

ВИЗНАЧЕННЯ НАТЯГУВАННЯ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

DETERMINATION OF THE TENSION OF THE CONVEYOR BELT OF THE BELT CONVEYOR

Мета. Встановлення закономірності розподілу натягування конвеєрної стрічки стрічкового конвеєра, пошук рівняння тертя гнучких тіл та умови передачі гнучкому тілу заданого тягового зусилля з врахуванням відцентрових сил гнучкого тіла.

Методика. Експериментальні дослідження на випробувальному стенді стрічкового конвеєра та теоретичне розв'язання класичної задачі Ейлера 1775 р. про ковзання гнучкого тіла по нерухомому блоку з врахуванням відцентрових сил гнучкого тіла. Дослідження на стенді полягають у врівноваженні моментів тяги й тертя конвеєрної стрічки на блоках стрічкового конвеєра та визначенні натягування конвеєрної стрічки. Розв'язання задачі Ейлера проводять з використанням нових наукових знань про тертя тіл та збереження механічної енергії.

Результати. На основі експериментальних та теоретичних досліджень: - встановлено розподіл натягування конвеєрної стрічки стрічкового конвеєра та розроблена теоретична модель в характерних точках стрічкового конвеєра з врахуванням відцентрових сил гнучкого тіла; - виведене нове рівняння тертя гнучких тіл та умова передачі гнучкому тілу заданого тягового зусилля з врахуванням відцентрових сил гнучкого тіла.

Наукова новизна. Вперше встановлена закономірність розподілу натягування конвеєрної стрічки стрічкового конвеєра з врахуванням його відцентрових сил, яка відповідає умовам рівноваги механічної системи. Вперше отримане нове рівняння тертя гнучких тіл з врахуванням відцентрових сил гнучкого тіла, яке відповідає загальноновизнаним уявленням про тертя тіл та законам класичної механіки: умовам рівноваги механічної системи; закону збереження механічної енергії в замкнутій механічній системі; закону Гука й закону тертя тіл Кулона.

Практична значимість. Розроблена теоретична модель розподілу натягування конвеєрної стрічки в характерних точках стрічкового конвеєра. Отримана умова передачі конвеєрній стрічці заданого тягового зусилля. Використання результатів наукових досліджень в розрахунках параметрів конвеєрних транспортних ліній призводить до визначення оптимальних параметрів та сприяє підвищенню ефективності роботи гірничих підприємств.

Ключові слова: *стрічковий конвеєр, конвеєрна стрічка, гнучке тіло, блок, тертя, натягування, відцентрові сили, механіка, закон, рівняння тертя гнучких тіл.*

Вступ. Для транспортування вантажів в народному господарстві зараз широко використовуються конвеєрні транспортні лінії.

Однак, параметри її експлуатації не надійні і не підтверджуються практикою.

Недоліки методів розрахунку параметрів конвеєрної транспортної лінії викликані помилковим визначенням його основного елемента – натягування конвеєрної стрічки, яке зумовлене не дотриманням умов рівноваги механічної системи та використанням рівняння тертя гнучких тіл Ейлера 1775 р., яке не відповідає дійсності [1-4].

В практиці розрахунків вкоренилося спрощене уявлення про розподіл натягування конвеєрної стрічки стрічкового конвеєра. Воно прогнозується, як у випадку поступального пересування розімкнутого ланцюга елементів вантажу, що є помилкою [5 - 7].

Відомо, що при транспортуванні вантажів замкнута натягнута на блоки станцій стрічкового конвеєра конвеєрна стрічка пересувається по кільцевій траєкторії й знаходиться в складному напружено-деформованому стані. На конвеєрну стрічку діє перш за все зусилля попереднього натягування й тяговий момент двигуна стрічкового конвеєра. Розподіл натягування конвеєрної стрічки підпорядковується умовам рівноваги сил і моментів механічної системи, що не реалізується методами розрахунку [2 - 4].

Також проблему з уточнення рівняння тертя гнучких тіл Ейлера намагалися розв'язати видатні вчені у світі протягом століть, у тому числі наші земляки (співробітники НТУ «Дніпровська політехніка», ДНУ та Інституту геотехнічної механіки НАН України). Однак, досягти своєї мети їм не вдалося [2 - 4, 8].

Разом з тим, з 2007 року на каф. ТСТ запропоноване нове виведення рівняння тертя гнучких тіл. Воно враховує розвиток уявлень про тертя тіл (відкриття закону тертя тіл Кулона у 1779 р.) та збереження механічної енергії (сучасну редакцію закону збереження механічної енергії в замкнутій механічній системі 40-их років 19 століття), що спостерігалось після геніального виведення Ейлера [1 - 4].

