

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПРИГОДІЙ ДЕНИС ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.01

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕОРІЇ ДИНАМІКИ І ОБЛАДНАННЯ
СИСТЕМ ТРАНСПОРТУВАННЯ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ
В ТЕХНОЛОГІЯХ ПАКУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових,
мікробіологічних та фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
СОКОЛЕНКО Анатолій Іванович,
Національний університет харчових техно-
логій, завідувач кафедри мехатроніки
та пакувальної техніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
СТАДНИК Ігор Ярославович,
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя, професор
кафедри обладнання харчових технологій

кандидат технічних наук, доцент
ПІДЛІСНИЙ Віталій Володимирович,
Подільський державний аграрно-технічний
університет, доцент кафедри машиновико-
ристання в АПК

Захист відбудеться "08" листопада 2018 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 у Національному університеті харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68, аудиторія А-311.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий "04" жовтня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізо-
ваної вченої ради, к.т.н., доц.

Літвинчук С. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Розвиток технологій виробництва гнучких пакувальних матеріалів здійснюється паралельно зі створенням теорії, яка стосується їх синтезу, структури, кінематики і динаміки одержання рулонів, перевезень, складування, доставки до ліній пакування, розмотування і реалізації систем подавання рулонних пакувальних матеріалів, синтезу з них упаковок та збільшених вантажних одиниць. Всякі переміщення і трансформації матеріалів супроводжуються комплексами силових впливів у формі сил рушійних і сил опору, до числа яких відносяться сили тертя і моменти сил тертя. Ця особливість дуалізму факторів тертя в особливих формах повертає до вічної проблеми, над якою працювали і працюють технічні спеціалісти. Перехід до використання плівкових пакувальних матеріалів з їх специфічними властивостями привів до необхідності вивчення особливостей їх взаємодій між собою, робочими органами, елементами формування упаковок і, нарешті, до технічного забезпечення заданих процесів, режимів і умов міцності. Необхідність удосконалення теорії і практики технологій подавання рулонних плівкових пакувальних матеріалів складає актуальність цього дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до пріоритетного напрямку робіт НУХТ. "Розроблення наукових основ технологічних процесів харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв з метою створення високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації для харчових та переробних галузей АПК" (схвалено вченою радою НУХТ, протокол №7 від 25.03.2006) та пов'язана з планом науково дослідної роботи кафедри технічної механіки і пакувальної техніки НУХТ «Розроблення складових сучасних технологій та процесів виготовлення пакувальних матеріалів і упаковки, підготовки харчової продукції до фасування і синтезу машин для пакування та переробки упаковки, а також держбюджетної фундаментальної науково-дослідної роботі «Наукові засади оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування харчових продуктів» (шифр держреєстрації 0112U007798).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення математичних моделей і пропозицій щодо удосконалення технологій і обладнання систем для подавання рулонних пакувальних матеріалів.

На основі проведеного огляду і аналізу особливостей побудови систем подавання рулонних пакувальних матеріалів сформульовано наступні завдання дослідження:

- виконати аналіз і здійснити узагальнення, яке стосується особливостей систем переміщення рулонних пакувальних плівкових матеріалів;
- здійснити аналіз і визначити особливості тертя при взаємодії між робочими органами і плівковими матеріалами, оцінити перспективи підвищення сил тертя як рушійних факторів і обмеження сил тертя як факторів опору;
- встановити присутність фізичної єдності між закономірностями Ейле-

ра і законами тертя Амонтона-Кулона;

- здійснити експериментальну перевірку присутності не ізотропності плівкових пакувальних матеріалів за показником сил тертя (коефіцієнтів тертя) в різних напрямках;
- розробити математичні формалізації взаємозв'язків сил тертя з геометричними і силовими параметрами систем переміщення плівкових матеріалів;
- розробити математичний апарат опису перехідних процесів в системах переміщення плівкових матеріалів, розділених компенсаційно-амортизаційними пристроями;
- розробити рекомендації щодо обмежень динамічних складових навантажень плівкових потоків, можливостей рекуперації кінетичної енергії і обмежень нерівномірності ходу в приводах обладнання.

Об'єктом досліджень є механічні і енергетичні процеси, що відбуваються в системах переміщень рулонних плівкових пакувальних матеріалів.

Предметом досліджень є системи і обладнання для переміщень плівкових рулонних пакувальних матеріалів.

Методи досліджень. Використано методи математичного моделювання фізико-механічних процесів взаємодій робочих органів обладнання з плівковими матеріальними потоками, кінематичного і динамічного синтезу елементів систем, математико-статистичного аналізу результатів експериментів.

Для проведення математичних розрахунків та результатів обчислювальних експериментів використано методи математичного програмування у середовищі універсального інженерно-математичного комплексу MatLAB.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі аналізу загального стану, положень і особливостей машинного оформлення систем переміщень плівкових рулонних пакувальних матеріалів, заходів по створенню математичних формалізацій і удосконаленню технологічних процесів встановлено наступне:

- розроблено математичні формалізації, що стосуються взаємодій робочих органів з плівковими рулонними пакувальними матеріалами для збільшення рушійних факторів;
- показано, що присутність компенсаційно-амортизаційних пристроїв в системах переміщення плівкових рулонних пакувальних матеріалів поділяє їх на дві динамічно незалежні частини, які моделюються одномасовими моделями;
- визначено, що у випадках компенсаційно-амортизаційних пристроїв з ваговими натяжними системами вони моделюються проміжними масами, які разом з ведучими утворюють двомасові системи;
- показано фізичну єдність між залежностями Ейлера щодо тертя в системах з кутом охоплення гнучким зв'язком ведучих або ведених роликів і першим законом тертя;
- одержано рівняння регресій по визначенню коефіцієнтів тертя і натягів в гнучких зв'язках;
- наведена математична формалізація можливості створення компенсато-

ра-стабілізатора моменту інерції системи "рулоноутримувач – рулон".

- розроблено математичні моделі перехідних процесів в приводах систем з оцінками перспектив рекуперації кінетичної енергії.

Особистий внесок здобувача. Автор особисто розробив програму і методику досліджень та приймав участь у створенні експериментальних установок. Виконав теоретичні дослідження з їх наступною апробацією. Здійснив обробку експериментальної частини досліджень та узагальнення одержаних результатів, сформулював заявки на винаходи України.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на: міжнародній студентській науково-практичній конференції з проблем пакувальної індустрії. (м. Київ, 2013, 2014), XI науково-практичній конференції молодих вчених "Новітні технології пакування" (м. Київ, 2015), міжнародній спеціалізованій науково-практичній конференції "Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності" (м. Київ, 2016, 2017).

Етапи дисертаційної роботи доповідалися на наукових семінарах кафедри технічної механіки і пакувальної техніки НУХТ.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені математичні формалізації увійшли до програми дисциплін "Пакувальне обладнання", "Автоматизовані потокові лінії" та "Математичне моделювання процесів пакування" технічної механіки і пакувальної техніки НУХТ.

Розроблено методики розрахунків приводів плівкових матеріальних потоків з можливістю збільшувати сили тертя як рушійні фактори за рахунок вибору геометричних параметрів, збільшення кутів охоплення гнучким матеріалом ведучих елементів, переходом до лінійних контактів зі створенням двох площин тертя.

Запропоновано технічні рішення на рівні винаходів, що стосуються обмеження сил тертя при формуванні плівкових рукавів та фрикційного чотириланкового механізму протягування плівки і механізму стабілізації натягів плівки.

Запропоновано заходи по збільшенню сил тертя в механізмах протягування плівок на основі ефектів тертя плівок з клиновими елементами.

