

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ХВАСТА МИРОСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ 

УДК 621.2.082.18:

621.8.02:621.8.03

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕОРІЇ РОЗРАХУНКІВ ПЕРЕХІДНИХ
ПРОЦЕСІВ В ДИНАМІЦІ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

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 технологій, завідувач кафедри мехатроніки та пакувальної техніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
СУХЕНКО Юрій Григорович, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК

кандидат технічних наук
ЛЕНЗІОН Валентин Йосипович, заступник директора приватного акціонерного товариства "Столичний завод шампанських вин"

Захист відбудеться " ____ " _____ 2018 р. о _____ 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 у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий " ____ " _____ 2018 р.

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



Літвинчук С. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Зниження питомих матеріальних і енергетичних витрат, пов'язаних з трансформаціями матеріальних потоків в харчових технологіях, підвищення конкурентоздатності продукції вітчизняних виробників, обмеження рівня енергетичної залежності галузей харчової промисловості і української держави від імпортерів енергетичних носіїв є невідкладним завданням, одним з важливих напрямків виконання якого визначено логістичні підходи в організації взаємодій виробничих потоків.

Аналіз сучасного стану в забезпеченні транспортних і технологічних механічних операцій вказує на існування резервів, використання яких може вплинути на ефективність їх перебігу.

Мета і завдання досліджень. Метою досліджень визначено розвиток теоретичної бази, яка стосується взаємозв'язків матеріальних і енергетичних потоків в ТТС харчових виробництв та розробка пропозицій щодо обмеження питомих матеріальних і енергетичних витрат на виробництво одиниці продукції.

За результатами аналізу сформульовано наступні **завдання**:

1. Розробити методики досліджень взаємозв'язків між матеріальними, енергетичними і інформаційними параметрами потоків транспортно-технологічних систем харчових виробництв.
2. Визначити взаємозв'язки між матеріальними і енергетичними потоками в системах транспортування вантажів з жорсткими і пружними зв'язками.
3. Дослідити динаміку і енергетичне забезпечення в перехідних процесах.
4. Розробити теоретичні положення динаміки переміщення вантажів і визначити параметри їх енергетичного забезпечення у пристроях для формування масивів виробів.
5. Розвинути теоретичну базу гравітаційних накопичувальних пристроїв на основі енергетичних балансів.
6. Розробити пропозиції щодо удосконалення апаратурного і машинного оформлення транспортно-технологічних систем харчових виробництв.

Об'єктом досліджень є обладнання та окремі елементи транспортно-технологічних систем.

Предметом досліджень є динаміка приводів машин та механізмів.

Методи досліджень включають в себе фізичний аналіз процесів, аналітичне їх моделювання і аналіз математичних моделей, енергетичну оцінку процесів взаємодії вантажів і робочих органів, пошуки можливостей мінімізації енергетичних витрат і використання потенціальних енергоресурсів систем.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі виконаних теоретичних досліджень підтверджена доцільність логістичного поєднання опису і моделювання операцій мікро- і макрорівнів:

- показано, що частка роботи рушійної сили, задіяної в переміщеннях вантажів і пов'язаної з подоланням сил інерції, еквівалентна кінетичній енергії рухомої маси.
- складено аналітичні моделі перехідних процесів динаміки переміщен-

ня вантажів.

- встановлено, що у випадках прискореного руху вантажів на вертикальних ділянках співвідношення між кінетичною енергією рухомої маси і роботою рушійної проти сил тяжіння визначається співвідношенням прискорення заданого закону до прискорення вільного падіння.
- уточнено положення про можливість визначення миттєвих потужностей в пружних системах на основі пружних сил і миттєвих швидкостей руху ведених мас.
- показано, що в перехідних процесах пуску величини потужностей, що розвиваються рушійними силами, залежать від законів руху і часу перебігу процесів, однак енергетичні витрати за цей період стабілізованого значення кінцевої швидкості залишаються сталими.
- розроблено математичні моделі взаємодії вантажів з комбінаціями рухомих і нерухомих опорних площин.
- показано, що швидкість руху опорної площини оцінюється як варіативний фактор впливу на кінематику і динаміку процесу.
- визначено, що робота проти сил тертя в гравітаційному опускному пристрої не залежить від форми площини спуску. Одержані енергетичні співвідношення дозволяють виконувати розрахунки криволінійних спусків.

