

УДК 621.891

М. В. КАШУБА

Надвірнянський коледж Національного транспортного університету, Україна

РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОГО ГАЛЬМА ЛЕБІДКИ ДЛЯ СПУСКО-ПІДЙОМНОГО КОМПЛЕКСУ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ (частина перша)

Проілюстровано розроблену конструкцію комбінованого гальма бурової лебідки та наведено теоретичні дослідження енергонавантаженості обода гальмівного шківів та зміну експлуатаційних параметрів пар тертя стрічково-колодкового гальма.

Ключові слова: комбіноване гальмо, стрічково-колодке гальмо, індукційне гальмо, пари тертя, експлуатаційні параметри.

Вступ. Фрикційні вузли стрічково-колодкового гальма бурової лебідки працюють при надзвичайно високих поверхневих температурах (600...900 °С). Вони значно перевищують допустиму температуру для матеріалу фрикційних накладок. Це призводить до дестабілізації експлуатаційних параметрів фрикційних вузлів і, як наслідок, до катастрофічного зниження їхньої ефективності й навіть до аварійної відмови гальма. Тому проблема зниження енергонавантаженості фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма є надзвичайно актуальною.

Одним із шляхів підвищення ефективності з одночасним зменшенням навантаженості пар тертя різних видів гальмівних пристроїв підйомно-транспортних машин є використання в них комбінованих фрикційних вузлів. В якості основного елемента тертя в таких вузлах виступає фрикційна накладка або обід гальмівного шківів. У такому вузлі фрикційна накладка своєю неробочою поверхнею взаємодіє з внутрішньою поверхнею гальмівної стрічки, а робочою поверхнею – з біговою доріжкою шківів. Неробоча поверхня останнього контактує з електромагнітом. При цьому конструктивні параметри запропонованих фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма бурової лебідки залишаються незмінними, це дозволяє без додаткових витрат використовувати допоміжне індукційне гальмо замість гідродинамічного гальма.

Постановка задачі. Для вирішення поставленої задачі необхідно розглянути такі питання:

- конструкцію та особливості роботи допоміжної електромагнітної системи стрічково-колодкового гальма;
- нагрівання при повторно-короткотермінованому режимі роботи вузлів комбінованого гальма;
- розповсюдження теплових хвиль з поверхонь обода шківів в його товщину при роботі комбінованого гальма;
- закономірності зміни експлуатаційних параметрів пар тертя стрічково-колодкового гальма.

Мета роботи: обґрунтувати розробку комбінованого гальма для бурової лебідки.

Конструкція та особливості роботи допоміжної електромагнітної системи стрічково-колодкового гальма. Перед тим як перейти до розгляду теплових процесів, які супроводжують роботу комбінованого гальма, зупинимося на його особливостях.

На рис. 1 *а* показаний загальний вигляд комбінованого (стрічково-колодкового і індукційного) гальма; на рис. 1 *б* проілюстровані криві магнітного поля в зазорі нерухомого індукційного гальма і при цьому використані такі позначення: $\Phi_{\max}$ і $\Phi_{\min}$ – магнітні потоки полюсного тиску над зубцем і над западиною між зубцями; B_{δ} – індукція над зубцем; B – амплітуда першої гармоніки (рис. 1 *в* повернено на 180°).