Розроблені на основі теоретичних досліджень пропозиції по удосконаленню систем транспорту плівкових матеріалів передані промисловим підприємствам, а саме: ТОВ "Санвіта Груп" (м. Івано-Франківськ) та ТОВ «Сучасні торговельні технології» ГК «Верес» (м. Канів).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 5 наукових статей у фахових виданнях, 5 тез доповідей на науково-технічних конференціях різних рівнів та одержано 2 патенти України на корисні моделі.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, списку використаних літературних джерел, що містить 152 найменування.

Основний зміст дисертаційної роботи на 167 сторінках друкованого тексту. Робота містить 53 рисунків, 16 таблиць і 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована доцільність і актуальність дисертаційної роботи. Відмічено важливість пошуків у напрямку удосконалення систем транспортування плівкових пакувальних матеріалів в загальній технології їх виготовлення і використання

У розділі 1 виконано огляд і аналіз, що стосується загальних положень, машин і ліній пакування на основі гнучких пакувальних матеріалів, систем для подавання рулонних пакувальних матеріалів, динаміки перехідних процесів, особливостей полімерних плівкових матеріалів.

За результатами огляду і аналізу сформульовано наступні задачі досліджень:

1. Виконати критичну оцінку тенденцій розвитку завершальних стадій виробництв харчових продуктів, фасованих в упаковки сформованих із рулонних матеріалів.

2. Розробити аналітичну формалізацію впливів нестабільних значень моментів інерції системи "рулоноутримувач – рулон" на динаміку і час перебігу перехідних процесів розмотування плівки. Обґрунтувати можливість створення стабілізатора моменту інерції системи "рулоноутримувач – рулон".

3. Аналітично сформулювати оцінку перспектив рекуперації кінетичної енергії і обмеження нерівномірності ходу приводів машин.

4. Розробити методи теоретичних і експериментальних досліджень обладнання систем для переміщень плівкових рулонних пакувальних матеріалів.

5. Розробити аналітичні моделі і пропозиції щодо створення технічних можливостей підвищення факторів тертя як рушійних в системах протягування плівкових матеріалів з оцінкою їх характеристик.

6. Розробити математичні формалізації тертя в системах циклічної дії, кінематики і динаміки силових взаємодій.

7. Сформулювати аналітичні моделі в розробках систем рекуперації кінетичної енергії.

8. Розробити математичні формалізації геометрії і навантажень гнучких елементів в системах переміщень плівкових матеріалів.

9. Виконати експериментальну апробацію теоретичних досліджень і сформулювати пропозиції щодо впровадження результатів розробок.

Розділ 2 присвячений опису методів досліджень систем для переміщення рулонних пакувальних матеріалів, вибору фізичного підґрунтя і припущень, що покладені в основу фізичних і математичних моделей, результатам експериментальної перевірки теоретичних викладок.

Феноменологічний аналіз застосовано відносно структури побудови ліній пакування в частині систем транспортування гнучких пакувальних матеріалів і динаміки перехідних процесів. Аналітичне моделювання останніх здійснювалося на основі положень класичної механіки, законів Ньютона з врахуванням принципів Д'Аламбера, можливих переміщень, законів тертя.

У відповідності до структури наукових досліджень перший розділ дисертації пов'язано з аналізом сучасних досягнень в побудові систем транспорту-

вання пакувальних матеріалів і оцінкою недоліків, пов'язаних з нестабільністю такого динамічного показника, як момент інерції веденої маси рулону пакувального матеріалу. Останній недолік помітно підсилюється дискретними режимами транспортування пакувальних матеріалів і тим, що рушійні фактори в них одночасно з факторами стабілізації натягів плівок представлені силами тертя з протилежними вимогами до них збільшення/зменшення на окремих ділянках систем.

Аналіз і пошук методів впливу на тертя в кінематичних парах з присутністю гнучких зв'язків у співвідношеннях між фізичними, кінематичними, геометричними і силовими факторами здійснювався у третьому розділі з подальшою розробкою відповідних математичних формалізацій.

Теоретичний аналіз тертя в системах циклічної дії виконаний у четвертому розділі роботи, який стосується особливостей тертя в двох площинах і здійснювався на основі положень статyki і динаміки зі створенням математичних моделей. Математичні формалізації щодо плівкових полотен дозволили визначитись з їх умовами міцності і оцінками можливостей рекуперації кінетичної енергії в приводах машин.

Теорію диференціальних рівнянь ланцюгових ліній в моделюванні геометрії гнучких зв'язків на ділянках між опорами на трасах переміщення пакувальних матеріалів було застосовано у п'ятому розділі.

Розділ 3 представлено особливостями сил тертя в обладнанні ліній пакування, які присутні у формі зовнішнього і внутрішнього тертя. За нестабільності факторів впливу в лініях пакування на тертя виникає необхідність врахування цих явищ і наближеність у проявах законів тертя. З числа останніх лише перший закон тертя Амонтона-Кулона має кількісне співвідношення між факторами впливу на силу тертя в кінематичній парі, яке доповнюється закономірністю Ейлера.

Важливість можливості впливу на сили тертя підкреслюються тим, що часто навіть у розв'язанні одної технологічної задачі виникає потреба обмежень

сил тертя на окремих ділянках і, одночасно, до їх збільшення.

Відомо, що взаємодія між гнучким елементом і ведучим або веденим шківом, яким він охоплюється, супроводжується силою тертя у формі:

$$F = s_1 - s_2 = s_2(e^{\alpha f} - 1), \quad (1)$$

де s_1 і s_2 – відповідно натяги гнучкого елемента (плівки) в точках набігання і збігання; α – кут охоплення гнучким елементом барабана; f – коефіцієнт тертя.

Вирішення задачі збільшення сили F доцільно вирішувати за рахунок кута α , наприклад, зміною геометрич-

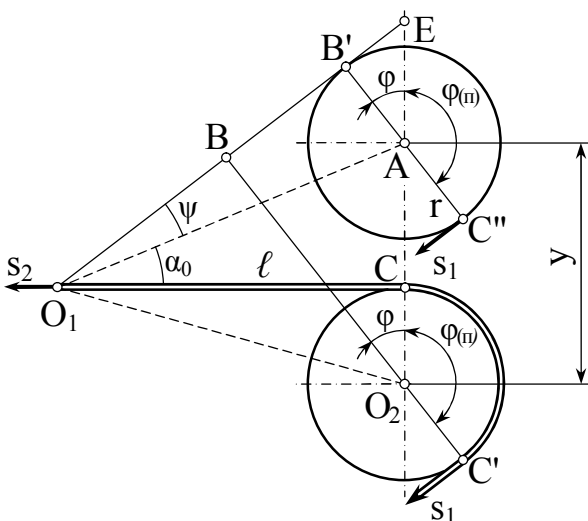


Рис. 1. Схема щодо визначення геометричних зв'язків за реалізації збільшення кута охоплення

них зв'язків (рис. 1). В такому варіанті точка С є точкою набігання, а точка С' – точкою збігання. Їм відповідає початковий кут охоплення $\varphi_{(п)}$, збільшення якого на величину φ можливо здійснити вертикальним зміщенням центра обертання барабана з точки O_2 в точку А на відстань y .