Особистий внесок здобувача полягає у критичному аналізі матеріалів, що стосуються особливостей взаємодії матеріальних і енергетичних потоків, опису перехідних процесів, трансформацій енергетичних потоків, формулюванні задач досліджень з логістичною оцінкою досліджуваних транспортно-технологічних систем та напрямків їх розв'язання, розробці математичних моделей, що стосуються кінематики і динаміки переміщення вантажів, створенні лабораторної установки та проведенні експериментальних досліджень, обробці їх результатів, розробці рекомендацій по впровадженню результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи доповідалися на 76-й (12-13 квітня 2010 р.), 77-й (11-12 квітня 2011 р.), 78-й (2-3 квітня 2012 р.) та 79-й (15-16 квітня 2013 р.) наукових конференціях молодих учених, аспірантів і студентів, міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи» (27-28 вересня 2010 р.), на міжкафедральних та кафедральних наукових семінарах (2005-2015 рр.), що відображено в звітах роботи кафедри технічної механіки і пакувальної техніки і звітах пошукача.

Робота виконувалася на кафедрі мехатроніки та пакувальної техніки Національного університету харчових технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота за своєю тематикою відповідає Програмі Кабінету Міністрів України «Україна 2010» (проект 4 – «Технологічне та технічне оновлення виробництва»), науково-технічній програмі «Розвиток енергетики та енергозбереження в харчовій промисловості України до 2010 р.», закону України «Про енергозбереження», указу Президента України від 16.06.99 № 662 «Про заходи щодо ско-

рочення енергоспоживання бюджетними установами, організаціями та казенними підприємствами», указу Президента України від 10 березня 2000 р. № 457/2000 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14 лютого 2000 р.» і виконувалася у відповідності з пріоритетним напрямком робіт Національного університету харчових технологій «Розроблення наукових основ тепломасообмінних та інших процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв з метою створення високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації», договором № ДЗ/369-2007 «Розроблення технології глибокої екстракції речовин підвищеної біологічної цінності на основі вакуумних технологій для харчової промисловості» (Міністерство освіти і науки України, 2007 р., державний реєстраційний номер 0107U006803).

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень реалізовані за такими напрямками.

Розроблена методика розрахунків жорстких систем для переміщення вантажів з симетричними синусоїдальними, косинусоїдальними та іншими симетричними законами з компенсацією енергетичних витрат розгону в режимах вибігу. Показана можливість такої компенсації за рахунок кінематичних зв'язків.

Визначено, що обрані закони руху вантажів в жорстких системах визначають динаміку силової взаємодії між ними і робочими органами. Однак в системах з компенсацією кінетичної енергії в режимах вибігу вибір різних законів на загальну величину енергетичних витрат не впливає.

Розроблено методику вибору параметрів пружних двомасових систем, за яких гарантуються умови невиходу асинхронних електродвигунів за межі стійких частин їх статичних механічних характеристик.

Показано, що ефективним засобом впливу на гідро- та аеродинаміку рідинних або повітряних потоків є використання частотних перетворювачів в системах живлення асинхронних електричних двигунів насосів та вентиляторів.

Розроблено методики розрахунків масопроводів з генеруванням в них масових сил, як факторів інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів.

Запропоновано методики розрахунків кінематики і динаміки взаємодії між вантажами і опорними рухомими, нерухомими площинами та їх комбінаціями.