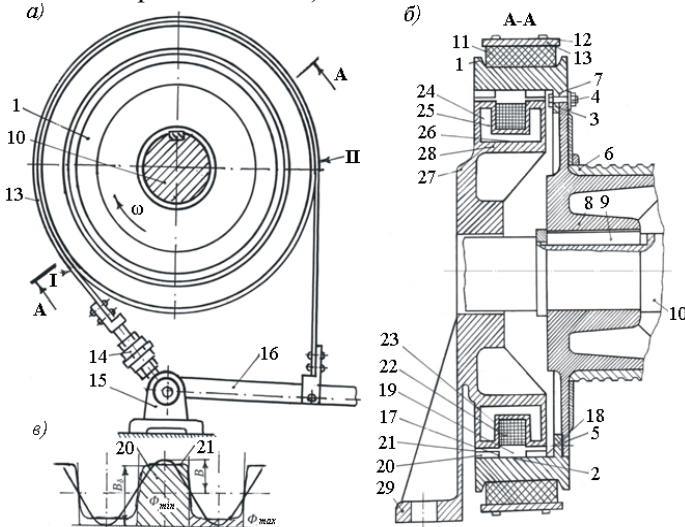


Рис. 1 Комбіноване (стрічково-колодкове та індукційне) гальмо: *а* – загальний вигляд комбінованого гальма; *б* – поперечний розріз по А – А гальма; *в* – криві магнітного поля в зазорі нерухомого індукційного гальма; 1, 2, 3 – гальмівний шків з внутрішньою поверхнею та виступом; 4 – болтове з'єднання; 5 – магнітоізоляційна прокладка; 6, 7, 8 – барабан з фланцем та маточиною; 9 – призматична шпонка; 10 – підйомний вал лебідки; 11, 12 – фрикційні накладки з кріпильними вусиками; 13 – гальмівна стрічка з набігаючою (*а*) та збігаючою (*б*) гілками; 14 – регулююча стяжка стрічки; 15 – опора; 16 – важіль керування; 17, 18, 19, 20 – прямокутні зубці з зазором між лівим та правим рядом; 21 – торець зубців; 22 – обмотки збудження; 23 – сорочка охолодження; 24 – теплоносій; 25, 26 – зони випаровування та конденсації теплової труби; 27, 28, 29 – спеціальний фланець з циліндричним кільцевим виступом та лапою

Комбіноване стрічково-колодкове і індукційне гальмо має гальмівний шків 1 з робочою і внутрішньою 2 поверхнями. Шків 1 виконано з матеріалу, який має магнітну провідність, наприклад, з відпаленої сталі 20Л та має виступ 3, яким він за допомогою болтового з'єднання 4 через магнітоізоляційну прокладку 5 кріпиться до барабану 6, зокрема до його фланця 7. Останній переходить в маточину 8, яка за допомогою призматичної шпонки 9 закріплена на підйомному валу 10 лебідки.

Фрикційні накладки 11, за допомогою вусиків 12, через поздовжні вирізи (на кресленні не показані) в гальмівній стрічці 13 прикріплені до неї з її внутрішнього боку. Гальмівна стрічка 13 одним кінцем (з боку набігаючої гілки *а*) прикріплена через регульовану стяжку 14 до опори 15, а іншим (з боку збігаючої гілки *б*) прикріплена до важеля керування 16 гальмом.

Конструктивні особливості індукційного гальма з системою охолодження наступні. На внутрішній поверхні 2 гальмівного шківів 1 по краях його периметра розташовані прямокутні зубці 18 з зазором 19 між лівим та правим рядом. Гальмівний шків 1 з рядами зубців 18 виконує функції ротора. Між

ззором 19 і нижче за торці 21 зубців 18 розташовано квадратне вікно котушки збудження 22, вісь якої перпендикулярна до осі обертання ротора. Котушка збудження 22 в індукційному гальмі виконує функції статора. Таким чином, над статором знаходяться дві однакові симетрично розташовані відносно котушки збудження 22 частини. Якщо по котушці збудження 22 проходить струм, то всі зубці 17 ротора, розташовані в лівому ряду мають полярність N , а зубці правого ряду – полярність S .

Сама котушка збудження 22 знаходиться в сорочці охолодження П-подібного перерізу. Система охолодження заповнена теплоносієм на $5/6$ її об'єму, наприклад, 25 %-ним розчином аміаку, який має високу приховану теплоту пароутворення. Порожнина сорочки охолодження 23 вакуумується, а потім герметизується, що дозволяє використовувати ефект «теплової труби» для охолодження котушки збудження 22, яка своїми трьома сторонами квадрата охоплена Т-подібною стінкою сорочки охолодження 23. Протилежні сторони стінок сорочки охолодження 23 спільно з теплоносієм 24 утворюють зону випаровування 25 теплової труби. До зони конденсації 26 теплової труби відноситься решта внутрішніх поверхонь сорочки охолодження 23 спільно з теплоносієм 24. Спеціальний фланець 27 з циліндричним кільцевим виступом 28, який є основою сорочки охолодження 23, спирається на установочну лапу 29.