У відповідності до наведеної розрахункової схеми одержано залежності щодо кінцевого кута охоплення:

$$\varphi_{(к)} = \varphi_{(п)} + \varphi = \varphi_{(п)} + \arccos \frac{r}{\ell \operatorname{tg}(\alpha_0 + \psi) - y}. \quad (2)$$

де $\ell = O_1C$; r – радіус барабану; $y = O_2A$; φ , α_0 і ψ – кути:

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{y-r}{\sqrt{\ell^2 + (AC)^2}}; \quad \psi = \arcsin \frac{r}{\sqrt{\ell^2 + (AC)^2}}. \quad (3)$$

$$AC = y - r. \quad (4)$$

В окремих випадках пошук геометричних зв'язків може бути суттєво спрощеним за умови початкового синтезу технологічного обладнання. Разом з

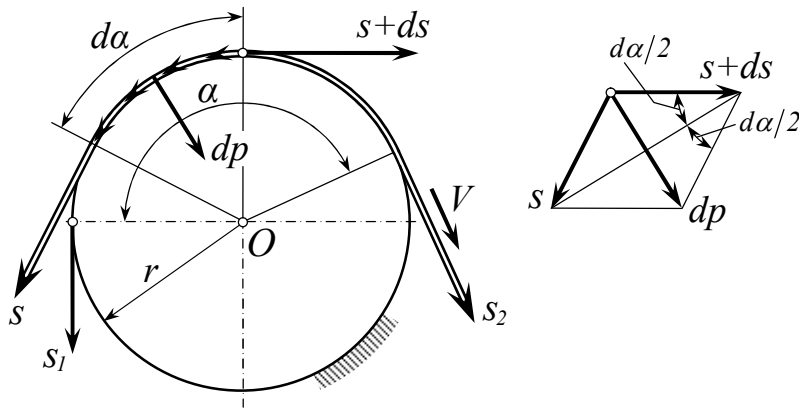


Рис. 2. Схема до визначення силових параметрів системи "барабан – гнучкий елемент"

тим нестабільність значень коефіцієнтів тертя і зовнішніх умов експлуатації приводять до необхідності пошуку нестандартних підходів для забезпечення заданих кінематичних і динамічних параметрів.

В лініях пакування зустрічаються випадки, коли стрічка рухається навколо барабана з ковзанням, і коли повне відносне ковзання відсутнє (рис. 2). За нерухомого опорного елемента і нехтування масою та відцентровою силою гнучкого елемента маємо:

$$s_2 = s_1 + F \quad \text{і звідси} \quad F = s_2 - s_1. \quad (5)$$

Перехід до елементарних величин дозволяє записати:

$$dF = (s + ds) - s = ds \quad \text{і} \quad dF = fd\bar{P}, \quad (6)$$

де $d\bar{P}$ – елементарна сила притискання.

Знехтувавши величинами другого порядку і замінивши паралелограм ромбом зі стороною s , маємо:

$$dp = 2s \sin \frac{d\alpha}{2} \approx 2s \frac{d\alpha}{2} \approx s d\alpha. \quad (7)$$

Тоді з врахуванням рівнянь (6), одержуємо:

$$\frac{ds}{s} = fd\alpha; \quad \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{s} = \int_0^{\alpha} fd\alpha; \quad \ln \frac{s_2}{s_1} = f\alpha; \quad s_2 = s_1 e^{\alpha f}. \quad (8)$$

Оскільки умову (8) одержано на основі співвідношення (6), то приходимо

до висновку про тотожність формули Ейлера і першого закону тертя Амонтона-Кулона.

Сила F є найбільшою силою, яка може бути передана шківу:

$$F = s_1(e^{\alpha f} - 1). \quad (9)$$

Тоді момент, що передається веденій ланці:

$$M = (s_2 - s_1)r = s_1 r(e^{\alpha f} - 1). \quad (10)$$

Значення s_1 співставляється з допустимим навантаженням гнучкого зв'язку:

$$[s_1] \leq [\sigma_0] f_0, \quad (11)$$

де $[\sigma_0]$ – допустиме напруження гнучкого елемента; f_0 – площа його поперечного перерізу.

При цьому

$$[\alpha] \geq \frac{\ln \frac{s_1}{s_2}}{f} \geq \frac{\ln \frac{[\sigma_0] f_0}{s_2}}{f}. \quad (12)$$

Аналіз щодо проявів законів тертя в клинопасових передачах і фрикційних передачах з клиновими катками показує можливість застосування ефектів приведенного коефіцієнта тертя у формі:

$$f_{\text{пр}} = \frac{f}{\sin \gamma}, \quad (13)$$

де γ – подвійний кут розклинки.

Це означає доцільність додавання до факторів впливу α і f кута γ .

На основі одержаних математичних моделей виконано два трифакторних обчислювальних експерименти з факторами впливу s_1 , α та f з заданими інтервалами варіювання і з параметрами ℓ , r та u як факторами впливу на значення кутів охоплення з одержанням відповідних рівнянь регресій. В режимі фізичного експерименту виконано дослідження не ізотропності властивостей матеріалів за показників коефіцієнтів тертя в різних напрямках по поверхнях полотен плівкових матеріалів. За такі напрямки обрано поперечні і поздовжні переміщення, які підтвердили вказану не ізотропність стосовно статичних і кінематичних коефіцієнтів тертя.

Розділ 4 стосувався досліджень особливостей тертя і динаміки навантажень в системах транспортування плівкових матеріалів циклічної дії. Протягування плівок є важливою складовою сукупності операцій, до якої ставляться вимоги обмеження навантажень і величин деформацій, відсутності залишкових деформацій, точності позиціонування і переміщень. При цьому використання фрикційного способу передачі руху у більшості випадків є єдиною технічною можливістю. Одночасно фрикційний спосіб є запобіжним засобом обмеження навантажень. До числа застосовуваних випадків відносяться системи, в яких має місце контактування робочого органу з плівковим полотном, що знаходиться в контакті з нерухомою поверхнею (рис. 3), а робочий орган виконує циклічні зворотно-поступальні переміщення. Рушійна сила P прикладається до робочого органу під кутом α до лінії переміщення, що забезпечує одночасне притискання і замикання системи та відповідне переміщення.

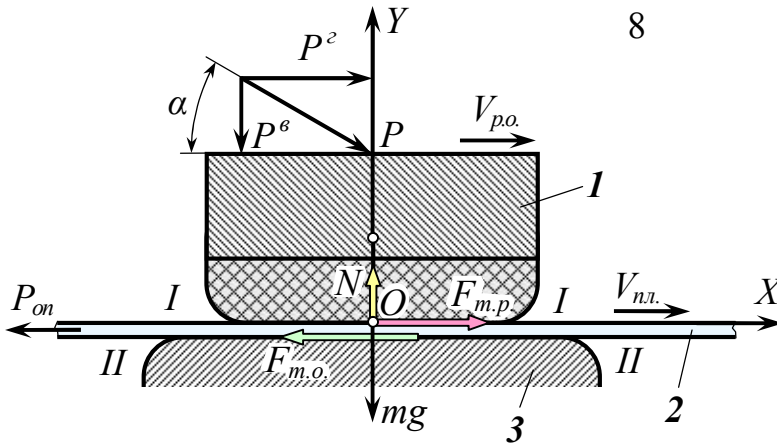


Рис. 3. Схема випадку тертя в двох площинах:
1- Приводний елемент; 2-плівка; 3-нерухома
площина

Особливістю такої системи є те, що саме сила P створює сили тертя $F_{т.р.}$ і $F_{т.о.}$ складовою $P^b = P \sin \alpha$ і рушійний фактор $P^e = P \cos \alpha$.

$$P \geq \frac{P_{оп}}{(f_p - f_o) \sin \alpha} - \frac{mg}{\sin \alpha}. \quad (14)$$

Горизонтальну складову рушійної сили знайдемо з виразу:

$$P^e = \frac{P_{оп} \cos \alpha}{(f_p - f_o) \sin \alpha} - \frac{mg \cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{P_{оп}}{(f_p - f_o) \tan \alpha} - \frac{mg}{\tan \alpha}, \quad (15)$$

де $P_{оп} = N(f_p - f_o)$; $N = P \sin \alpha + mg$; f_p і f_o – відповідно коефіцієнт тертя в площинах I–I та II–II.

