

АНОТАЦІЯ

Чуфус В. М. Інтенсифікація охолодження фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок для підвищення їх ефективності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії PhD (кандидата технічних наук) за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2020.

У дисертаційній роботі виконано дослідження, що мають за мету підвищення енергомісткості складених шківів з камерним нанорідинним охолодженням та оптимізацію конструктивних й експлуатаційних параметрів пар тертя стрічково-колодкового гальма бурової лебідки.

У **першому розділі** докладно проаналізовано: особливості конструкцій та роботи стрічково-колодкових гальм бурових лебідок, фрикційні вузли яких представлені у вигляді трибологічних систем; рівень енергонавантаженості та схеми циркуляції теплових струмів в конструктивних елементах гальмових шківів; енергетичний баланс приповерхневого шару накладки і його участь у формуванні режиму роботи металополімерної пари тертя; тепловий баланс фрикційних вузлів гальма; механізми зносу мікровиступів третьових поверхонь і передумови утворення мікротріщин на робочій поверхні ободу шківа.

Досліджено трибологічні процеси, які відбуваються у поверхневих шарах пар тертя стрічково-колодкового гальма бурової лебідки. Розглянуто складений гальмовий шків з камерним повітряно-рідинним охолодженням його ободу.

Дослідженню динамічних і теплових процесів у парах тертя різних видів гальмових пристроїв та фрикційних муфт присвячені праці М. П. Александрова, В. О. Богомолова, О. І. Вольченка, Б. Б. Генбома, А. Б. Гредескула, Г. С. Гудза, В. А. Дем'янюка, А. Х. Джанахмедова, І. В. Крагельського, М. В. Кіндрачука, М. А. Подригала, А. М. Туренка, Я. С. Фаробіна, А. В. Чичинадзе, С. А. Чудакова, F. Charron, H. Dorner, R. Krauser, T. Newcomb, A. Sisson, G. Fazekas, Y. Weib та інших учених. Проте в їхніх працях не приділено уваги теоретичним й експериментальним засадам оцінки енергонавантаженості пар тертя нових

конструкції при їх повітряно-нанорідинному охолодженні, а також підвищенню енергоємності ободу гальмового шківа й умовам запобігання виникнення і розвитку мікротріщин на його робочій поверхні. Не розглянуті також питання оптимізації конструктивних параметрів елементів гальмового шківа бурової лебідки.

Другий розділ присвячено оптимізації конструктивних й експлуатаційних параметрів фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок.

Сформульовано математичну задачу оптимізації конструктивних й експлуатаційних параметрів стрічково-колодкових гальм бурових лебідок з урахуванням критеріїв оптимальності та обмежень, що накладаються на їхні фрикційні вузли. Розглянуто локальні й комплексні критерії оптимальності конструктивних елементів фрикційних вузлів гальма.

Установлено вплив поверхневих температурних градієнтів ободу шківа на формування напруженого стану його поверхневих і приповерхневих шарів. Установлено, що найбільші температурні напруження спостерігаються у місці з'єднання ободу шківа з кріпильним виступом, а також на торцях ободу шківа з ребордами.

Уперше в аналітичну залежність для визначення термічних напружень ободу введено параметр, який характеризує темп його нагрівання. Визначено температурні градієнти по товщині виступу ободу шківа і фланця барабана.

Запропоновано метод багатокритеріального проектування елементів фрикційних вузлів стрічково-колодкових гальм для визначення їх експлуатаційних параметрів з урахуванням функціональних і параметричних обмежень.

У **третьому розділі** наведено теоретичні й експериментальні дослідження примусового повітряно-нанорідинного охолодження складеного ободу гальмового шківа бурової лебідки.

Розроблено конструкцію складеного шківа. Його верхня і нижня частини мають перфорацію у вигляді кільцевих камер, з'єднаних між собою зміщеними отворами. Перфорація зумовлює збільшення площі поверхонь ободу і підвищенню ефективності вільного і вимушеного повітряного охолодження, а

також радіаційного теплообміну. Верхня частина ободу омивається циркулюючим повітрям, а нижня – повітрям і нанорідиною. Внутрішня поверхня ободу полірована.

Установлено, що найвища ефективність охолодження досягається за умови, коли величина відношення коефіцієнтів випромінювання матових (охолоджуваних) поверхонь до полірованої (робочої, нагрівної) дорівнює відношенню площ цих поверхонь. У серійному гальмовому шківі розбіжність між вказаними величинами склала 8,4%, у складеному – 5,2%.

Під внутрішньою полірованою поверхнею складеного ободу шківа розташовано камеру, яка має впускний і випускний клапани. При експериментальних дослідженнях камеру заповнювали на 2/3 об'єму водою або нанорідиною (сумішшю води з наночастинками алюмінію, міді, цинку або інших високотеплопровідних металів).