На основі енергетичних співвідношень розвинуто методики розрахунків гравітаційних опускних пристроїв різної геометрії.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 друкованих праць, у тому числі 6 статей у фахових виданнях, 5 тез доповідей на наукових та науково-технічних конференціях, 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних літературних джерел із 127 найменувань і 17 додатків. Основний зміст роботи викладений на 120 сторінках машинописного тексту. Дисертація містить 37 рисунків та 7 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована доцільність і актуальність дисертаційної роботи. Відмічено важливість пошуків у організації взаємодій між матеріальними і ене-

ргетичними потоками, обмеженні питомих енергетичних витрат в системах транспортування вантажів з врахуванням кінематики і динаміки їх переміщень.

У розділі 1 виконано огляд і аналіз, що стосується взаємодій матеріальних і енергетичних потоків в харчових технологіях, особливостей енергозабезпечення процесів переміщення вантажів.

Розділ 2 присвячений опису методики проведення теоретичних досліджень, вибору фізичного підґрунтя і припущень, що покладаються в основу фізичних і математичних моделей, результатам експериментальної перевірки останніх.

Аналітичне моделювання статички, кінематики, динаміки і процесів енергообміну ґрунтувалося на положеннях класичної механіки, законах Ньютона, принципах можливих переміщень, Д'Аламбера, законах збереження в їх безпосередньому застосуванні. Останнє застереження пов'язане з тим, що більшість положень класичної механіки, законів і принципів мають у своїй основі закон збереження енергії.

Алгоритмом виконання цього дослідження передбачалося узагальнення теорії ТТС харчових виробництв в поєднанні матеріальних і енергетичних потоків. Подібні узагальнення розглядалися на різних рівнях систем і основним завданням мали визначення структури і величин енергетичних потоків в забезпеченні існування і трансформацій матеріальних потоків.

У відповідності до нормативної структури наукових праць перший розділ присвячено аналізу сучасних поглядів і досягнень у створенні логістично влаштованих систем виробництва продуктів харчування, і зорієнтовано на загальну оцінку положень, які стосуються систем виробництва з наголосом на влаштування їх транспортно-технологічних систем.

Враховуючи достатньо високий рівень технічного забезпечення організації вхідних матеріальних і енергетичних потоків, можливо прийти до висновку про практичну завершеність діяльності підприємств. Однак поглиблений аналіз рівнів нижчої ієрархії приводить до висновку про існування недоліків в показниках питомих матеріальних і енергетичних витрат, забезпеченні стабілізації якісних показників, виборі матеріалів для створення упаковок.

Методики досліджень розділу 3 стосувалися взаємозв'язків між енергетичними і матеріальними потоками в системах транспортування вантажів. Переміщення останніх в дискретних потоках пов'язано з наявністю перехідних процесів і масових сил. У зв'язку з цим в основу їх моделювання покладено принцип Лагранжа-Д'Аламбера, а також припущення про те, що сили тяжіння і сили інерції прикладаються в центрах мас вантажів, результуючі сил тертя з опорними площинами – в геометричних центрах площин контактування. Приймалося, що пружні зв'язки мають обмежені маси і ними нехтували, деформації пружних зв'язків відповідають закону Гука, а залишкові деформації відсутні. Поетапний опис процесів супроводжувався визначенням початкових умов кожного з етапів кінцевими умовами попереднього. Розв'язання рівнянь руху дозволяло визначати кінематичні і силові параметри як в жорстких, так і в пружних системах, що означало можливість визначати миттєві потужності і енергетичні витрати на вказані переміщення.

Узагальнення висновків щодо енергетичних витрат, їх мінімізації або часткового обмеження здійснювалося на основі аналізу різних законів руху ведучих або ведених мас та різних співвідношень між рушійними силами і силами опору.

До числа завдань розділу 4 віднесено розробку теоретичних положень, які стосуються динаміки, формування і розформування масивів виробів циліндричної форми. Важливими складовими останніх є процеси перевантаження виробів з рухомих площин на нерухомі або в більш складних комбінаціях. До числа особливостей скляної і металевої тари віднесено лінійний контакт упаковок з опорними площинами. Ця особливість в описі динаміки приводить до нелінійних моделей і розв'язання відповідних диференціальних рівнянь.