Енергетичні витрати на переміщення $x_{(к)}$ в одному циклі:

$$E_{оп} = \frac{P_{оп} x_{(к)}}{(f_p - f_o) \tan \alpha} - \frac{mg x_{(к)}}{\tan \alpha}. \quad (16)$$

В дослідженнях динаміки і кінематики переміщень ведучої і веденої мас як приведеної виконано на основі рівняння руху у формі:

$$m_{пр} \ddot{x} = P^e - (F_{т.о.} + P_{оп}) = P \cos \alpha - (F_{т.о.} + P_{оп}), \quad (17)$$

інтегрування якого дозволяє записати:

$$\dot{x} = \left(\frac{P \cos \alpha}{m_{пр}} - \frac{F_{т.о.} + P_{оп}}{m_{пр}} \right) t; \quad x = \left(\frac{P \cos \alpha}{m_{пр}} - \frac{F_{т.о.} + P_{оп}}{m_{пр}} \right) \frac{t^2}{2}. \quad (18)$$

Рівноприскорений рух на першому етапі з кінцевим значенням швидкості $\dot{x}_{(к)}$ завершується накопиченням відповідної кінетичної енергії $T_{кін}$:

$$T_{кін} = \frac{m_{пр}}{2} \left(\frac{P \cos \alpha}{m_{пр}} - \frac{F_{т.о.} + P_{оп}}{m_{пр}} \right)^2 t^2. \quad (19)$$

Останню запропоновано використати в режимі вибігу на другому етапі, на якому величина вибігу $x_{(к)2}$ становить:

$$x_{(к)2} = \dot{x}_{(к)1} t_{(к)2} - \frac{F_{т.о.} + P_{оп}}{2m} t_{(к)2}^2 = \dot{x}_{(к)1} \frac{\dot{x}_{(к)1} m_{пр}}{F_{т.о.}} - \frac{F_{т.о.} + P_{оп}}{2m} \left(\frac{\dot{x}_{(к)1} m_{пр}}{F_{т.о.}} \right)^2. \quad (20)$$

Моделювання генератора сил тертя двосторонньої дії виконано на основі розрахункової схеми по рис. 4, в якій реалізовано відсутність $F_{т.о.}$ і односпрямовані сили тертя F_t в площинах I–I та II–II. При цьому:

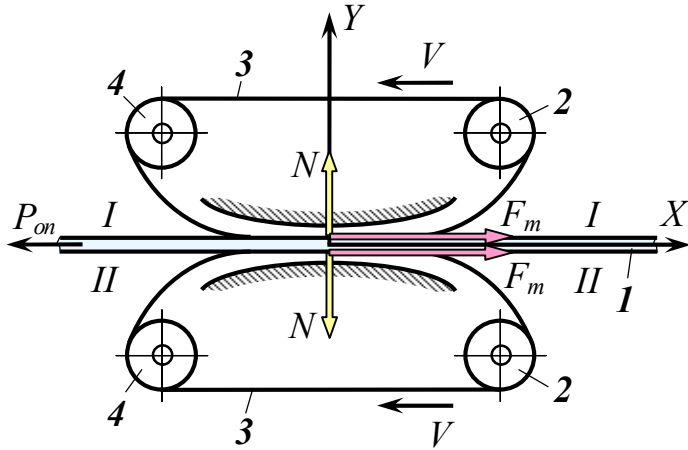


Рис. 4. Схема пристрою для протяжки полотна гнучкого зв'язку: 1 – полотно; 2 – ведучі шків; 3 – паси; 4 – ведені шків

$$2F_T = 2f_p N \quad \text{і} \quad F_T = f_p N;$$

$$2F_T \geq P_{\text{оп}}$$

$$\text{і} \quad m_{\text{пр.2}} \ddot{x}_2 = 2F_T - P_{\text{оп}}, \quad (21)$$

а максимальне динамічне і загальне навантаження складають:

$$P_{\text{дин}} = m_{\text{пр.2}} \ddot{x}_2 = 2F_T - P_{\text{оп}}$$

і

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{дин}} + P_{\text{оп}} = 2F_T. \quad (22)$$

Тоді за початкових умов

першого етапу

$$t_{(n)} = 0; \quad x_{2(n)} = 0; \quad \dot{x}_{2(n)} = 0$$

маємо:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{2F_T - P_{\text{оп}}}{m_{\text{пр.2}}} t; & x_2 &= \frac{2F_T - P_{\text{оп}}}{2m_{\text{пр.2}}} t^2; & t_{(к)}^I &= \sqrt{\frac{2x_{2(к)} m_{\text{пр.2}}}{2F_T - P_{\text{оп}}}}; \\ \dot{x}_{2\text{max}} &= \frac{2F_T - P_{\text{оп}}}{2m_{\text{пр.2}}} \sqrt{\frac{2x_{2(к)} m_{\text{пр.2}}}{2F_T - P_{\text{оп}}}} \end{aligned} \quad (23)$$

а кінетична енергія на момент завершення I-го етапу:

$$E_{\text{кін}} = (2F_T - P_{\text{оп}})^2 \frac{x_{2(к)}}{2F_T - P_{\text{оп}}} = x_{2(к)} (2F_T - P_{\text{оп}}). \quad (24)$$

На другому етапі сили інерції перетворюються в рушійні:

$$\begin{aligned} m_{\text{пр}} \ddot{x} &= -2F_{\text{т.о.}} - P_{\text{оп}}; & t_{(к)}^{\text{II}} &= \frac{\dot{x}_{(к)}^I m_{\text{пр}}}{2F_{\text{т.о.}} + P_{\text{оп}}}; \\ x_{(к)}^{\text{II}} &= x_{(к)}^I \frac{\dot{x}_{(к)}^I m_{\text{пр}}}{2F_{\text{т.о.}} + P_{\text{оп}}} - \frac{F_{\text{т.о.}} + P_{\text{оп}}}{m_{\text{пр}}} \left(\frac{\dot{x}_{(к)}^I m_{\text{пр}}}{2F_{\text{т.о.}} + P_{\text{оп}}} \right)^2. \end{aligned} \quad (25)$$

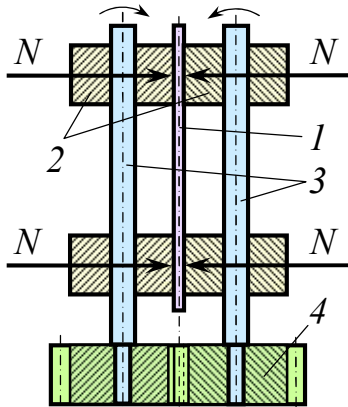


Рис. 5. Схема роликового протяжного пристрою: 1 – протягуване плівкове полотно; 2 – протяжні ролики; 3 – вали; 4 – зубчасті колеса

Для схеми з роликовим протяжним пристроєм (рис. 5) одержано співвідношення параметрів:

$$P_{\text{руш}} = 2(f_p - k/R)N; \quad P_{\text{руш}} = 2n(f_p - k/R)N, \quad (26)$$

де k – коефіцієнт тертя кочення; R – радіус ролика n – число пар роликів.