З урахуванням особливостей конструкції складеного шківа змодельовано його рідинне охолодження в лабораторних стендових умовах. В області пограничного шару встановлено наявність безвідривного обтікання вихровими потоками рідини стінок камери складеного шківа. Інтенсивність обтікання залежить від енергонавантаженості пар тертя гальма. При різкому гальмуванні виникають великі градієнти тиску рідини в напрямку її руху.

Визначено інтенсивність переміщення шарів рідини в камері складеного гальмового шківа в залежності від швидкості його обертання. Установлено, що турбулентне дотичне напруження по перерізу пограничного шару рідини є величиною сталою. Воно дорівнює дотичному напруженню на стінці камери.

Циркуляція рідини в камері шківа характеризується неоднорідністю полів швидкості і температури. Від них залежить інтенсивність дії сил внутрішнього тертя, конвективного переміщення частинок рідини і загальних інерційних сил потоку.

При теплообміні і дифузії виникають тепловий і дифузійний пограничні шари. У них температура і концентрація парорідинної суміші змінюються в напрямку від стінки до зовнішнього потоку. Установлено, що динамічний (I), тепловий (II) і дифузійний (III) пограничні шари простягаються до

нескінченності у радіальному напрямку (нормаллю до робочої поверхні ободу складеного шківа). У динамічній області шару рідини сили в'язкості перевищують деяку довільно задану величину, більшу за сили їх інерції. У тепловій області енергія внаслідок зміни в'язкості й теплопровідності перевищує деяку довільно задану величину, більшу за величину зміни енергії, що відбувається внаслідок вільної та вимушеної конвекції, а також дії сил інерції. У дифузійній області діє градієнт парціального тиску дифундуючої суміші.

Введено нове поняття першої (до 110 °С) і другої (до 150 °С) допустимої густини теплового потоку. При температурах, що перевищують зазначені, в рідині камери виникають бульбашковий і плівковий режими кипіння, які негативно впливають на інтенсивність теплообмінних процесів.

Результати досліджень показали, що:

- із застосуванням запропонованої комбінації теплоносіїв енергонавантаженість ободу шківа знизилася в середньому на 28%. Унаслідок цього зменшилися поверхневі та об'ємні температури, що запобігає появі мікротріщин на робочій поверхні ободу;

- вибір наночастинок з урахуванням їх фізико-хімічних властивостей є правильним і забезпечує максимальний ефект охолодження. Доведено, що коефіцієнт теплопровідності λ матеріалу наночастинок має значно перевищувати λ металу складеного шківа;

- динамічний коефіцієнт тертя збільшився на 16%, гальмовий момент – на 15%;

- енергонавантаженість поверхневих шарів металополімерних пар тертя зменшилася на 25-30%, знос фрикційних накладок знизився на 12-14%.

У **четвертому розділі** розглянуто методи і засоби покращання ефективності фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма бурової лебідки.

Принципи енергетичних процесів, явищ та ефектів у механічних, електричних, теплових, хімічних та електромагнітних полях фрикційної взаємодії пар тертя гальмових пристроїв базуються на градієнтній теорії зміни фізико-хімічних властивостей застосовуваних матеріалів. На основі сучасних уявлень про ієрархічні енергетичні рівні трибоспряжень запропоновано

класифікацію основних показників. До неї входять такі складові: теплові потоки, види теплообміну, потенціали, струми омиваючого середовища, градієнти основних параметрів, темпи проходження процесів.

Важливу роль у виникненні потенціалів відіграють подвійні електричні шари, які формуються на поверхнях пар тертя. У металополімерних парах тертя на границях фаз діють адсорбційні та дифузійні потенціали, які суттєво підсилюють трибоекфект.

Розглянуто крекінг-процес у робочих шарах фрикційних накладок при температурах, що перевищують допустиму. Установлено, що на інтенсивність крекінг-процесу впливають такі фактори: температура, питомі навантаження, коефіцієнт взаємного перекриття, присутність інертних газів, а також хімічні властивості компонентів поверхневого шару полімерної накладки.

Розглянуто режими руху і зміни параметрів нанорідини і пару вздовж твірної камери у напрямку від защемленого до вільного краю ободу. По його перерізах виділено п'ять областей: перша – однофазного конвективного теплообміну нанорідини, тут присутні ділянки теплової та гідродинамічної стабільності; друга – початок кипіння нанорідини; третя – початок інтенсивного пароутворення, внаслідок цього суттєво підвищується тепловіддача; у четвертій області стикаються пристінкові двофазні шари, режим руху суміші бульбашковий; п'ята область – потік складається з перегрітого пару і нанорідини з температурою насичення, відбувається послідовна зміна режимів течії (від бульбашкового до дисперсно-кільцевого).