До числа прийнятих припущень відноситься те, що сила тертя визнається незалежною від відносної швидкості переміщення вантажів по опорних площинах. Реалізація такого припущення стосується як нерухомих, так і рухомих опорних площин.

Розділ 3 присвячено дослідженням взаємозв'язків між енергетичними і матеріальними потоками в системах транспортування вантажів.

Для випадків вертикального переміщення вантажів в системах з жорсткими зв'язками закони руху ведених мас визначалися різницею сил рушійних P_p і сил тяжіння mg , де m – маса вантажу; g – прискорення вільного падіння. Рушійна сила за таких переміщень виконує роботу у формі двох складових. Робота по подоланню сил тяжіння A_p визначає рівень потенціальної енергії маси m , а подолання сили інерції за енергетичним показником дорівнює її кінетичній енергії $T_{\text{кін}}$. Тоді за умови $P_p = \text{const}$ сумарні енерговитрати складуть

$$E = A_p + T_{\text{кін}} = g P_p - mg \frac{t^2}{2} + P_p - mg \frac{t^2}{2m}, \quad (1)$$

де t – час перебігу процесу.

При цьому потужність, як миттєва величина, що розвивається рушійною силою, дорівнює:

$$N = P_p \dot{y} = (g + \ddot{y}) P_p - mg \dot{t}, \quad (2)$$

де \dot{y} – перша похідна від координати переміщення.

За умови, що задається величина часу $t_{(к)}$ завершення етапу, визначається величина рушійної сили

$$P_p = \left(h + g \frac{t_{(к)}^2}{2} \right) \frac{2m}{t_{(к)}^2}. \quad (3)$$

Геометрична інтерпретація залежності (3) за значень параметрів $m = 100$ кг; $g = 9,81$ м/с²; $h = y_{\text{max}} = 1$ м; $t_{(к)} = 1; 2; \dots 9; 10$ с наведена на рис. 1.

З точки зору інтересів створення систем обмеженої енергоемності доцільно порівняти співвідношення між кінетичною і потенціальною енергіями. При цьому змінам кінетичної енергії системи відповідають етапи перехідних процесів розгону і вибігу, тоді як потенціальна енергія змінюється на всіх ета-

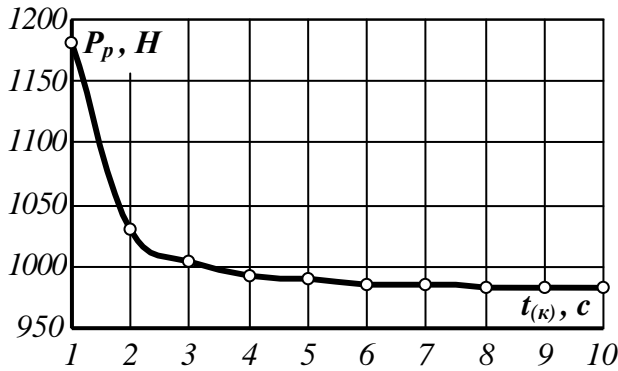


Рис. 1. Залежність величини рушійної сили від кінцевого часу процесу

пах переміщення. Для випадку розгону маємо

$$\frac{T_{\text{кін}}}{A_p} = \frac{m\ddot{y}}{mgy} = \frac{\ddot{y}}{g} \quad (4)$$

і вказане енергетичне співвідношення визначається відношенням прискорень.