Комбіноване стрічково-колодкове і індукційне гальмо працює на трьох гальмівних режимах. На першому гальмівному режимі працює стрічково колодкове гальмо. На другому гальмівному режимі працює індукційне гальмо.

При обертанні ротора здійснюється підключення котушки збудження 22 до джерела постійного струму (на рис. 1 б не показаний) відбувається періодична зміна величини індукції на поверхні статора, поверненій до зубців 17 ротора, що і викликає пригальмовування гальмівного шківів 1. При цьому магнітний потік в повітряному зазорі між ротором і статором змінюється тільки по величині, а не по напрямку. Крім того, на поверхні ротора із зубцями 17 і прилеглих до них шарах статора з'являються вихрові струми. Останні в статорі обумовлюються змінною складовою магнітної індукції B . Для збільшення останньої необхідно, щоб різниця магнітних потоків повітряних зазорів над торцем 21 головки зубця і між западинами зубців 17 була найбільшою $\Phi_{\max} - \Phi_{\min}$ (рис. 1 в). Розподіл зазначених потоків залежить від співвідношення конструктивних параметрів: кроку між зубцями 17 та повітряного зазору над торцем 21 головки зубця; ширини і висоти зубця до кроку між зубцями 17, а також від магнітного насичення зубців 17.

При тривалому подаванні електричного струму в мідний дріт, з якого звита котушка збудження 22, він нагрівається і при цьому виникає температурний перепад між центральними і зовнішніми витками котушки 22, що може призвести до виходу з ладу лакової (електричної) ізоляції (максимальна робоча температура якої 180°C), а потім залитого бітуму в котушку 22, який розм'якшується при $95-100^{\circ}\text{C}$ (рідкий стан настає при 150°C).

На даному гальмівному режимі тепла енергія від котушки збудження 22 за допомогою ефекту теплопровідності передається П-подібним стінкам сорочки охолодження 23 і від них йде на нагрівання теплоносія 24, який змочує $5/6$ її об'єму. При цьому зони випаровування 25 і конденсації 26 працюють в режимі «теплової труби» за рахунок перепаду температур між різним термодинамічним станом теплоносія 24 в об'ємі теплової труби. Інтенсивність охолодження зони

конденсації 26 теплової труби залежатиме від кількості повітря, яке омиває зовнішню поверхню сорочки охолодження 23 котушки збудження 22 індукційного гальма.

Регулювання гальмівного моменту індукційного гальма здійснюється за допомогою зміни струму збудження в котушці 22. Мала потужність збудження індукційних гальм дозволяє здійснювати автоматичне регулювання моменту за допомогою керованих напівпровідникових або магнітних підсилювачів, що забезпечує простоту і ефективність автоматизації при малих економічних витратах. Такими засобами здійснюється автоматичне підтримування сталої величини моменту або зміна його за заздалегідь заданою програмою залежно від навантаженості пар тертя гальма. В той же час вирішується і зворотна задача, наприклад, автоматично регулюється швидкість обертання підйомного валу 10 шляхом відповідної зміни моменту індукційного гальма.

На третьому гальмівному режимі працюють одночасно стрічково-колодкове і індукційне гальмо. Даний режим залежить від того, який гальмівний момент необхідно реалізувати для зупинки барабану лебідки.

На всіх трьох режимах гальмування комбінованого гальма стійка робота стрічково-колодкового гальма досягається тільки в тому випадку, якщо на робочій поверхні фрикційних накладок не досягатиметься допустима температура для їх матеріалів. Остання здатна викликати дестабілізацію зносо-фрикційних властивостей стрічково-колодкового гальма. Тому роль індукційного гальма очевидна.

Таким чином, в комбінованому гальмі досягається збільшення гальмівного моменту і його автоматичне регулювання за рахунок застосування індукційного гальма. Ця обставина дозволяє розвантажити стрічково-колодкове гальмо і тим самим забезпечити стійку роботу його фрикційних вузлів на заданих режимах, наприклад, спуск колони бурильних труб в свердловину.