Нове рівняння тертя гнучких тіл опосередковано містить силу тертя й нормальну реакцію між тілами, які лінійно пов'язані між собою, що вперше співпадає з законом тертя тіл Кулона, відповідає законам класичної механіки й загальноновизнаним уявленням про тертя тіл, які склалися впродовж століть [2 - 4].

Однак, нові наукові здобутки в питаннях розподілу натягування конвеєрної стрічки й тертя гнучких тіл не враховують швидкості руху гнучкого тіла, від чого, зокрема, на блоках виникають відцентрові сили [1,3,4].

Зазначені недоліки розрахунку стрічкового конвеєра можуть бути подолані шляхом використання закономірності розподілу натягування конвеєрної стрічки й правильного рівняння тертя гнучких тіл з врахуванням швидкості руху гнучкого тіла.

Мета статті – встановлення закономірності розподілу натягування конвеєрної стрічки і пошук рівняння тертя гнучких тіл з врахуванням швидкості руху гнучкого тіла для використання в методі розрахунку конвеєрної транспортної лінії.

Результати досліджень. Для досягнення поставленої мети використано комплексний метод, що включає дослідження з встановлення закономірності розподілу натягування конвеєрної стрічки та пошуку правильного рівняння тертя гнучких тіл з врахуванням його швидкості руху.

При визначенні дійсного розподілу натягування конвеєрної стрічки стрічкового конвеєра були проведені експериментальні дослідження на випробувальному стенді – короткому стрічковому конвеєрі.

Розглянемо розрахункову схему горизонтального стрічкового конвеєра, який враховує відцентрові сили конвеєрної стрічки, рис. 1:

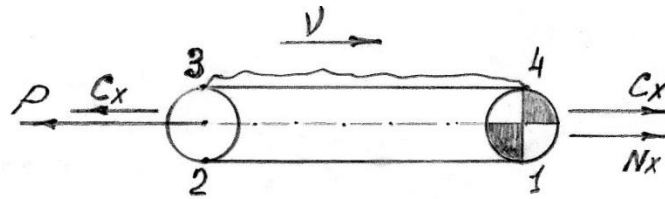


Рис. 1. Розрахункова схема горизонтального стрічкового конвеєра: P – зусилля натягування конвеєрної стрічки на блоці натяжної станції; N_x – реакція між конвеєрною стрічкою і блоком в напрямку транспортування; C_x – складова відцентрової сили; v – швидкість руху конвеєрної стрічки; 1, 2, 3, 4 – характерні точки конвеєрної стрічки

На рис. 2. приведена розрахункова схема випробувального стенду стрічкового конвеєра:

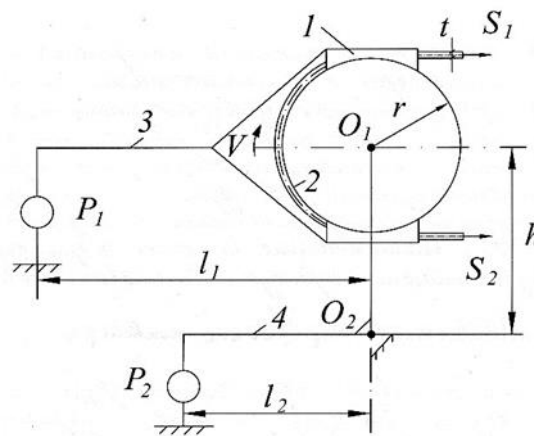


Рис. 2. Розрахункова схема випробувального стенду стрічкового конвеєра: 1 – стрічкове гальмо; 2 – блок натяжної станції; 3, 4 – важелі; S_2 , S_1 – сили натягування конвеєрної стрічки в точках набігання на блок і збігання з нього; l_1 , l_2 – довжина важелів; r – радіус блока; h – відстань між шарнірами; P_1 , P_2 – динамометри

Випробувальний стенд являє собою короткий горизонтальний стрічковий конвеєр, що дозволяє задавати і вимірювати попереднє зусилля натягування конвеєрної стрічки, змінювати й вимірювати гальмівний момент на осі блока натяжної станції.

Блок приводної станції конвеєра і пристрій натягування конвеєрної стрічки на рис. 2 не показані. Ці частини конвеєра в розрахунковій схемі замінені дією сил тяги S_1 і S_2 .