Для випадку лінійної зміни прискорення $\ddot{y} = kt$, де k – швидкість зміни прискорення, м/с^3 , маємо залежності:

$$P_p t = m kt + g ; \quad (5) \quad T_{\text{кін}} = m kt y = m kt k \frac{t^3}{6} ; \quad (6) \quad A_p = mgk \frac{t^3}{6}. \quad (7)$$

Тоді розшукуване співвідношення

$$\frac{T_{\text{кін}}}{A_p} = \frac{m kt kt^3}{mgkt^3} = \frac{kt}{g}. \quad (8)$$

Аналогічним чином щодо синусоїдального закону

$$\ddot{y} = A_0 \omega^2 \sin \omega t ; \quad (9) \quad \frac{T_{\text{кін}}}{A_p} = \frac{A_0 \omega^2 \sin \omega t}{g}, \quad (10)$$

де $A_0 \omega^2$ – амплітуда зміни прискорення.

Звідси витікає, що раніше зроблений висновок щодо співвідношень $T_{\text{кін}}$ і A_p відповідає й іншим законам руху.

Повний цикл переміщення від початку розгону вантажу до зупинки може бути представлений синусоїдальним законом:

$$\ddot{y} = A_0 \sin \frac{2\pi}{T} t ; \quad (11) \quad \dot{y} = \frac{h}{T} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) ; \quad (12) \quad y = h \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{T} t \right), \quad (13)$$

де T – повний час циклу.

При цьому виконанню умови (11) має відповідати рівняння:

$$m \left(A_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \right) = P_p t - mg. \quad (14)$$

Після відповідних перетворень одержуємо:

$$A_0 = \frac{2\pi h}{T^2} ; \quad (15) \quad T_{\text{кін}} = m \frac{\dot{y}^2}{2} = m \frac{h^2}{2T^2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right)^2 ; \quad (16)$$

$$P_p = m \left(\frac{2\pi h}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T} t + g \right). \quad (17)$$

Аналогічно для косинусоїдального закону зміни прискорення (рис. 2) одержуємо:

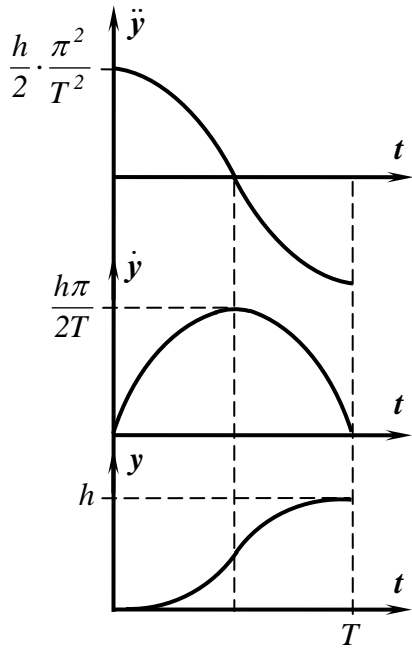


Рис. 2. Кінематичні закони переміщення вантажу з косинусоїдальним прискоренням

$$y = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T} t \right); \quad (18)$$

$$\dot{y} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\pi}{T} \sin \frac{\pi}{T} t; \quad (19)$$

$$\ddot{y} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\pi^2}{T^2} \cos \frac{\pi}{T} t; \quad (20)$$

$$P_p t = m \left(\left(\frac{h}{2} \cdot \frac{\pi^2}{T^2} \cos \frac{\pi}{T} t \right) + g \right). \quad (21)$$

Плинна кінетична енергія визначається залежністю

$$T_{\text{кін}} = m \frac{h^2 \pi^2}{8T^2} \sin^2 \frac{\pi}{T} t. \quad (22)$$

Реалізація синусоїдального і косинусоїдального законів можлива за рахунок їх кінематичного забезпечення або за рахунок відтворення законів $P_p = P_p t$.