Нагрівання при повторно-терміновому режимі роботи вузлів комбінованого гальма. Прямими парами тертя стрічково-колодкового гальма є зовнішня поверхня гальмівного шківів і робочі поверхні фрикційних накладок, які прикріплені на дузі охоплення гальмівної стрічки.

Зупинимося на процесі теплоутворення, яке відбувається при взаємодії пар тертя стрічково-колодкового гальма під час гальмування. У результаті обмеження поверхонь тертя та значної кількості теплоти, яка генерується при гальмуванні, в кінці його завершення температури робочої поверхні накладок та шківів підвищуються до значення t_1 (рис. 2 *a*, точка *a*). Потім настає період природного охолодження τ_2 і τ_3 , причому після зупинки гальма поверхні тертя залишаються зчепленими, тому процес охолодження у період часу τ_2 здійснюється за спільною закономірністю для накладок і шківів (крива *a – б*).

При вмиканні бурової лебідки (точка *б*) поверхні тертя гальма розщеплюються, шків з барабаном починає обертатися, і процеси вимушеного охолодження накладок (крива *б-в*) та шківів (крива *б – з*) у період τ_3 відбуваються за різними закономірностями. Період τ_3 відповідає часу роботи гальма з увімкненим приводом. Процеси гальмування повторюються, стрічка з накладками замикає гальмівний шків, і знову починається нагрівання поверхонь взаємодії пар тертя гальма до температури t_4 (точка *д*). Різниця температур в інтервалі 50 – 150 °C в кінці процесів природного та вимушеного охолодження у зв'язку з малим зазором між робочими поверхнями пар тертя гальма, а також

через відносно невеликий період гальмування та паузи до чергового гальмування є невеликою. Тому можна

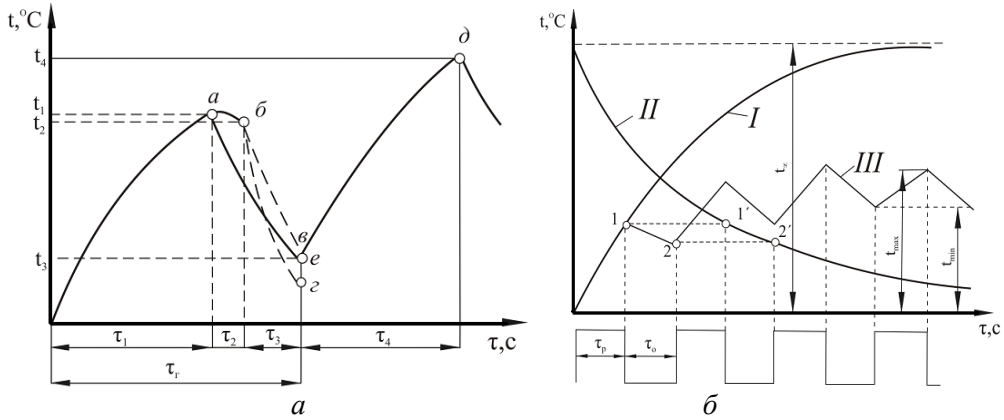


Рис. 2 Закономірності зміни поверхневих температур при повторно-короткотерміновому режимі роботи: а – пар тертя стрічково-колодкового гальма; б – якоря індукційного гальма

прийняти загальну закономірність охолодження, яка описується кривою а – е. У наступний період гальмування різниця температур в точках в і г зменшується, і в кінці гальмування температури поверхонь тертя, що взаємодіють, будуть однаковими і рівними t_4 . Згідно з роботою [2] робочі поверхні шківів, який обертається, та фрикційних накладок у будь-який момент часу мають однакову температуру. Рівність температури забезпечується рівномірним розподілом термічним опором на макровиступах контактуючих поверхонь. Це не сприяє акумулюванню теплоти в парах тертя гальма. Різна теплопровідність матеріалу шківів та фрикційної накладки спричиняє різницю не поверхневих температур, а теплових потоків: більша частка теплоти поглинається шківом, менша витрачається на нагрівання приповерхневого шару фрикційної накладки.