За допомогою багатокритеріального методу визначено оптимальні конструктивні й експлуатаційні параметри одно- і двопарних вузлів тертя стрічково-колодкового гальма при розміщенні накладок на гальмовій стрічці (перший варіант) і біговій доріжці шківів (другий варіант). У першому випадку використано вісім основних параметрів, у другому – дев'ять.

Для раціонального вибору матеріалів пари тертя запропоновано трибоелектричний метод. Зміст методу полягає в тому, що формують ряди за величинами трибоЕРС, електронними властивостями і теплофізичними характеристиками металів.

Ключові слова: бурова лебідка, стрічково-колодкове гальмо, металополімерна пара тертя, серійний і складений гальмовий шків, система примусового повітряно-нанорідинного охолодження, нанорідина, градієнти параметрів, параметри ефективності й енергоємності.

ABSTRACT

Chufus V. M. The cooling intensification of band-shoes brakes of draw-works friction units to increase their efficiency. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy (PhD) on a specialty 131 - Applied mechanics. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2021.

In the dissertation work the researches which are for the purpose of increase of energy consumption of the assembled pulleys with chamber nanofluid cooling and optimization of constructive and operational parameters of friction pairs of a band-shoes brake of the draw-works are carried out.

In the first section the following is analyzed in detail: features of constructions and work of band-shoes brakes of drilling winches which friction assemblies are presented in the form of tribological systems; the level of energy load and the scheme of circulation of thermal currents in the structural elements of the brake pulleys; energy balance of the near-surface layer of the lining and its participation in the formation of the mode of operation of the metal-polymer friction pair; heat balance of friction brake units; mechanisms of wear of microprojections of friction surfaces and preconditions of formation of microcracks on a working surface of a rim.

The tribological processes that take place in the surface layers of the friction pairs of the band-shoes brake of the draw works are studied. The folded brake pulley with chamber air-liquid cooling of its rim is considered.

The works of M.P. Alexandrov, V.O. Bogomolov, O.I. Volchenko, B.B. Genbom, A.B. Gredeskul, G.S. Gudz, V.A. Demyanyuk, A.H. Dzhanakhmedov, I.V. Kragelsky, M.V. Kindrachuk, M.A. Podrygal, A.M. Turenko, Ya.S. Farobin, A.V. Chichinadze, S.A. Chudakova, F. Charron, H. Dorner, R. Krauser, T. Newcomb, A. Sisson, G. Fazekas, Y. Weib and other scientists. However, their work does not pay attention to theoretical and experimental principles of estimating the energy load of friction pairs of new structures during their air-nanofluid cooling, as well as increasing the energy consumption of the brake pulley

rim and conditions to prevent the occurrence and development of microcracks on its working surface. The issues of optimization of structural parameters of the elements of the brake pulley of the draw works are also not considered.

The second section is devoted to the optimization of design and operational parameters of friction units of band shoes brakes of drilling winches.

The mathematical problem of optimization of constructive and operational parameters of belt and block brakes of drilling winches is formulated taking into account the criteria of optimality and restrictions imposed on their friction units. Local and complex criteria of optimality of constructive elements of friction assemblies of a brake are considered.

The influence of surface temperature gradients of the pulley rim on the formation of the stress state of its surface and near-surface layers is established. It was found that the highest temperature stresses are observed at the junction of the pulley rim with the mounting protrusion, as well as at the ends of the pulley rim with flanges.

For the first time in the analytical dependence to determine the thermal stresses of the rim introduced a parameter that characterizes the rate of its heating. Temperature gradients on the thickness of the protrusion of the rim of the pulley and the flange of the drum are determined.

The method of multicriteria design of elements of friction assemblies of tape and block brakes for definition of their operational parameters taking into account functional and parametric restrictions is offered.

In the third section, theoretical and experimental studies of forced air-nanofluid cooling of the folded rim of the brake pulley of the draw work sare carried out.

The design of the folded pulley is developed. Its upper and lower parts are perforated in the form of annular chambers connected by offset holes. Perforation causes an increase in the surface area of the rim and increase the efficiency of free and forced air cooling, as well as radiation heat transfer. The upper part of the rim is washed with circulating air, and the lower - with air and nanofluid. The inner surface of the rim is polished.

It is established that the highest cooling efficiency is achieved under the condition that the value of the ratio of radiation coefficients of matte (cooled) surfaces to the

polished (working, heating) is equal to the ratio of the areas of these surfaces. In the serial brake pulley, the discrepancy between these values was 8.4%, in the folded - 5.2%.

Under the inner polished surface of the folded rim of the pulley is a chamber having inlet and outlet valves. In experimental studies, the chamber was filled to $2/3$ volume with water or nanoliquid (a mixture of water with nanoparticles of aluminum, copper, zinc or other highly heat-conducting metals).