Співвідношення параметрів в пружних системах (рис. 3). Щодо найбільш вразливих є режими ударних навантажень в пружних системах, для яких маємо співвідношення параметрів:

$$y_1 = Vt; \quad (23)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 = c y_1 - y_2 - mg. \quad (24)$$

За початкових умов $t_{\text{п}} = 0; y_{\text{п}2} = -mg/c; \dot{y}_{\text{п}2} = 0$, одержуємо:

$$P_{\text{пр}} = m_2 g + V \sqrt{m_2 c} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t; \quad (25)$$

$$T_{\text{кін}} = \frac{m}{2} \dot{y}_2^2 = \frac{m}{2} \left(V - V \sqrt{\frac{c}{m_2}} t \right)^2, \quad (26)$$

а робота рушійної сили і відповідно плинна потужність відображуються умовами:

$$A_p = P_{\text{пр}} y_2 = \left(m_2 g + V \sqrt{m_2 c} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t \right) \left(Vt - \frac{m_2 g}{c} - V \sqrt{\frac{m_2}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t \right); \quad (27)$$

$$N = P_{\text{пр}} \dot{y}_2 = \left(m_2 g + V \sqrt{m_2 c} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t \right) \left(V - V \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t \right). \quad (28)$$

З точки зору інтересів забезпечення стійкої роботи асинхронних двигунів у складі приводів технологічних машин необхідним є виконання умови $M_0 < M_m$,

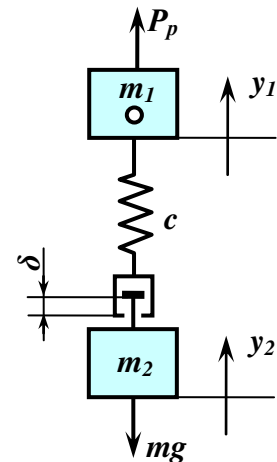


Рис. 3. Розрахункова схема двомасової моделі

де M_0 – приведений до валу двигуна момент сил опору; M_m – максимальний момент, що розвивається двигуном.

Очевидно, що величина M_0 в умовах динамічного навантаження визначається через величину пружної сили, яка є сумою статичної складової m_2g і динамічної – $V\sqrt{m_2c} \sin \sqrt{c/m_2} t$. При цьому

$$\psi = \frac{m_2 g}{V\sqrt{m_2 c}}, \quad (29)$$

а феноменологічні міркування приводять до висновку про те, що співвідношенню (30) має відповідати співвідношення номінального M_H і максимального M_m моментів, що розвиваються двигуном.

$$\text{Звідси витікає, що} \quad P_{\text{дин max}} < \frac{M_m P_{\text{ст}}}{M_H}. \quad (30)$$

Виконання останньої умови досягається за рахунок обмеження стабілізованої швидкості руху ведучої маси

$$V \leq \frac{g}{\psi} \sqrt{\frac{m_2}{c}} \quad (31)$$

або за рахунок маси m_2 та жорсткості c .

Системи з заданими законами руху ведучих мас є розповсюдженими, а їх реалізація є цілком досяжною за використання кулачкових механізмів. Синусоїдальні закони руху, а за відсутності фазових кутів вистойів і косинусоїдальні відносяться до безударних. Так за косинусоїдального закону маємо (рис. 4)

$$x_1 = R(1 - \cos \omega t), \quad (32)$$

де R – геометричний параметр кулачка.

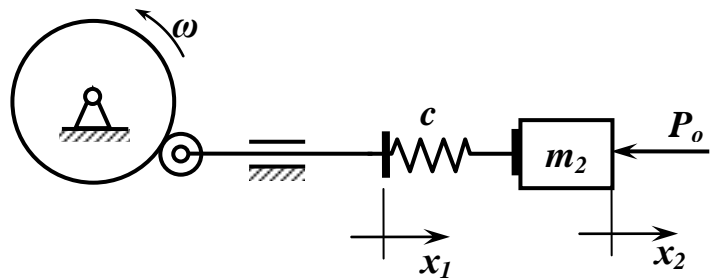


Рис. 4. Схема до двомасової моделі системи

Тоді рівняння руху веденої маси і його розв'язання приводяться до форми:

$$\ddot{x}_2 + \frac{c}{m_2} x_2 = \frac{cR}{m_2} (1 - \cos \omega t) - \frac{P_o}{m_2} \quad (33)$$