Тоді

$$\begin{aligned} m_{\text{пр}} \ddot{x} &= 2n(f_p - k/R)N - P_{\text{оп}}; \\ \dot{x}_{\text{max}}^I &= \frac{2n(f_p - k/R)N - P_{\text{оп}}}{m_{\text{пр}}} t_{(к)}^I. \end{aligned} \quad (27)$$

Перехід в моделюванні до двомасових систем здійснено з врахуванням необхідності відображення коливальних процесів, змінних

жорсткостей c і законів руху ведучих мас, ударних навантажень тощо на основі поетапного опису перехідних процесів. Формальні правила перетворень систем диференціальних рівнянь руху ведучих і ведених мас приводять до виду:

$$\ddot{x}_1 + \frac{c}{m_1}(x_1 - x_2) = \frac{P_{руш}}{m_1}; \quad \ddot{x}_2 - \frac{c}{m_2}(x_1 - x_2) = -\frac{P_{оп}}{m_2}. \quad (28)-(29)$$

Перетворення останньої системи приводить до рівняння пружних сил у формі:

$$\ddot{P}_{пр} + \left(\frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2} \right) P_{пр} = c \left(\frac{P_{руш}}{m_1} + \frac{P_{оп}}{m_2} \right), \quad (30)$$

розв'язання якого дозволяє записати:

$$P_{пр} = \frac{c \dot{x}_{I(к)}^{\Pi}}{\omega} \sin \omega t + \left(P_{оп} - \frac{c}{\omega^2} \left(\frac{P_{руш}}{m_1} + \frac{P_{оп}}{m_2} \right) \right) \cos \omega t + \frac{c}{\omega^2} \left(\frac{P_{руш}}{m_1} + \frac{P_{оп}}{m_2} \right), \quad (31)$$

$$\text{де } \omega = \sqrt{\frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2}}.$$

Остання умова дозволяє визначити екстремальне пружне навантаження $P_{пр\text{ екс}}$ для врахування його в умові міцності плівкового полотна:

$$\sigma_p = \frac{P_{пр\text{ екс}}}{F} \leq [\sigma]_p. \quad (32)$$

Змінний характер жорсткостей плівкових полотен відображено графіками на рис. 6 та 7.

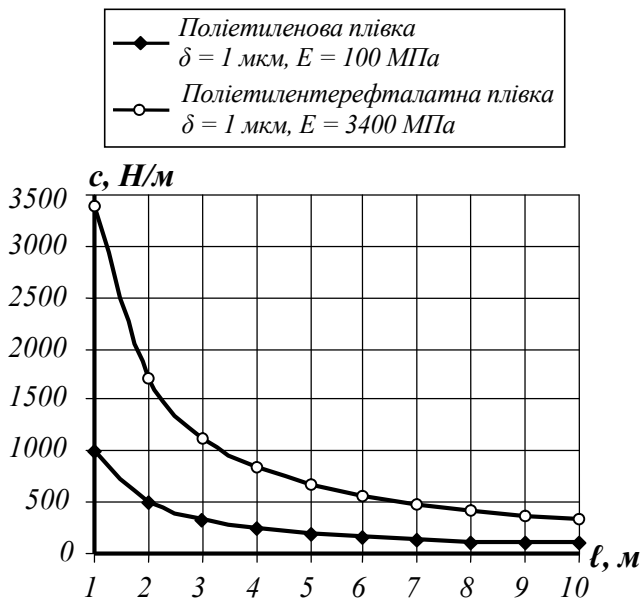


Рис. 6. Залежність жорсткості динамічних систем від довжини гнучкого зв'язку для обмежених значень товщини плівки

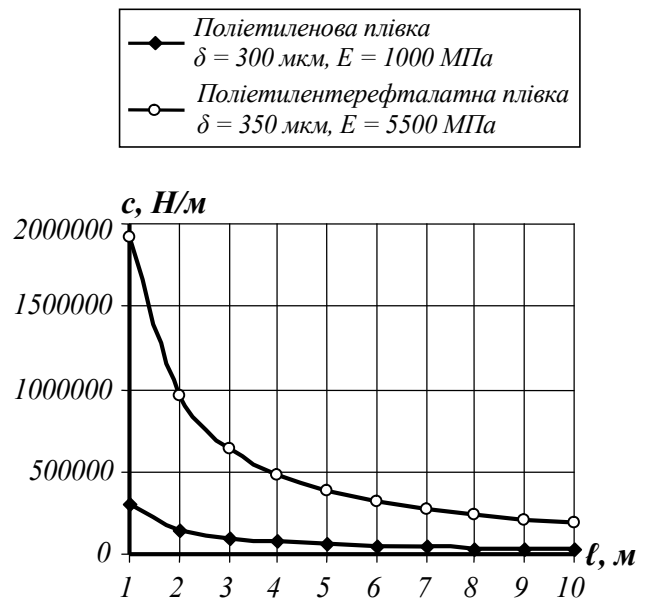


Рис. 7. Залежність жорсткості динамічних систем від довжини гнучкого зв'язку для більших значень товщини плівки

Режим ударного навантаження в двомасовій моделі за умови $\delta_1 = V = \text{const}$ відображується формулою:

$$P_{\text{пр}} = c \left(Vt - Vt + V \sqrt{\frac{m_2}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{P_{\text{оп}}}{c} \right) = V \sqrt{m_2 c} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + P_{\text{оп}}. \quad (33)$$

а максимальне навантаження залежністю:

$$P_{\text{пр. max}} = V \sqrt{m_2 c} + P_{\text{оп}}. \quad (34)$$

Тоді умова міцності має вид:

$$\sigma_p = \frac{V \sqrt{m_2 c} + P_{\text{оп}}}{F} \leq [\sigma]_p. \quad (35)$$

Динаміка енергоощадних приводів стосувалася оцінок циклічного діючого обладнання, розрахункова схема приводу якого зображена на рис. 8. Відповідно до останньої керована фрикційна муфта забезпечує можливість замикання/розмикання кінематичного зв'язку між ведучою і веденою масами з моментами інерції I_1 , I_2 та I_3 . За наведеною схемою ведуча маса знаходиться в неперервному русі, тоді як ведена виконує циклічні переміщення. При цьому зв'язок між ведучою і проміжною масою I_2 не пружний, а фрикційний.

На етапі руху трьох мас маємо рівняння:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \dot{\varphi}_1 t; \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 = M_T - c_k (\varphi_1 - \varphi_2); \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 = c_k (\varphi_1 - \varphi_2) - M_{\text{оп}}. \end{cases} \quad (36)$$

з навантаженням пружного елемента у формі:

$$M_{\text{пр}} = \frac{c_k \dot{\varphi}_{2(k)}}{\sqrt{\frac{c_k}{I_2} + \frac{c_k}{I_3}}} \sin \sqrt{\frac{c_k}{I_2} + \frac{c_k}{I_3}} t + \left[M_{\text{оп}} - \frac{c_k}{\frac{c_k}{I_2} + \frac{c_k}{I_3}} \left(\frac{M_T}{I_2} + \frac{M_{\text{оп}}}{I_3} \right) \right] \times \\ \times \cos \sqrt{\frac{c_k}{I_2} + \frac{c_k}{I_3}} t + \frac{c_k}{\frac{c_k}{I_2} + \frac{c_k}{I_3}} \left(\frac{M_T}{I_2} + \frac{M_{\text{оп}}}{I_3} \right). \quad (37)$$

Розділ 5 стосується геометрії гнучких елементів в транспортних системах ліній пакування. Теоретичні розробки геометрії ланцюгових ліній стосуються абсолютно гнучких і, одночасно, жорстких елементів, підвішених в двох точках під дією сил тяжіння. В більш широкому розумінні ланцюгова лінія відображує лінію рівноваги вагової і розтягнутою нитки. Виконання транспортних систем здійснюється у формі замкнутих контурів конвеєрів, елеваторів, або незамкну-

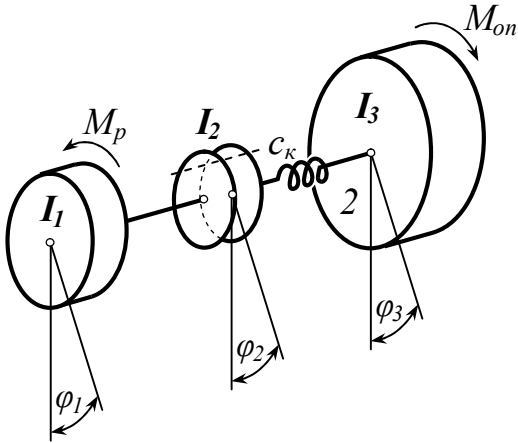


Рис. 8. Схема системи з керованою фрикційною муфтою

тих у випадках транспортування плівкових матеріалів, паперу тощо.

