф. студентів та молодих вчених (15 вересня 2017, м. Краматорськ). Краматорськ, 2017. С. 13 – 17. (Докторантом проаналізовано перебіг окислювально-відновлювальних процесів у парі тертя «метал - електроліт» при фрикційній взаємодії).*

101. Снижение энергонагруженности пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / А. И. Вольченко, В. С. Скрипник, Д. Ю. **Журавлев**, В. Я. Малык // *Наукові дослідження: перспективи інновацій у суспільстві і розвитку технологій: матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції (13-14 жовтня 2017, м. Харків). Харків: НП «ЦНТ», 2017. С. 62 – 66 (Докторантом запропоновано засоби зниження енергонавантаженості пар тертя стрічково-колодкового гальма).*

102. Робастний підхід при визначенні термодинамічної границі у поверхневих шарах полімерних накладок при фрикційній взаємодії стрічково-колодкових гальм бурових лебідок / О. І. Вольченко, І. О. Бекіш, В. С. Скрипник, Д. Ю. **Журавльов** // *Нафтогазова галузь: Перспективи нарощування ресурсної бази (ІГГ – 2018): матеріали міжнар. науково-техн. конф. (23-25 травня 2018, м. Івано-Франківськ). Івано-Франківськ, 2018 р. С. 206 – 209. (Докторантом визначено термодинамічну границю у поверхневих шарах полімерних накладок).*

103. Журавльов Д. Ю. Оцінка експлуатаційних параметрів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок / Д. Ю. **Журавльов**, С. В. Шимко, Т. В. Яців // *Нафта і газ. Наука – Освіта – Виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку: матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Дрогобич, 27*

травня 2022 р.). – Дрогобич: ТзОВ«Трек-ЛТД», 2022., С. 62 – 67. *(Докторантом визначено основні експлуатаційні параметри модернізованих стрічково-колових гальм).*

104. Стан надпровідності в парах тертя гальм / М. Кіндрачук, Д. Вольченко, І. Бекіш, В. Малик, Л. Малик, **Д. Журавльов** // 16-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 18 травня – 19 травня 2023 р.) : Матеріали симпозіуму. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2023. С. 61 – 62. *(Докторантом обґрунтовано виникнення невідомого явища надпровідності у матеріалах пар тертя гальм).*

105. Електротепломеханічне тертя в гальмівних пристроях / О. Вольченко, Д. Вольченко, **Д. Журавльов**, В. Малик, В. Бреньо // Нафта і газ. Наука – Освіта – Виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку: матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Дрогобич, 11-12 травня 2023 р.). – Дрогобич: ТзОВ«ТрекЛТД», 2023. С. 98 – 104 *(Докторантом визначено динамічний коефіцієнт тертя в гальмових пристроях).*

106. Енергонавантаженість металевих фрикційних елементів гальм / О. І. Вольченко, А. Х. Джанахмедов, В. С. Скрипник, Д. Ю. Журавльов, Є. Ю. Андрейчиков // Розбудова і відновлення машинобудівного комплексу України – 2023: збірник тез міжнародної конференції. – Харків, ХНАДУ, 2023 р. – С. 51 – 54 *(Докторантом запропоновано шляхи зменшення енергонавантаженості металевих фрикційних елементів гальм).*

Тези конференцій інших держав:

107. Модифицированные фрикционные накладки для тяжело нагруженных узлов тормозов / А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, О. Б. Стаднык, **Д. Ю. Журавлев** // Scientific thought transformation: proceedings of X International scientific conference (22 september 2017, Morrisville). Morrisville: Lulu Press., 2017. P. 17 – 21 *(Докторантом обґрунтовано вибір напівпровідників на основі оксиду міді та оксиду алюмінію).*

108. Оценка процессов трибокрекинга при фрикционном взаимодействии металлополимерных пар трения / Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, А. С. Евченко, В. С. Витвицкий // Perspectives of science and education: proceedings of 12th International youth conference (27 September 2019, New York, USA) New York: Slovo\Word, 2019. С. 542 – 556. *(Докторантом визначено відсоткове співвідношення компонентів газової суміші, утвореної у міжконтактному просторі пари тертя).*