Суть методу випробувань полягає у врівноваженні моментів сил тяги S_1 і S_2 і сили тертя F конвеєрної стрічки на натяжному блоці стрічкового конвеєра після ступеневого збільшення стрічковим гальмом гальмівного моменту на його осі (спочатку в умовах зчеплення тіл, а потім – ковзання тіл, контрольованого показаннями динамометрів P_1 і P_2).

Визначення сил тяги S_2 і S_1 на ділянках набігання конвеєрної стрічки на блок і збігання з нього здійснюють методами теоретичної механіки. Сили тяги S_1 і S_2

є корінням системи лінійних рівнянь рівноваги механічної системи, які враховують відцентрованої сили :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n M_{O_1} = S_1 \cdot r - S_2 \cdot r - P_1 \cdot l_1 = 0; \\ \sum_{i=1}^k M_{O_2} = S_1 \cdot (h + r) + S_2(h - r) - P_2 \cdot l_2 - C_x \cdot h - P_1 \cdot l_1 = 0 \end{cases}$$

де $\sum_{i=1}^n M_{O_1}$ – сума моментів сил механічної системи щодо шарніра O_1 ; $\sum_{i=1}^k M_{O_2}$ – сума моментів сил механічної системи щодо шарніра O_2 ; S_1 – натягування в збігаючій з блоку гілці гнучкого тіла; S_2 – натягування в набігаючій на блок гілці гнучкого тіла; C_x – складова відцентрової сили конвеєрної стрічки; l_1, l_2 – довжина важелів; P_1, P_2 – покази динамометрів; r – радіус блоку; h – відстань між шарнірами.

Для розв'язання системи рівнянь визначимо складову відцентрової сили конвеєрної стрічки C_x .

Розглянемо епюру напружень на поверхні блоку при ковзанні і його обхваті гнучким тілом з кутом 180° , рис. 3.

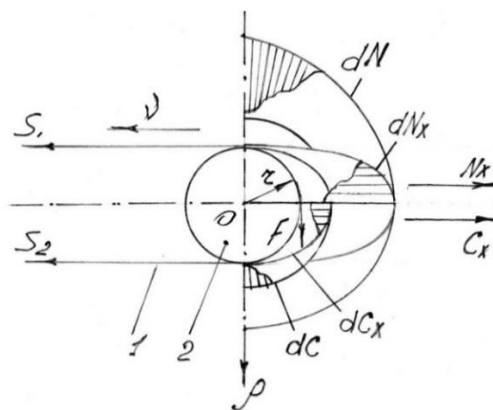


Рис. 3. Епюра напружень на поверхні блоку: 1 - гнучке тіло; 2 - блок; S_1 – більша сила, яка прикладена до одного з кінців гнучкого тіла; S_2 – менша сила, яка прикладена до другого кінця гнучкого тіла; v – швидкість руху конвеєрної стрічки; dN – нормальна реакція між елементарною ланкою гнучкого тіла та блоком; dNx – проекція нормальної реакції між елементарною ланкою гнучкого тіла та блоком; Nx – складова реакції між конвеєрною стрічкою та блоком на приводній станції в напрямку транспортування; dC – відцентрова сила елементарної ланки гнучкого тіла; dCx – проекція відцентрової сили елементарної ланки гнучкого тіла; Cx – складова відцентрової сили гнучкого тіла в напрямку транспортування; p – вісь полярній системи координат

Тому, складова відцентрових сил конвеєрної стрічки C_x визначається виразом:

$$C_x = \int_0^{C_x} S \sin \alpha \cdot dC = \frac{q \cdot v^2}{r} \cdot r \cdot \int_0^\pi S \sin \alpha \cdot da = q \cdot v^2 \cdot (-\cos \alpha) / 0^\pi = 2 \cdot q \cdot v^2$$

де q – лінійна маса конвеєрної стрічки; r – радіус блока.

Звідки сили тяги S_1 і S_2 чи натягування конвеєрної стрічки F_1 , F_2 , F_3 и F_4 в характерних точках 1, 2, 3 и 4 конвеєрної стрічки визначаються виразами:

$$S_1 = \frac{P_2 \cdot l_2 \cdot r + P_1 \cdot l_1 \cdot h}{2 \cdot r \cdot h} + q \cdot v^2; \quad S_2 = \frac{P_2 \cdot l_2 \cdot r - P_1 \cdot l_1 \cdot h}{2 \cdot r \cdot h} + q \cdot v^2.$$

У табл.1 наведені результати досліджень.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