Присутність гнучких елементів означає необхідність використання спеціалізованих елементів для створення відповідної траси у формі нерухомого каркаса, відхиляючих елементів, приводних або не приводних ролюкоопор.

Приведення в дію транспортних систем гнучких елементів здійснюється під впливом гравітаційного поля, що знаходить своє відображення в геометрії, силових проявах, реакціях опор, силах тертя і енерговитратах.

З теорії диференціальних рівнянь ланцюгових ліній відомо, що константи

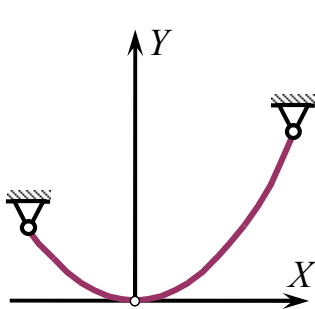


Рис. 9

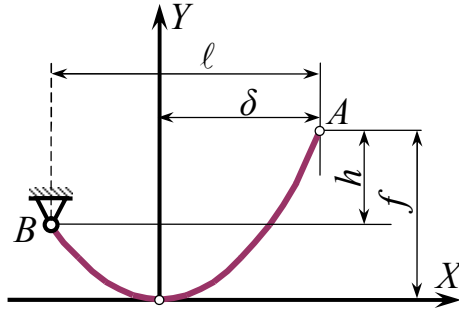


Рис. 10

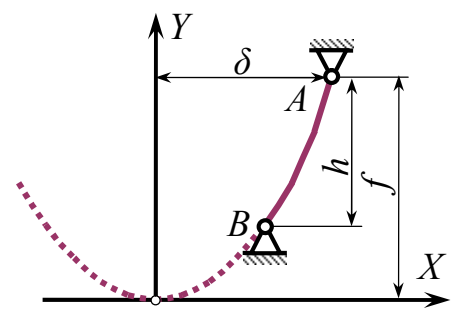


Рис. 11

інтегрування і початкові умови визначаються з врахуванням вибору системи координат. Так за системи координат, що відповідає рис. 9, коли вісь Y проходить через екстремум ланцюгової лінії, дотична до якої збігається з віссю X, маємо умову:

$$y = a \operatorname{ch} \frac{x}{a} + C_2. \quad (38)$$

З врахуванням того, що ланцюгова лінія проходить через центр координат, тобто $x = 0, y = 0$, маємо: $C_2 = -a$ і остання умова набуває канонічної форми:

$$y = a \left(\operatorname{ch} \frac{x}{a} - 1 \right). \quad (39)$$

В технічних пропозиціях, звичайно, задається взаємне розташування точок защемлення A та B і перевищення h (рис. 10 та 11), довжина s ланцюгової лінії і положення центру координат відносно точок защемлення.

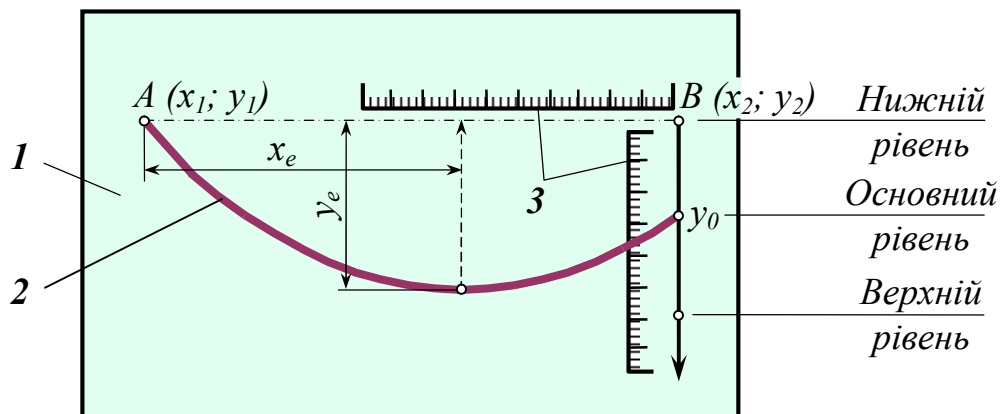


Рис. 12. Інформаційна схема експериментального стенда

Інформація щодо координат екстремумів ланцюгових ліній дозволяє продовжити розрахунки по визначенню натягів гнучких елементів.

У зв'язку з цим заплановано і виконано експериментальне дослідження по визначенню вказаних координат в залежності від координат x_2 та y_2 точки защемлення В підвіски за незмінних координат x_1 та y_1 точки А (рис. 12).

До числа факторів впливу віднесено довжину гнучкого елемента. Експериментальний стенд виконано на планшеті 1 з точками защемлення А та В гнучкого елемента 2 і елементами 3 відліку змінних координат x_2 та y_2 і координат екстремумів x_e та y_e . Експерименти виконувалися як дворівневі трифакторні. Результати у формі рівнянь регресії для натуральних змінних представлені умовами:

$$x_e = 2,4743x_2 - 1,335L - 9,039y_2 + 0,002x_2L + 0,0145x_2y_2 + 0,006Ly_2 - 0,9 \cdot 10^{-5}x_2Ly_2 + 2008,14; \quad (40)$$

$$y_e = 2,0829x_2 + 1,69L + 7,61y_2 - 0,002x_2L - 0,01015x_2y_2 - 0,005Ly_2 + 0,7 \cdot 10^{-5}x_2Ly_2 - 1689,4. \quad (41)$$

Теоретичні розробки дисертації доповнені рекомендаціями щодо впровадження на рівні двох патентів України на корисні моделі № 119423 та № 119425 з продовженням їх розгляду на рівні винаходів.

Разом з тим в пристроях генерування сил тертя, відображених в дисертаційному дослідженні і в літературних джерелах, використовувалися такі окремі фактори впливу, як сили стискання, коефіцієнти тертя, кути охоплення, приведені коефіцієнти тертя.

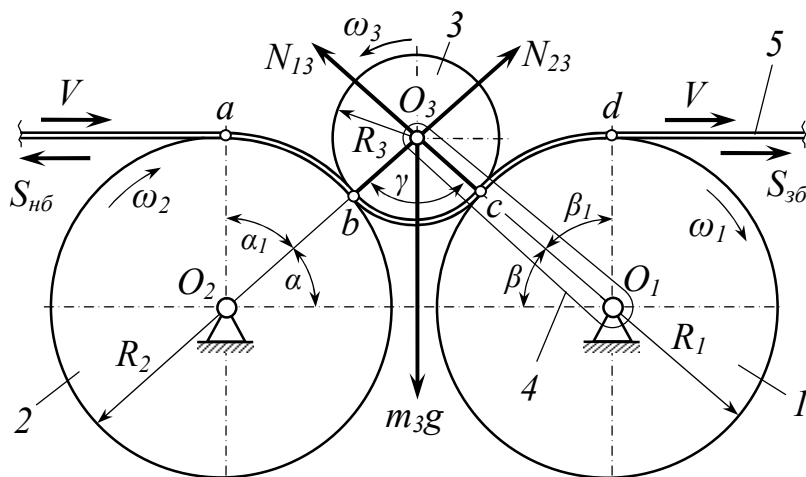


Рис. 13. Схема генератора сил тертя з автоматичним регулюванням стискання.

1 і 2 - опорні ролики, 3-проміжний ролик, 4- коромисло, 5-плівкове полотно

Плівкове полотно 5 протягується через зони контактування a-b, b-c і c-d. Цим поверхням з їх кутами охоплення відповідають результуючі сил тертя. Окрім того лініям контактування роликів і плівки, що проходять через точки b і c відповідають нормальні реакції N_{12} і N_{23} з відповідними силами тертя на внутрішній та зовнішній поверхнях плівки.