Taking into account the design features of the folded pulley, its liquid cooling in laboratory bench conditions is modeled. In the area of the boundary layer, the presence of a continuous flow of eddy currents of the fluid of the walls of the chamber of the folded pulley. The intensity of the flow depends on the energy load of the friction pairs of the brake. At sharp braking there are big gradients of pressure of a liquid in the direction of its movement.

The intensity of mixing of the fluid layers in the chamber of the folded brake pulley depending on the speed of its rotation is determined. It is established that the turbulent tangential stress across the boundary layer of the fluid is a constant value. It is equal to the tangential voltage on the wall of the chamber.

The circulation of fluid in the pulley chamber is characterized by the heterogeneity of the velocity and temperature fields. The intensity of the action of internal friction forces, convective movement of fluid particles and the total inertial forces of the flow depends on them.

During heat exchange and diffusion there are thermal and diffusion boundary layers. In them, the temperature and concentration of the vapor-liquid mixture vary in the direction from the wall to the external flow. It is established that the dynamic (I), thermal (II) and diffusion (III) boundary layers extend to infinity in the radial direction (normally to the working surface of the rim of the folded pulley). In the dynamic region of the fluid layer, the viscosity forces exceed some arbitrarily set value greater than their inertia forces. In the thermal region, the energy due to the change in viscosity and thermal conductivity exceeds some arbitrarily set value, greater than the magnitude of the change in energy that occurs due to free and forced convection, as well as the action

of inertia. In the diffusion region there is a partial pressure gradient of the diffusing mixture.

A new concept of the first (up to 110° C) and second (up to 150° C) allowable heat flux density is introduced. At temperatures exceeding these, in the liquid of the chamber there are bubble and film boiling regimes, which adversely affect the intensity of heat transfer processes.

The research results showed that:

- using the proposed combination of coolants, the energy load of the pulley rim decreased by an average of 28%. As a result, surface and volume temperatures are reduced, which prevents the appearance of microcracks on the working surface of the rim;

- the choice of nanoparticles taking into account their physicochemical properties is correct and provides the maximum cooling effect. It is proved that the thermal conductivity coefficient λ of nanoparticle material must significantly exceed λ of the metal of the composite pulley;

- dynamic coefficient of friction increased by 16%, braking torque - by 15%;

- energy load of the surface layers of metal-polymer friction pairs decreased by 25-30%, wear of friction linings decreased by 12-14%.

The fourth section discusses the methods and means of improving the efficiency of the friction units of the band shoes brake of the drilling winch.

The principles of energy processes, phenomena and effects in mechanical, electric, thermal, chemical and electromagnetic fields of frictional interaction of friction pairs of brake devices are based on the gradient theory of change of physicochemical properties of applied materials. On the basis of modern ideas about hierarchical energy levels of tribocouples the classification of the basic indicators is offered. It includes the following components: heat fluxes, types of heat exchange, potentials, currents of the washing medium, gradients of basic parameters, rates of processes.

An important role in the emergence of potentials is played by double electric layers, which are formed on the surfaces of friction pairs. In metal-polymer friction pairs, adsorption and diffusion potentials act at the phase boundaries, which significantly enhance the triboeffect.

The cracking process in the working layers of friction linings at temperatures exceeding the allowable is considered. It is established that the intensity of the cracking process is influenced by the following factors: temperature, specific loads, mutual overlap coefficient, presence of inert gases, as well as chemical properties of the components of the surface layer of the polymer lining.

The modes of motion and changes of nanofluid and vapor parameters along the generating chamber in the direction from the clamped to the free edge of the rim are considered. There are five areas along its sections: the first is single-phase convective heat exchange of nanofluids, there are areas of thermal and hydrodynamic stability; the second - the beginning of boiling of the nanofluid; the third - the beginning of intensive vaporization, as a result of which heat transfer essentially increases; in the fourth area the wall two-phase layers meet, the mode of movement of mix is bubble; fifth region - the flow consists of superheated steam and nanofluid with saturation temperature, there is a sequential change of flow regimes (from bubble to disperse-ring).

Using the multicriteria method, the optimal design and operational parameters of single- and double-pair friction units of the band shoes brake when placing the pads on the brake belt (first option) and the treadmill of the pulley (second option) were determined. In the first case, eight basic parameters are used, in the second - nine.

A triboelectric method is proposed for the rational choice of friction pair materials. The content of the method is that they form series in terms of triboEMC values, electronic properties and thermophysical characteristics of metals.

Keywords: draw works, band-shoes brake, metal-polymer friction pair, serial and folded brake pulley, system of forced air-nanofluid cooling, nanofluid, gradients of parameters, parameters of efficiency and energy consumption.