N	Умови випробувань				Натягування гілок	
	Режим тертя стрічки	Стан стрічки	P_1 , кГ	P_2 , кГ	$S_1 = F_4$, кГ	$S_2 = F_1$, кГ
1	Зчеплення	суха	0	74	143,4	143,4
2	-/-/-	-/-/-	7,6	74	174,7	112,1
3	-/-/-	-/-/-	10,5	74	186,7	100,1
4	-/-/-	волога	0	74	143,4	143,4
5	-/-/-	-/-/-	3,3	74	147,0	129,8
6	ковзання	суха	13,3	74	198,2	88,6
7	-/-/-	волога	4,2	74	160,7	126,1

Аналіз результатів експериментальних досліджень горизонтального стрічкового конвеєра свідчить про наступне:

– після ступеневого збільшення гальмівного моменту на осі блока конвеєра (спочатку при зчепленні конвеєрної стрічки, а потім при ковзанні) провисання її вантажної ланки послідовно зменшується, а холостої ланки, навпаки, збільшується, що свідчить про збільшення та зменшення її натягування до граничних значень;

– попереднє зусилля натягування P конвеєрної стрічки на приводній станції горизонтального стрічкового конвеєра, що задається пружним елементом - динамометром P_2 при реалізації різного тягового зусилля не змінюється;

– натягування конвеєрної стрічки в характерних точках контакту з приводним блоком 1 та 4 при передачі різного тягового зусилля змінюються «дзеркально» – в точці набігання на блок збільшується і, на стільки ж, зменшується в точці збігання з нього;

– подовження замкнутої конвеєрної стрічки при незмінній швидкості її руху в різних режимах випробувань не змінюється, що свідчить про збереження загальної механічної енергії механічної системи, у тому числі потенційної;

– в цілому всі результати експерименту відповідають умовам рівноваги сил і моментів механічної системи, закону збереження механічної енергії в замкнутій механічній системі.

Отже, встановлені закономірності розподілу натягування конвеєрної стрічки при пересуванні по кільцевій траєкторії, які узгоджуються з умовами рівноваги класичної механіки та відповідають закону збереження механічної енергії

гнучкого тіла в замкнутій механічній системі необхідно використовувати при розрахунках конвеєрної транспортної лінії.

Теоретична модель розподілу натягування конвеєрної стрічки. Отримані результати досліджень дозволили розробити теоретичну модель розподілу натягування в характерних точках замкнутого попередньо натягнутого гнучкого тіла при пересуванні по кільцевій траєкторії з урахуванням його відцентрових сил.

Для похилого стрічкового конвеєра умова рівноваги сил попереднього натягування конвеєрної стрічки й реакції на натяжній і приводній станціях включає складову ваги вантажу й конвеєрної стрічки.

На рис. 4. приведена кінематична схема похилого стрічкового конвеєра:

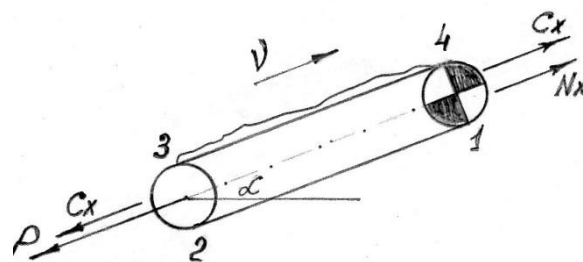


Рис. 4. Кінематична схема похилого стрічкового конвеєра: P – зусилля натягування конвеєрної стрічки на натяжній станції; C_x – відцентрові сили конвеєрної стрічки; N_x – реакція між конвеєрною стрічкою і блоком на приводній станції в напрямку транспортування; v – швидкість руху конвеєрної стрічки; α – кут нахилу конвеєра; 1,2,3,4 – характерні точки стрічкового конвеєра

Теоретична модель натягування конвеєрної стрічки похилого стрічкового конвеєра – система рівнянь рівноваги натягування конвеєрної стрічки стрічкового конвеєра в характерних його точках, яка відповідає умовам рівноваги сил й моментів механічної системи і закону збереження механічної енергії гнучкого тіла в замкнутій механічній системі:

$$\begin{cases} M_0 = F_0 \cdot r = F_{4-1} \cdot r; (F_{4-1} = F_4 - F_1 = (N_{1-2} + N_{2-3} + N_{3-4}) \cdot \omega + T_{1-4}); \\ P + C_x + (q + 2 \cdot q_0) \cdot l \cdot g \cdot \sin \beta = N_x + C_x; (P + C_x = F_2 + F_3; F_{3-2} = F_3 - F_2; N_x + C_x = F_1 + F_4). \end{cases}$$