109. Теплообменные процессы при охлаждении пар трения тормозных устройств / Д. А. Вольченко, **Д. Ю. Журавлев**, В. С. Витвицкий, Е. С. Федотов, В. Н. Вольченко // Advances of science: proceedings of articles the international scientific conference (6 December 2019, Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv). 2019. С. 168 – 177. *(Докторантом визначено коефіцієнти теплопередачі крізь металеві елементи тертя гальмових пристроїв).*

110. Журавлев Д. Ю. Внешнее трение фрикционных узлов тормозов / Д. Ю. Журавлев // WORLD SCIENCE: PROBLEMS, PROSPECTS AND INNOVATIONS Abstracts of V International Scientific and Practical Conference Toronto, Canada 27-29 January 2021 Toronto, Canada 2021. P. 558-568.

111. К вопросу водородного износа металлических элементов трения тормозов / В. С. Скрыпник, Д. Ю. Журавлев, А. С. Евченко, В. Н. Вольченко // RESULTS OF MODERN SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT Proceedings of I International Scientific and Practical Conference Madrid, Spain 4-6 April 2021 P. 162-171 (*Докторантом запропоновано методи і засоби захисту пар тертя гальмових пристроїв від водневого зношування*).

112. Оценка триботехнических свойств материалов на машине трения и износа СМЦ-2 / В. С. Скрыпник, Д. Ю. Журавлев, Н. Н. Романив, А. Н. Вудвуд // ACTUAL TRENDS OF MODERN SCIENTIFIC RESEARCH Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference Munich, Germany 6-8 June 2021 P. 256-265 (*Докторантом проведено випробовування пар тертя «колодочка – диск*).

113. Эффективность теплообмена в парах трения тормозов / Скрыпник В. С., Журавлев Д. Ю., Андрейчиков Е. Ю., Болонный В. Т. // The 2nd International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (November 7-9, 2021) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2021. P.292-302 (*Докторантом оцінено сумісну дію полів конвекції від омиваючого повітря і теплопровідності металевих фрикційних елементів гальм*).

АНОТАЦІЯ

Журавльов Д. Ю. Синтез і аналіз процесів фрикційної взаємодії стрічково-колодкових гальм – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового степеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.05 – піднімально-транспортні машини – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2024.

В дисертаційній роботі проведено системний аналіз закономірностей зміни експлуатаційних параметрів в залежності від конструктивних параметрів фрикційного вузла стрічково-колодкового гальма з урахуванням їх впливу на енергонавантаженисть та ефективність дії. Фрикційний вузол представлено як трибосистему з робастним підходом до розрахунку та проектування його пар тертя. При параметричному синтезі враховано якість поверхні фрикційної взаємодії, стійкість та стабільність експлуатаційних параметрів. При робастному підході здійснено регулювання та керування режимами гальмування і оптимізацію конструктивних та експлуатаційних параметрів фрикційних вузлів.

Виконано порівняльний аналіз за параметрами ефективності й енергоємності різних типів фрикційних вузлів гальма і здійснено вибір їх пар тертя для переважаючих режимів гальмування.

Запропоновано низку методів та засобів покращення зносо-фрикційних властивостей металополімерних пар тертя гальма шляхом квазівирівнювання в них питомих навантажень і забезпечення прогнозованих поверхневих градієнтів температури і температурних напружень з раціональним вибором матеріалів елементів пари тертя.

Метою роботи є підвищення ефективності фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм з урахуванням робастних властивостей їхніх трибосистем і запобігання виникненню при цьому негативних наслідків.

Ключові слова: стрічково-колодкове гальмо, фрикційний вузол, пара тертя,

робастний підхід з його складовими, структурно-параметричний синтез, гальмова стрічка, фрикційна накладка, гальмовий шків, динамічна і теплова навантаженість.

ABSTRACT

Zhuravlyov D. Yu. Synthesis and analysis of the frictional interaction processes of belt-pad brakes - Qualification research paper with manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.05.05 - lifting and transport machines - Kharkiv National Automobile and Road University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

In the dissertation, a systematic analysis of the patterns of changes in operational parameters depending on the design parameters of the friction assembly of the belt-pad brake was carried out, taking into account their influence on the energy load and efficiency of operation. The friction unit is presented as a tribosystem with a robust approach to the calculation and design of its friction pairs. The parametric synthesis takes into account the quality of the friction interaction surface, stability and stability of operational parameters. With a robust approach, regulation and control of braking modes and optimization of design and operational parameters of friction assemblies were carried out.