і за початкових умов $t_{\text{п}} = 0$; $x_{2 \text{ п}} = -P_o/c$; $\dot{x}_{2 \text{ п}} = 0$ маємо:

$$x_2 = \frac{cR}{c - m_2 \omega^2} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + R \left(1 - \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t \right) - \frac{R c \cos \omega t}{c - m_2 \omega^2} - \frac{P_o}{c}; \quad (34)$$

$$\dot{x}_2 = R \sqrt{\frac{c}{m_2}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t - \frac{R c \sqrt{\frac{c}{m_2}}}{c - m_2 \omega^2} \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t + \frac{R c \sin \omega t}{c - m_2 \omega^2}; \quad (35)$$

$$P_{\text{пр}} = c \left(1 - x_2 \right) \frac{R m_2 \omega^2}{1 - (m_2 \omega^2 / c)} \left(\cos \omega t - \cos \sqrt{c/m_2} t \right) + P_0 \quad (36)$$

Перехід до енергетичної оцінки процесів взаємодії ведучої і веденої мас

$$N_{\text{мит}} = P_{\text{пр}} t \dot{x}_2 t. \quad (37)$$

Очевидно, що значенню maximum maximum $N_{\text{мит}}$ відповідає співпадіння в часі досягнення \dot{x}_{max} і $P_{\text{пр}} = P_{\text{пр max}}$.

Час $t_{\text{екс}}$ досягнення екстремальної швидкості \dot{x}_{max} визначається з умови:

$$\ddot{x}_2 = \left(R \sqrt{\frac{c}{m_2}} - \frac{R c^2}{m c - m_2 \omega^2} \right) \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t_{\text{екс}} + \frac{R c \omega^2 \cos \omega t_{\text{екс}}}{c - m_2 \omega^2} = 0; \quad (38)$$

і для косинусоїдального закону руху маємо:

$$T_{\text{кін max}} = \frac{m_2}{2} \left(\left(R \sqrt{\frac{c}{m_2}} - \frac{R c \sqrt{\frac{c}{m_2}}}{c - m_2 \omega^2} \right) \sin \sqrt{\frac{c}{m_2}} t_{\text{екс}} + \frac{R c \omega \sin \omega t_{\text{екс}}}{c - m_2 \omega^2} \right)^2.$$

Аналогічні міркування щодо синусоїдального закону руху ведучої маси у формі

$$x_1 = R \sin \omega t \quad (39)$$

приводять до визначення кінематичних і динамічних параметрів, на основі яких здійснюється перехід до енергетичних співвідношень. Так маємо для синусоїдального закону:

$$T_{\text{кін max}} = \frac{m_2}{2} \left(\frac{R c \omega}{c - m_2 \omega^2} \cos \omega t_{\text{екс}} - \frac{R c \omega}{c - m_2 \omega^2} \cos \sqrt{\frac{c}{m_2}} t_{\text{екс}} \right)^2 \quad (40)$$

Таким чином потужності, що розвиваються, залежать від законів руху і часу перебігу перехідних процесів. З точки зору інтересів обмеження енерговитрат на перевагу заслуговують безперервні режими переміщення вантажів порівняно з циклічними.

У розділі 4 представлені результати досліджень, які стосуються перевантажувальних систем і накопичувальних пристроїв штучних вантажів.

Особливості в організації процесів перевантаження виробів формулюються структурою систем і відповідним набором вимог до них та припущень, які використовуються у створюваних моделях. На рис. 5 наведено розрахункову схему, що відображує перевантаження виробу циліндричної форми з рухомою на нерухому площину.