де M_0 – зовнішній крутний момент; F_0 – зовнішнє кругове тягове зусилля; r – радіус блоку; $F_{н-с}$ – реалізоване тертям кругове тягове зусилля конвеєра; $F_1, F_2, F_3; F_4$ – зусилля натягування конвеєрної стрічки на контактах з блоками натяжної й привідної станцій; F_{1-2} – сила тяги ділянки 1-2 стрічкового конвеєра; F_{2-3} – сила тяги ділянки 2-3 стрічкового конвеєра; F_{3-4} – сила тяги ділянки 3-4 стрічкового конвеєра; F_{1-4} – сила тяги ділянки 1-4 стрічкового конвеєра; N_x – реакція між конвеєрною стрічкою і блоком на привідній станції; C_x – складова відцентрової сили конвеєрної стрічки; P – зусилля попереднього натягування конвеєрної стрічки на натяжній станції; q – лінійна маса вантажу; q_0 – лінійна маса конвеєрної стрічки; g – прискорення сили тяжіння; β – кут нахилу стрічкового конвеєра; l – довжина конвеєра.

Тестування рівняння тертя гнучкого тіла Ейлера. Важливим елементом методу розрахунку стрічкової транспортної лінії є умова передачі конвеєрній стрічці заданого тягового зусилля, яка витікає з рівняння тертя гнучких тіл, від правильності якого залежить достовірність результатів розрахунку.

Раніше сумнівність рівняння тертя гнучких тіл Ейлера була дискусійною. Дослідники обґрунтовували неточність рівняння тертя гнучких тіл Ейлера емпірично, у тому числі порівнянням коефіцієнтів тертя, які встановлено непрямо (у відповідності до рівнянням тертя гнучких тіл Ейлера) і прямо (у відповідності до закону тертя тіл Амонтона), як відношення сили тертя до нормальної реакції між тілами:

$$f = \frac{F}{N};$$

де f – коефіцієнт тертя між тілами; F – сила тертя; N – нормальна реакція між тілами.

Щоб теоретично встановити правильність рівняння тертя гнучких тіл Ейлера очевидно необхідно перевірити його на відповідність законами класичної механіки, у тому числі, умовам рівноваги механічної системи.

Якщо рівняння тертя гнучких тіл відповідає законам класичної механіки, то тоді воно є правильне – таке, як насправді. Якщо рівняння їм не відповідає, то тоді воно не є правильне.

Тому, наприклад, проведемо тестування рівняння тертя гнучких тіл Ейлера на відповідність умовам рівноваги сил і моментів класичної механіки, яким відповідають результати експериментальних досліджень і розроблена теоретична модель натягування конвеєрної стрічки.

Для наочності розглянемо епюру напружень на поверхні блоку при ковзанні і його обхваті гнучким тілом з кутом 180° , рис. 3.

Визначимо складові реакції N_x на блоці конвеєра в напрямку транспортування і кругове тягове зусилля F_{n-c} при ковзанні.

З умов рівноваги сил і моментів для приводного блоку конвеєра відомо (рис.4):

$$N_x + C_x = S_1 + S_2;$$

$$F_{n-c} = S_1 - S_2,$$

В наступних перетвореннях використаємо такі параметри: натягування гнучкого тіла по лінії контакту з блоком, силу тертя і нормальну реакцію між тілами при ковзанні по блоку, які відповідають рівнянню тертя гнучких тіл Ейлера:

$$\frac{S_1}{S_2} = e^{f \cdot \varphi};$$

$$S(a) = S_2 \cdot e^{f \cdot a};$$

$$F_{n-c} = S_1 - S_2 = S_2 \cdot (e^{f \cdot a} - 1);$$

$$dN = S(a) da.$$

де f – коефіцієнт тертя між гнучким тілом та блоком; φ – кут обхвату блока гнучким тілом; a – кут заданого перетину гнучкого тіла, який має контакт з блоком;

da – елементарний кут обхвату, який відповідає елементарній ланці гнучкого тіла dl ; $F_{н-з}$ – реалізоване тертям кругове тягове зусилля на блоці.

Тому, для рівняння тертя гнучких тіл Ейлера перевіримо виконання на приводному блоці стрічкового конвеєра:

– умови рівноваги сил:

$$N_x = \int_0^\pi S(a) \cdot \sin a \cdot da = \int_0^\pi S_2 \cdot e^{f \cdot a} \cdot \sin a \cdot da =$$

$$= \left(\frac{S_2 \cdot e^{f \cdot a}}{f^2 + 1} \cdot (f \cdot \sin a - \cos a) \right) / \pi_0 = \frac{S_2 \cdot (e^{\frac{S_1 - S_2}{N} f \cdot \pi} - 1)}{\frac{(S_1 - S_2)^2}{N^2} + 1} \neq S_1 + S_2$$

де N_x – нормальна реакція між тілами.