A comparative analysis of the parameters of efficiency and energy consumption of different types of friction brake assemblies was performed and their friction pairs were selected for the prevailing braking modes.

A number of methods and means of improving the wear-friction properties of metal-polymer friction pairs of the brake by quasi-draining specific loads in them and ensuring predicted surface temperature gradients and temperature stresses with a rational choice of materials of friction pair elements are proposed.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the friction units of belt-pad brakes, taking into account the robust properties of their tribosystems and preventing the occurrence of negative consequences.

To solve the complex robust problem, the following tasks were considered:

- to carry out a systematic analysis of the patterns of changes in the operational parameters of the belt-pad brake, taking into account their influence on the state of the contact spots of the microprotrusions of the metal-polymer friction pairs;
- to evaluate the quality of frictional systems using direct indicators and indirect criteria and to monitor the processes of genesis and development of transient processes in them;
- to analyze the conditions for ensuring the stability of a discrete contact during the frictional interaction of microprotrusions of the friction pair "pad-pulley disc" by the method of extended amplitude-phase-frequency characteristics of Nyquist stability;
- to determine the influence of disturbing factors on the degree of destabilization of the operational parameters of the friction brake assemblies;
- to evaluate the energy load of brake friction pairs and the effect on it of the conditions of regulation and management of operational parameters;
- to perform a structural and parametric synthesis of robust systems when controlling the modes of operation of the belt-pad brake of a drilling winch;
- to optimize the design and operational parameters of friction brake units using geometric programming and a multi-criteria method;

- to carry out an energy assessment of the resource of the friction linings of the brake friction units.

The scientific newness of the obtained results is that, for the first time, the effectiveness of a robust approach to the synthesis and analysis of the performance of a tribosystem, which is a friction node, in the calculation and design of its elements, has been theoretically substantiated and practically confirmed. At the same time, for the first time:

- the methods of calculating the parametric synthesis of friction pairs of friction nodes have been improved, taking into account the energy levels of their surface and near-surface layers;
- the methods of regulating and controlling the energy load of the friction pairs of belt-pad brakes with their predicted external operating parameters, which are in a steady and stable state, are proposed;
- a new phenomenon of mass transfer of friction products (which is a disturbing factor) in metal-polymer friction pairs of belt-pad brakes was discovered;
- the energy method of assessing the intensity of wear of the working surfaces of friction linings with the simultaneous selection of their rational design parameters was developed.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of purposeful calculation and design of friction assemblies of a belt-pad brake based on:

- a systematic determination of the permissible limits of changes in dynamic and thermal parameters and their gradients, taking into account the cause-and-effect relationship;
- the development of the principles of equalization of specific loads and surface temperatures by quasi-stabilization of their values with the help of combined brake bands and brake pulleys are composed of discs;
- a systematized sequence of patterns of changes in the main operational parameters of brake friction pairs for their effective design;
- the improvement and the development of new structural types of heavily loaded friction assemblies of brake devices for: increasing efficiency by adjusting specific loads and increasing the mutual overlap ratio; the forecasting to prevent the formation of microcracks on the working surface of the pulley rim.

The proposed new types of friction assemblies and brake pulleys with the possibility of controlling their dynamic and thermal regimes are protected by invention patents (invention patents of Ukraine and Azerbaijan, some of them were awarded the regional prize named after G. I. Tersenov and the Republic of Azerbaijan).

The obtained results were implemented in the educational process in the teaching of the general engineering discipline "Mechanics of Machines" IFNTUOG and used in the textbook "Course of lectures on lifting and transport machines and test tasks" for students of the following areas of training: oil and gas and mining, agricultural and general mechanical engineering.

Key words: band-shoe brake, friction assembly, friction pair, robust approach with its components, structural-parametric synthesis, brake belt, friction pad, brake pulley, dynamic and thermal load.