При повторно-короткотерміновому режимі гальмування періоди природного та вимушеного охолодження є незначними, і пари тертя гальма не встигають охолотитися до температури, значення якої до моменту чергового гальмування є вищим за температуру початку попереднього періоду. Після низки послідовних гальмувань температура поверхні тертя досягає максимальної величини усталеної температури $t_{уст}$ для даного режиму роботи гальма, при якій подальше зростання температури призупиняється, оскільки кількість теплоти, яка відводиться у навколишнє середовище, дорівнює кількості генерованої теплоти поверхнями тертя. Проте роботу стрічково-колодкового гальма бурової лебідки не припиняють, і температура його поверхні тертя може досягти і навіть перевищити допустиме значення для матеріалів фрикційної накладки. При спуску колони бурових труб у свердловину на глибину 4000 – 5000 м має місце напружений режим роботи пар тертя стрічково-колодкових гальм бурової лебідки з високими значеннями поверхневих і об'ємних температур, що значно перевищують допустимі величини. Тоді змушені використовувати допоміжне гальмо, яким у даному випадку є індукційне.

Уявимо, що індукційне гальмо починає роботу в режимі повторно-короткотермінового навантаження з холодного стану. Нехай час робочого періоду дорівнює τ_p , а час пауз τ_o .

Нагрівання якоря (неробочої поверхні ободу гальмівного шківів) відбувається

по ділянці 0 – 1 кривої нагрівання I (рис. 2 б), яку можна зобразити, якщо відома стала часу нагрівання t_0 та усталене перевищення температури t_∞ при роботі в тривалому режимі із заданою потужністю.

Потім настає пауза, протягом якої якір природно охолоджується. Це відбувається по ділянці 1' – 2' кривої II (див. рис. 2 б). Вказана крива може бути зображена, якщо відомі t_∞ та стала часу охолодження t_0 . Якщо умова природного охолодження під час паузи така, як і під час робочого періоду, то $t_{охл} = t_0$. Природне охолодження після першого періоду роботи відбувається на тій ділянці кривої II , початок якої відповідає значенню t , досягнутого в кінці цього періоду роботи. Спроектвавши еквідістантно ділянку 1'-2' кривої II у положення 1 – 2, отримуємо криву з ділянкою 0 – 1 – 2 зміни t за час першого циклу роботи.

Під час другого періоду роботи нагрівання відбувається за законом тієї ж ділянки кривої I , початок якої відповідає значенню t , досягнутому в кінці першої паузи роботи.

Подібним чином побудовано зубчастоподібну криву III нагрівання якоря індукційного гальма при повторно-терміновому режимі роботи. Вона складається з ділянок кривих I та II , зміщених еквідістантно на відповідні інтервали часу роботи τ_p та пауз τ_0 , вказаних у нижній частині рис. 2 б.

Після деякого часу температурний режим повторно-короткотермінової роботи встановлюється і залишається практично сталим, підйом кривої III припиняється. Перевищення температури якоря індукційного гальма при цьому коливається в інтервалі від t_{max} до t_{min} (див. рис. 2 б). Значення t_{max} не повинно перевищувати значення $t_{дон}$ для даного фрикційного матеріалу накладок стрічково-колодкового гальма бурової лебідки.

Розповсюдження теплових хвиль з поверхонь обода шківів в його товщину при роботі комбінованого гальма. Питомі втрати теплоти в ободі гальмівного шківів змінюються в часі за законом простого гармонійного коливання з тим же періодом, що і період коливання температури, але із зсувом по фазі.

В роботі [3] встановлено, що кількість теплоти (ΔQ), яка витрачається протягом періоду $(\tau_2 - \tau_1)$ коливання $\left((\tau_2 - \tau_1) = \Delta\tau = \frac{1}{\nu} \right)$, дорівнює нулю.