– умови рівноваги моментів:

$$M_0 = F_0 r = F_{н-с} r \rightarrow F_0 = F_{н-с} = S_1 - S_2 \rightarrow$$

$$F_{н-с} = S_{1-2} = S_2 (e^{f \cdot \pi} - 1) = S_2 (e^{\frac{S_1 - S_2}{N} \cdot \pi} - 1) \neq S_1 - S_2$$

де M_0 – зовнішній крутний момент; F_0 – кругове тягове зусилля.

Отже, теоретично встановлено, що зазначене рівняння не відповідає умовам рівноваги сил і моментів класичної механіки. Тобто рівняння тертя гнучких тіл Ейлера не є неправильне.

Нове рівняння тертя гнучких тіл. Знаходження правильного рівняння тертя гнучких тіл, що враховує вплив відцентрових сил, здійснили уточненням отриманого на каф. ТСТ нового виведення результатів розв'язання класичної задачі Ейлера про ковзання гнучкого тіла по нерухомому блоку – нового рівняння тертя гнучких тіл, яке вперше відповідає законам класичної механіки [3,5,6].

Була обґрунтована нова система диференціальних рівнянь рівноваги гнучкого тіла при ковзанні по нерухомому блоку. Вона включає два рівняння рівноваги механічної системи з врахуванням впливу відцентрових сил і закон тертя тіл Кулона (замість застарілого закону Амонтона, запропонованого Ейлером) для елементарної ланки гнучкого тіла, а також умову рівноваги натягування гнучкого тіла уздовж лінії контакту з блоком, яка відповідає сучасній редакції закону збереження механічної енергії в замкнутій механічній системі:

$$\begin{cases} dN = (S - q \cdot v^2) \cdot da; \\ r \cdot dS = r \cdot dF; \\ dF = \frac{F_c}{\varphi} \cdot da + C \cdot dN; \\ \frac{\partial N}{\partial f} = \frac{\partial \left(\int_0^\varphi S \cdot da \right)}{\partial f} = 0. \end{cases}$$

де dN – нормальна реакція між елементарною ланкою гнучкого тіла та блоком; S – натягування гнучкого тіла в заданому перетині; da – елементарний кут обхвату, який відповідає елементарній ланці гнучкого тіла dl ; dF – сила тертя між елементарною ланкою гнучкого тіла та блоком; α – кут заданого перетину гнучкого тіла, який має контакт з блоком; φ – кут обхвату блока гнучким тілом; r – радіус блока; F_c і C – параметри тертя тіл Кулона; f – коефіцієнт тертя ковзання між гнучким тілом та блоком.

Розв'язання зазначеної системи диференціальних рівнянь – нове рівняння тертя гнучких тіл з врахуванням відцентрових сил гнучкого тіла:

$$S_1 - S_2 = f \cdot \left(\varphi \cdot \frac{S_1 + S_2 - 2 \cdot q \cdot v^2}{2} \right).$$

Опосередковано нове рівняння тертя гнучких тіл також містить загальновизнані «нормальну реакцію» і «силу тертя», які лінійно пов'язані між собою за допомогою «коефіцієнта тертя», що відповідає загальновизнаним уявленням вчених про тертя тіл:

$$F = S_1 - S_2 = f \cdot \left(\varphi \cdot \frac{S_1 + S_2 - 2 \cdot q \cdot v^2}{2} \right) = f \cdot N.$$

$$N = \left(\varphi \cdot \frac{S_1 + S_2 - 2 \cdot q \cdot v^2}{2} \right).$$

У відповідності до нового рівняння тертя гнучких тіл для передачі конвеєрній стрічці заданого тягового зусилля необхідно забезпечити на блоці достатню нормальну силу стискання між тілами чи сумарне зусилля натягування гнучкого тіла в двох ланках, а не так як реалізовано в діючих методах розрахунку – натягування в одній ланці:

$$N = \frac{\varphi \cdot (S_1 + S_2 - 2qv^2)}{2} \geq \frac{F_0}{f};$$

$$(S_1 + S_2) \geq \frac{2 \cdot F_0}{f \cdot \varphi} + 2 \cdot q \cdot v^2;$$

де F_0 – кругове тягове зусилля.