В схемі пристрою для генерування рушійних сил тертя запропоновано до використання всі названі вище фактори впливу, які мають прояв у семи зонах генерування сил тертя (рис. 13). Плівкове

полотно 5 протягується через зони контактування a-b, b-c і c-d. Цим поверхням з їх кутами охоплення відповідають результуючі сил тертя. Окрім того лініям контактування роликів і плівки, що проходять через точки b і c відповідають нормальні реакції N_{12} і N_{23} з відповідними силами тертя на внутрішній та зовнішній поверхнях плівки.

ВИСНОВКИ

Виконане дисертаційне дослідження особливостей взаємодій потоків пакувальних матеріалів з робочими органами технологічних машин дозволило сформулювати наступні висновки.

1. Проведено критичну оцінку тенденцій розвитку завершальних стадій виробництв харчових продуктів, фасованих у гнучкі упаковки. Прояви неізотропності матеріалів за показниками коефіцієнтів тертя виявлені на рівнях, які вказують на необхідність їх врахування при вирішенні задач синтезу систем. Експериментальні дослідження показали присутність впливу температур на сили тертя і розрахункові значення коефіцієнтів тертя за значень температур пластифікації полімерних матеріалів. Названі впливи різні для різних матеріалів.

2. Розроблено аналітичну формалізацію впливів нестабільних значень моментів інерції системи "рулоноутримувач – рулон" на динаміку і час перебігу перехідних процесів розмотування плівки. Ускладнюючим фактором перехідних процесів визначено змінні значення моментів інерції рулоноутримувачів з бобінами. В реальних об'єктах останні змінюються на порядок і більше, що обмежує використання загальних технічних прийомів для удосконалення системи. Обґрунтовано можливість створення стабілізатора моменту інерції системи "рулоноутримувач – рулон".

3. Показано перспективу рекуперації кінетичної енергії і обмеження нерівномірності ходу приводів машин.

4. Розроблено методи теоретичних і експериментальних досліджень обладнання систем для переміщень плівкових рулонних пакувальних матеріалів.

5. Розроблено аналітичні моделі і пропозиції щодо створення технічних можливостей підвищення факторів тертя як рушійних в системах протягування плівкових матеріалів з оцінкою їх характеристик. Можливості технічних впливів стосуються підбору матеріалів пари тертя, їх фрикційних властивостей, режимів тертя, стану поверхонь контактування, рівня силових взаємодій. Названі параметри і характеристики стосуються узагальнень у формі коефіцієнтів тертя і нормальних реакцій в площинах контактування. Напрямок можливостей збільшення тертя в кінематичних парах стосується геометричних зв'язків у формі кутів охоплення гнучкими елементами ведучих або ведених шківів, барабанів, роликів тощо або до технічного переходу до тертя в жолобах. В останньому випадку досягаються можливості регульованих впливів за рахунок приведених коефіцієнтів тертя.

6. Розроблено математичні формалізації тертя в системах циклічної дії, кінематики і динаміки силових взаємодій. Системи з односпрямованими генерованими силами тертя в двох площинах за рахунок взаємодії з синхронізованими в обертальному русі роликами представлені складовими тертя ковзання і кочення. Тертя кочення в такій системі виступає в ролі шкідливого опору. Відмінності значень і напрямків сил тертя можуть супроводжуватися присутністю в плівкових матеріалах внутрішньої пластичної деформації, залишкової деформації або наявності проковзування. На основі умов статичної рівноваги одержано розрахункові умови щодо співвідношень між зовнішніми силовими діями в си-

стемах транспортування плівкових матеріалів, генерованими силами тертя, геометричними і динамічними параметрами стосовно режимів усталеного руху з визначенням енергетичних витрат.

7. Створено аналітичні моделі систем рекуперації кінетичної енергії.

8. Розроблено математичні формалізації геометрії і навантажень гнучких елементів в системах переміщень плівкових матеріалів. В системах з гнучким зв'язком плівкового матеріалу контрольованим є режим вибігу ведучої маси, а вибіг веденої може бути контрольованим за умови, що прискорення гальмуванням її за модулем більше за модуль прискорення вибігу ведучої. В іншому разі пружний зв'язок між робочим органом і веденою масою втрачається і виникає необхідність застосування компенсатора-регулятора. Вплив гравітаційного поля відображується геометрією гнучких плівкових матеріалів, реакціями взаємодій і енергетичними витратами на організацію переміщення. Показано можливість застосування теорії диференціальних рівнянь ланцюгових ліній в моделюванні геометрії і силових параметрів гнучких зв'язків на основі плівкових пакувальних матеріалів.

9. Виконано експериментальну апробацію теоретичних досліджень і сформульовано пропозиції щодо впровадження результатів розробок. Виконані експериментальні дослідження, результатом яких було одержання рівнянь регресій, розширили діапазон застосування існуючої теорії диференціальних рівнянь ланцюгових ліній в розрахунках систем переміщення плівкових пакувальних матеріалів.

10. Результати теоретичних розробок і сформульовані в них інноваційні пропозиції знайшли використання на підприємствах ТОВ "Санвіта Груп" (м. Івано-Франківськ) та підприємства ТОВ «Сучасні торгівельні технології» ГК «Верес» (м. Канів). Встановлено, що зменшення частоти відмов системи подавання рулонних пакувальних матеріалів та формування рукава на 50 % може збільшити ефективність роботи обладнання до 5 %.

ПЕРЕЛІК РОБІТ, ЩО ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Пригодій Д. В. Вплив температури на коефіцієнти тертя в парах "полімерні плівки – сталь" / Д. В. Пригодій, К. В. Васильківський // Харчова промисловість. – № 21. – К.: НУХТ. – 2017. – С. 141-146 (*стаття у фаховому виданні України*).

Особистий внесок дисертанта – сформулював фізичне підґрунтя впливу температури на коефіцієнт тертя і розробив методику досліджень.

2. Соколенко А. І. Регулювання ходу машин / А. І. Соколенко, О. І. Степанець, Д. В. Пригодій // Харчова промисловість. – № 21. – К.: НУХТ. – 2017. – С. 155-163 (*стаття у фаховому виданні України*).

Особистий внесок дисертанта – розробив математичну модель на підтвердження взаємозв'язків між завданням регулювання ходу машин і рекуперацією механічної енергії.

3. Пригодій Д. В. Фактори тертя в обладнанні ліній пакування / Д. В. При-

годій, К. В. Васильківський, А. В. Дем'яненко // Харчова промисловість. – № 22. – К. : НУХТ, 2017. – С. 119. (*стаття у фаховому виданні України*).

Особистий внесок дисертанта – розробив математичну модель впливу геометричних параметрів систем на кути охоплення гнучкими зв'язками приводних елементів.

4. Sokolenko A. Effect of temperature on the coefficient of friction in pairs "polymer film - steel" / A.Sokolenko, D. Prygodiy, K. Vasilkovskiy // Journal of food and packaging. Science, technique and technologies. – Year VI. – № 12. – Bulgaria : National Academy of Paskaging, 2017. – P. 22-26) (*стаття у закордонному виданні*).

Особистий внесок дисертанта – запропонував математичну базу стосовно температурних впливів на коефіцієнти тертя.

5. Степанець О. І. Динаміка і енергетична рекуперація в технологічних машинах / О. І. Степанець, Д. В. Пригодій, Н. А. Ткачук // Наукові праці НУХТ. – Том 23. – № 5. – Ч. 2. – К. : НУХТ, 2017. – С. 26-32 (*стаття у фаховому виданні України*).

Особистий внесок дисертанта – склав умови можливостей рекуперативного повернення кінетичної енергії в механічних системах.