Розглянемо витрати теплоти за проміжок часу $\Delta\tau$, рівний напівперіоду

$$\Delta\tau = (\tau_2 - \tau_1) = \frac{1}{2\nu}. \quad (1)$$

Для цього проміжку часу $\sin \pi\nu(\tau_2 - \tau_1) = 1$. Початок розрахунку τ_1 вибирається так, щоб величина $[\bar{M} - \pi\nu(\tau_2 + \tau_1)]$ була рівна одиниці, тобто

$$\tau_1 = \frac{1}{2\pi\nu} \cdot (\bar{M} - \pi), \quad (2)$$

де $\bar{M} = \text{arctg}(i) \frac{\bar{N}_i - \bar{N}_{i-1}}{\bar{N}_i + \bar{N}_{i+1}}$.

Тоді витрати теплоти за напівперіод $\Delta\tau = 1/2\nu$ дорівнює

$$\Delta Q = 2c\gamma T_m \cdot (\bar{N}_i \cdot \bar{N}_{i+1})^{1/2}, \quad (3)$$

де $(\bar{N}_i \cdot \bar{N}_{i+1})^{1/2} = f(Pd, Bi)$; $Pd = \frac{m(d_6 - d_3)^2}{a}$; $Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \delta$ – критерії

Предводітелева та Біо; m – темп нагрівання товщини обода шків; d_6, d_3 – діаметри внутрішньої та зовнішньої поверхні обода шків; $\frac{\delta}{\lambda}$ – термічний опір

стінки обода шків; α – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні обода шків; c, γ – теплоємність та густина матеріалу обода шків; a, λ – коефіцієнти: температуропровідності та теплопровідності матеріалу обода шків.

Аналіз залежності (3) показує, що для випадку необмеженої товщини стінки критерій $Bi \rightarrow \infty$. У цьому випадку температура зовнішньої поверхні обода шків змінюється за законом гармонійного коливання:

$$T_{II}(\tau) - T_O = T_m \cos \omega \tau, \quad (4)$$

де T_O – температура оточуючого середовища.

Якщо стінка обода шків має велику товщину або зміна температури відбувається дуже швидко, то коливання температури, які розповсюджуються в глибину товщини стінки від внутрішньої та зовнішньої поверхні обода шків, повинні повністю згасатися, не дійшовши до її середини (рис. 3 а). Таким чином, стінка обода шків значної товщини представляє собою один із граничних випадків.

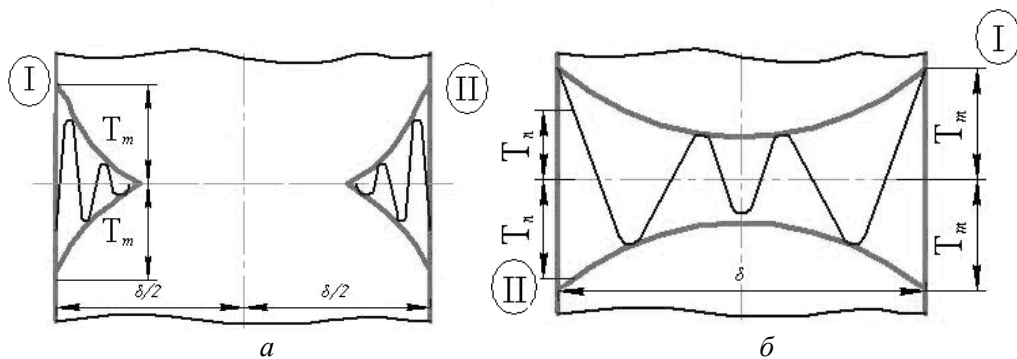


Рис. 3. Проникнення теплових хвиль зі сторони внутрішньої (I) та зовнішньої (II) поверхонь обода шків при його різних товщинах: а – значній; б – середній

Згідно з рис. 3 б коливання температури, які розповсюджуються в глибину товщини стінки з обох її поверхонь не затухають і доходять до середини обода.

Між розглянутими граничними випадками – товстої та тонкої стінок обода шків – знаходяться всі раціональні його конструктивні параметри.

Поступове зменшення товщини стінки обода шків може призвести до такого випадку, коли коливання температури, які розповсюджуються з внутрішньої та зовнішньої поверхонь обода шків зустрінуться всередині стінки обода та почнуть проникати одна в одну. Особливо це небезпечно зі сторони внутрішньої поверхні (I) обода шків (рис. 3 б) (нагрівання від пар тертя стрічково-коловкового гальма), оскільки температурні хвилі будуть чинити опір температурним хвилям зовнішньої поверхні (II) обода шків.