Отже, нами отримано нове рівняння тертя гнучких тіл й умова передачі йому заданого тягового зусилля, які враховують вплив його відцентрових сил.

Також нове рівняння тертя гнучких тіл з врахуванням впливу відцентрових сил відповідає загальновизнаним уявленням про терті тіл, що склалися протягом століть. Воно опосередковано включає силу тертя й нормальну реакцію між тілами, які лінійно пов'язані між собою, що співпадає з чинним законом тертя тіл Кулона [3, 5, 6].

Тестування нового рівняння тертя гнучких тіл. Відповідно до нового рівняння тертя гнучких тіл рівняння натягування гнучкого тіла по лінії контакту з блоком, сила тертя і нормальна реакція між тілами при ковзанні по блоку подаються рівняннями [3, 5, 6]

:

$$S(a) = (S_2 + \frac{S_1 - S_2}{\pi}) \cdot a;$$

$$dN = (S - qv^2)da;$$

$$F_{H-c} = S_1 - S_2,$$

Тому, проведемо тестування нового рівняння тертя гнучких тіл, яке враховує вплив його відцентрових сил, на відповідність умовам рівноваги механічної системи при куті обхвату блока рівному 1800:

- умові рівноваги сил:

$$\begin{aligned} N_x + C_x &= \int_0^\pi S(a) \sin a da + \int_0^\pi qv^2 \sin a da = \int_0^\pi (S - qv^2) \sin a da + \\ &+ \int_0^\pi qv^2 \sin a da = \int_0^\pi (S_2 + \frac{S_1 - S_2}{\pi} a - qv^2) \sin a da + 2qv^2 = \\ &= (-S_2 \cdot \cos a + \frac{S_1 - S_2}{\pi} \cdot (\sin a - a \cdot \cos a)) / 0^\pi = S_1 + S_2. \end{aligned}$$

- умові рівноваги моментів на приводному блоці:

$$\begin{aligned} F_{H-c} &= S_1 - S_2 = f \cdot (\pi \cdot \frac{S_1 + S_2 - 2 \cdot q \cdot v^2}{2}) = \\ &= f \cdot N = \frac{S_1 - S_2}{N} \cdot N = S_1 - S_2; \end{aligned}$$

Тому нове рівняння тертя гнучких тіл з врахуванням впливу відцентрових сил відповідає умовам рівноваги механічної системи, що свідчить про його правильність і правильність умови передачі гнучкому тілу заданого тягового зусилля, яка використовується в методах розрахунку параметрів конвеєрної транспортної лінії.

Висновки. Таким чином, встановлені закономірності розподілу натягування конвеєрної стрічки стрічкового конвеєра в характерних його точках та розроблена теоретична модель розподілу її натягування з врахуванням впливу відцентрових сил, яка узгоджується з умовами рівноваги механічної системи й законом збереження механічної енергії в замкнутій механічній системі.

Отримане нове рівняння тертя гнучких тіл з якого витікає умова передачі гнучкому тілу заданого тягового зусилля з врахуванням його відцентрових сил. Опосередковано вони включають силу тертя й нормальну реакцію між тілами, які лінійно пов'язані між собою, що відповідає загально визнаним уявленням про тертя тіл, умовам рівноваги механічної системи, закону збереження механічної енергії в замкнутій механічній системі, закону Гука й співпадає з законом трення тіл Кулона, що свідчить про їх правильність.

Використання отриманих результатів наукових досліджень в розрахунках конвеєрних транспортних ліній призведе до отримання оптимальних параметрів, що сприяє їх ефективній експлуатації в народному господарстві.

Перелік посилань

1. Лубенец, Н.А. (2008) Альтернативный формуле Эйлера закон реализации тягового усилия трением. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 11, 67 – 70.
2. Лубенец, Н.А. (2014) Новое решение классической задачи Эйлера о скольжении гибкого тела по неподвижному блоку. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 3, 45 -53.
3. Лубенец, Н.А. (2017) Сохранение механической энергии гибкого тела при трении по блоку. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 50, 194 – 202.
4. Лубенец, Н.А. (2017) Новое уравнение трения гибких тел и общий закон о трении в эксплуатации транспортных машин с гибким тяговым органом. *ПРР, Збірник наукових робіт Національного гірничого університету*, Т. 11, 4, 104-110.
5. РТМ 24.093.04-80 (1980) *Проектирование стационарных ленточных конвейеров общего назначения*. Москва: Госстандарт.
6. Кузнецов, Б.А., Рентгевич, А.А., & Шорин, В.Г. (1976) *Транспорт на горных предприятиях*. Москва: Недра.
7. Біліченко, М.Я. (2002) *Основи теорії та розрахунки засобів транспортування вантажів шахт: Навч. посібник*. Дніпропетровськ: Національна гірнича академія України.
8. Андреев, А.В. (1963) *Передача трением*. Москва: Машгиз.