Тези доповідей на науково-технічних конференціях:

6. Пригодій Д. В. Розробка машини для пакування шоколадних батончиків в упаковку типу "флоу-пак" продуктивністю 180 штук за хвилину / Д. В. Пригодій, М. А. Масло // Тези доповідей XIV Міжнародної студентської науково-практичної конференції з проблем пакувальної індустрії. Додаток до журналу "Упаковка". – К. : НУХТ, 12 листопада 2013 р. – С. 28-29.

Особистий внесок дисертанта – запропонував технологічну схему машини для пакування шоколадних батончиків в удавку типу "флоу-пак".

7. Пригодій Д. В. Дослідження параметрів технологічних операцій подачі рулонних таропакувальних матеріалів та формоутворення упаковки / Д. В. Пригодій, М. А. Масло // Тези доповідей. XV Міжнародної студентської науково-практичної конференції з проблем пакувальної індустрії. Додаток до журналу "Упаковка". – К. : НУХТ, 11 листопада 2014 р. – С. 24-28.

Особистий внесок дисертанта – обґрунтував напрямки дослідження параметрів технологічних операцій в системах з рулонними таропакувальними матеріалами.

8. Пригодій Д. В. Вплив коефіцієнта тертя пакувальних матеріалів на технологічні процеси формування упаковки / Д. В. Пригодій, А. І. Соколенко // Новітні технології пакування: матеріали доповідей XI науково-практичної конференції молодих вчених в рамках заходів виставки "Пак Експо 2015". Додаток до журналу "Упаковка". – К. : 01-03.04.2015. – С. 34-35.

Особистий внесок дисертанта – визначив діапазони числових значень коефіцієнтів тертя в технологічних процесах формування упаковки.

9. Пригодій Д. В. Вплив фізико-механічних властивостей пакувальних матеріалів на технологічні процеси пакування / Д. В. Пригодій, А. І. Соколенко, К. В. Васильківський // Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності: матеріали V Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції. – К. : 14 вере-

сня 2016 р. – С. 169-171.

Особистий внесок дисертанта – розробив методику розрахунків умов міцності пакувальних матеріалів.

10. Степанець О. І. Динаміка і енергетична рекуперація в технологічних машинах / О. І. Степанець, Д. В. Пригодій, С. А. Бут // Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності: матеріали VI Міжнародної спеціалізованої науково-практичної конференції. – К. : 12 вересня 2017. – С. 109-111.

Особистий внесок дисертанта – запропонував математичну модель умов забезпечення рекуперації кінетичної енергії в технологічних машинах.

Патенти України

11. Патент 119423 UA, B65B 43/00 (2006) Рукавоутворювач / Пригодій Д. В., Васильківський К. В., Соколенко А. І. ; заявник Національний університет харчових технологій. – № u201703283; заявл. 06.04.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18, 2017 р.

Особистий внесок дисертанта – запропонував до використання роликів вузол.

12. Патент 119425 UA, B65B 9/00 (2006) Рукавоутворювач / Пригодій Д. В., Васильківський К. В., Соколенко А. І. ; заявник Національний університет харчових технологій. – № u201703286; заявл. 06.04.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18, 2017 р.

Особистий внесок дисертанта – запропонував до використання комбінації жолобів і повітряних форсунок.

АНОТАЦІЯ

Пригодій Д. В. Удосконалення теорії динаміки і обладнання систем транспортування плівкових матеріалів в лініях пакування харчової продукції: – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв (технічні науки). Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України. Київ, 2018.

В дисертації наведено аналіз особливостей систем транспортування гнучких пакувальних матеріалів, динаміки перехідних процесів, методів дослідження, що стосуються переміщень рулонних матеріалів, характеристик тертя в технологічному обладнанні та вузлах ліній пакування, особливостей навантажень в системах циклічної дії з гнучкими елементами.

Особливості тертя і співвідношення між рушійними параметрами та факторами опору оцінювалися на основі класичних положень математичної теорії тертя з пошуками можливостей збільшення і обмеження силових показників останньої.

Показано, що сучасна теоретична база синтезу технологічних машин на основі використання плівкових рулонних матеріалів поєднує можливості врахування технологічних та економічних вимог, показників високої продуктивності, умов сусідства, обмеження силових і енергетичних параметрів.

Теоретичні і експериментальні розробки доповнені актами їх впровадження у виробництво та в учбовий процес.

Ключові слова: динаміка, плівкові матеріали, пакування, транспортування, тертя, моменти інерції, закони Амонтона, ланцюгова лінія.

ANNOTATION

Pryhodii D. V. Improvement of the theory of dynamics and equipment of systems of transportation of film materials in the lines of food products packaging— Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences after specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions. National university of food technologies of Department of education and science of Ukraine, Kiev, 2018.

In the dissertation the analysis of the features of the systems of transportation of flexible packaging materials, dynamics of transients, methods of research concerning displacements of roll materials, friction characteristics in technological equipment and nodes of packing lines, peculiarities of loads in systems of cyclic action with flexible elements is given.

The features of friction and the relationship between driving parameters and resistance factors were evaluated on the basis of the classical provisions of the mathematical theory of friction with the search for possibilities of increasing and limiting the power indicators of the latter.

It is shown that the modern theoretical basis for the synthesis of technological machines on the basis of the use of film roll materials combines the possibility of taking into account technological and economic requirements, indicators of high productivity, conditions of neighborhood, limitation of power and energy parameters. Among the positive directions of creating effective systems are synchronized combination of operations, the use of optimal laws for the movement of workers, and so on. The prospects of using parallel streams for increasing productivity and using the runoff regimes for energy recovery are shown.

Application of friction working organs prevails in the systems of moving of pellicle materials. Prime price of container in machines with the complete cycle of her making, packing, sealing-in and dating less comparatively with cases the use of the prepared packing. Power charges in the systems of moving of pellicle, roll packing materials are related to work of motive forces against a friction and on creation of streams of kinetic energy of the movable masses.

In the machines of horizontal orientation the cyclic loading from attractive powers are absent. By an important review on existence of the gravitational field outside transferring there is an unevenness of motion of technological machines to the horizontal planes. Being in the lines of moving of pellicle materials of compensative-depreciation devices results in their dividing practically into two dynamically independent parts. It is determined that the ratio of the runoff time of film rolls of a variable mass is determined by the ratio of the squares of their initial and final radii, and the solution of the problems of recovery of kinetic energy is connected with the re-

strictions of unevenness of the drives of cars.

On the basis of the analysis of the construction of technological machines, mathematical formalization of transient processes with the achievement of regenerative energy regimes consisting of two effects on the basis of non-overlapping stages of acceleration of working bodies and in connection with the transfer of forces of inertia to the role of driving forces was proposed. The direction of the possibility of increasing friction in kinematic pairs relates to the geometry of bonds in the form of angles of coverage by flexible elements of the conducting and/or leading components of the system or the technical transition to friction in the gutters. It is shown that the Euler's regularities in the ratio of tensions at the points of intersection and coincidence of the flexible elements are a specific reflection of the first friction law.

The mathematical formalizations concerning the relations of force factors in the systems of transportation of loads of cyclic action on the levels of external force actions, generated frictional forces, geometric, kinematic and dynamic parameters are obtained. The mathematical models concerning the modes of runoff and evaluation of stiffness of elastic bonds on the basis of film materials, the method of estimating the parameters of systems with partial recovery of kinetic energy are proposed. Methods of calculation of geometry and power parameters are developed on the basis of the theory of differential equations of chain lines.

At the level of patents, the designs of the units are proposed for limiting the friction forces and for the generation of frictional forces in the systems of rolling flexible packaging materials. Theoretical and experimental developments are supplemented with the acts of their implementation in production and in the educational process.

Keywords: *dynamics, film materials, packaging, transportation, friction, moments of inertia, Amonton's laws, chain line.*