Закономірності зміни експлуатаційних параметрів пар тертя стрічково-коловкового гальма. Згідно методу електродинамічного встановлення

закономірностей зміни експлуатаційних параметрів металополімерних пар тертя стрічково-колодкового гальма бурової лебідки [4] видно, що при контактній імпульсній взаємодії робочих поверхонь гальмівних шківів та фрикційних накладок на їхніх плямах контакту генеруються електричні струми. Останні підкорюються синусоїдальному закону зміни плоскої електромагнітної хвилі при тліючому та іскровому розрядах. Закономірності зміни експлуатаційних параметрів пар тертя в часі відбуваються з різними амплітудами, які описуються для імпульсних питомих навантажень періодом π ; динамічного коефіцієнта тертя періодом 2π ; зміни поверхневих напружень в матеріалі ободу шківів, викликаних температурами спалаху та температурними градієнтами, з періодом π ; при нагріванні та вимушеному охолодженні поверхневих температур періодом $\pi/2$, а також солітонів-імпульсів, виникаючих в міжконтактному зазорі пар тертя, з різною довжиною хвилі періодом $\pi/2$, зносу робочих поверхонь спряжених пар тертя періодом π . Закономірності зміни експлуатаційних параметрів пар тертя стрічково-колодкових гальм бурових лебідок описуються з різними амплітудами з періодом $\pi/2$ до 2π на основі електродинамічної теорії тертя та зносу. При цьому при діелектричних вимірах необхідно враховувати струмовий відзив поверхневого шару полімерної накладки на прикладену синусоїдальну напругу. Як правило, електричний струм відстає по фазі від напруги через наявність в матеріалах поверхневих та підповерхневих шарах накладки сталих диполів, які не встигають миттєво слідувати за зміною напруги. Чим повільніше реагують диполі, тим більше спостерігається зміщення фаз. При цьому величина електричного струму залежить від числа та “сили” диполів.

Висновки. Таким чином, результати теоретичних досліджень запропонованого комбінованого гальма для бурової лебідки дозволяють перейти до його експериментальних досліджень.

Список літератури

1. Пат. 2414633 Российская Федерация, МПК F16D 49/08, F16D 65/813. Комбинированный ленточно-колодочный и индукторный тормоз / Вольченко А. И., Вольченко Н. А., Вольченко Д. А., Бачук И.В., Кашуба Н. В.: заявитель и патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – № 2009101328/11; опубл. 20.03.11. Бюл. №8.
2. Тормозные устройства: Справочник / [М.П. Александров, А.Г. Лысяков, В.Н. Федосеев, П.В. Новожилов]. – М.: Машиностроение, 1986. – 311 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: Высшая школа, 1987. – 600 с.
4. Пат. 2502900 С2 РФ F16D 49/08. Способ электродинамического установления закономерностей изменения эксплуатационных параметров металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровой лебедки. Вольченко А.И., Вольченко Н.А., Вольченко Д.А., Поляков П.А., Возный А.В.; заявитель и патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – № 2012105664/11; заявл. 20.02.2012; опубл. 27.12.2013, Бюл. №36.-12 с.

M. V. KASHUBA

DEVELOPMENT OF COMBINED BRAKE FOR LOWERING AND LIFTING COMPLEX OF DRILLING RIG

We've illustrated the combined brake. In theory grounded necessity and possibility of the use of induction brake combined with the band brake of boring winch. It is set for the combined brake in laboratory terms and his capacity is appraised after conformities to law of change: averages of dynamic coefficient of friction and coefficients of stability of brake moment; coefficients of oscillation of brake moment, efficiency and erected efficiency of braking.

Keywords: combined brake; band brake; induction brake; friction pair; operating parameters.

Кашуба Микола Васильович – викладач природничо-наукових дисциплін, Надвірнянський коледж Національного транспортного університету, вул. Соборна, 177, м. Надвірна, Івано-Франківська область, E-mail: nickolask14@gmail.com.