АННОТАЦИЯ

Цель. Установление закономерности распределения натяжения конвейерной ленты ленточного конвейера, поиск уравнение трения гибких тел и условия передачи гибком телу заданного тягового усилия с учетом центробежных сил гибкого тела.

Методика. Экспериментальные и теоретические исследования на испытательном стенде ленточного конвейера и поиск нового решения классической задачи Эйлера о скольжения гибкого тела по неподвижному блока с учетом центробежных сил гибкого тела. Экспериментальные исследования заключаются в уравнивании моментов тяги и трения конвейерной ленты на станциях ленточного конвейера и определении ее натягивания. Решение задачи Эйлера осуществляют с использованием новых научных знаний о трениях тел и сохранения механической энергии.

Результаты. На основе экспериментальных и теоретических исследований: - установлена закономерность распределения натяжения конвейерной ленты ленточного конвейера и разработана теоретическая модель распределения ее натягивания в характерных точках с учетом центробежных сил гибкого тела; - получено уравнение трения гибких тел и условие передачи гибком телу заданного тягового усилия с учетом центробежных сил гибкого тела.

Научная новизна. Впервые установлена закономерность распределения натяжения конвейерной ленты в характерных точках ленточного конвейера с учетом центробежных сил гибкого тела. Впервые получено новое уравнение трения гибких тел с учетом центробежных сил гибкого тела, соответствует общепризнанным представлениям о трениях тел и законам классической механики: условиям равновесия механической системы; закону сохранения механической энергии в замкнутой механической системе; закону Гука и закону трения тел Кулона.

Практическая значимость. Разработана теоретическая модель распределения натяжения конвейерной ленты в характерных точках ленточного конвейера с учетом центробежных сил гибкого тела. Получено уравнение трения гибких тел и условие передачи конвейерной ленте заданного тягового усилия с учетом ее центробежных сил. Использование результатов научных исследований в расчетах конвейерных транспортных линий приводит к определению оптимальных параметров и способствует повышению эффективности работы горных предприятий.

Ключевые слова: *ленточный конвейер, конвейерная лента, гибкое тело, блок, трение, натяжение, центробежные силы, механика, закон, уравнение трения гибких тел.*

ABSTRACT

Purpose. Establishing regularities of distribution of tension of a conveyor belt of a belt conveyor, search of the equation of friction of flexible bodies and conditions of transfer to the flexible body of the given tractive effort taking into account the centrifugal forces of the flexible body.

Method. Experimental investigations on the belt conveyor test bench and the theoretical solution of the Euler problem in 1775 on the sliding of a flexible body over a fixed block, taking into account the centrifugal forces of a flexible body. Research at the stand is to balance the thrust and friction moments of the conveyor belt on the conveyor belt blocks and to determine the tension of the conveyor belt. The Euler problem is solved with the use of new scientific knowledge about the friction of bodies and the conservation of mechanical energy.

Results. Based on experimental and theoretical studies: - the tension distribution of the conveyor belt of the conveyor belt at the characteristic points of the belt conveyor was established and a theoretical model was developed taking into account the centrifugal forces of the flexible body; - the new equation of friction of flexible bodies is deduced and the condition of transfer to the flexible body of the given tractive effort taking into account the centrifugal forces of the flexible body.

Scientific novelty. For the first time, a regularity of the tension distribution of the conveyor belt of the belt conveyor was established taking into account the centrifugal forces of the flexible body, which corresponds to the equilibrium conditions of the mechanical system. For the first time, a new equation of friction of flexible bodies was obtained, taking into account the centrifugal forces of a flexible body, which corresponds to the laws of classical mechanics: the equilibrium conditions of a mechanical system; the law of conservation of mechanical energy in a closed mechanical system; the law of Hooke and the law of friction of Coulomb bodies.

Practical importance. A theoretical model of the distribution of the conveyor belt tension at the characteristic points of the belt conveyor is developed. The condition of transmission to the conveyor belt of a given tractive force was obtained. The use of scientific research results in the calculation of the parameters of conveyor transport lines leads to the definition of optimal parameters and helps to increase the efficiency of mining enterprises.

Keywords: *belt conveyor, conveyor belt, flexible body, block, friction, tension, centrifugal forces, law, equation of friction of flexible bodies.*