Величини і напрямки сил тертя визначалися з врахуванням контактування виробу з опорними площинами по дузі кола і кінематичних параметрів процесу. У відповідності до схеми сумарний опір переміщенню визначається рівнянням:

$$F_{\text{сум}} = F_0 + F'_T = \frac{f m g}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{x}{r} \right) + f_p m g \left(1 - \frac{\arccos \left(1 - \frac{x}{r} \right)}{\pi} \right) \sin \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}. \quad (41)$$

Для другого етапу, коли $x > r$, маємо:

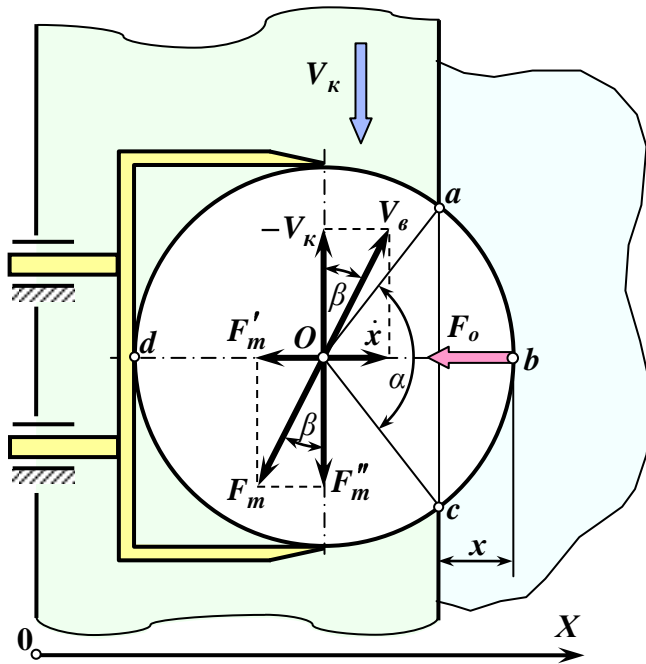


Рис. 5. Розрахункова схема до перевантаження виробу циліндричної форми з рухомою опорною площиною на нерухому за умови $x \leq r$

$$F_{\text{сум}} = fmg \frac{\pi + 2\arcsin \frac{x-r}{r}}{2\pi} + f_p mg \left(1 - \frac{\pi + 2\arcsin \frac{x-r}{r}}{2\pi} \right) \sin \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}. \quad (42)$$

За числа z виробів в ряду і за умови $\dot{x} = \dot{x} t$ потужність рушійної сили має складати:

$$N = F_{\text{сум}} \dot{x} = fmgz \dot{x} t \frac{\pi + 2\arcsin \frac{x-r}{r}}{2\pi} + f_p mgz \dot{x} t \left(1 - \frac{\pi + 2\arcsin \frac{x-r}{r}}{2\pi} \right) \sin \arctg \frac{\dot{x} t}{V_k}, \quad (43)$$

а робота на повному переміщенні –

$$A = \int_{t=0}^{t=t_k} \left(fmgz \dot{x} t \frac{\pi + 2\arcsin \frac{x-r}{r}}{2\pi} + f_p mgz \dot{x} t \left(1 - \frac{\pi + 2\arcsin \frac{x-r}{r}}{2\pi} \right) \sin \arctg \frac{\dot{x} t}{V_k} \right) dt. \quad (44)$$

При використанні накопиченої кінетичної енергії для переміщення вантажу в режимі вибігу маємо рівняння руху $m\ddot{x} = -F_{\text{сум}}$, яке в розгорнутому вигляді трансформується до форми:

$$\ddot{x} = -fg \frac{\pi + 2\arcsin \frac{x-r}{r}}{2\pi} - f_p g \left(1 - \frac{\pi + 2\arcsin \frac{x-r}{r}}{2\pi} \right) \sin \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}. \quad (45)$$

Сумарна величина миттєвої потужності, що відповідає першому етапу ($x < r$) і за $\dot{x} = \text{const}$ маємо:

$$N_{\text{сум}} = \left(\frac{fmg}{\pi} \arccos \frac{1-x/r}{r} + f_p mg \left(1 - \frac{\arccos \frac{1-x/r}{r}}{\pi} \right) \sin \arctg \frac{\dot{x}}{V_k} \right) \dot{x} + V_k f_p mg \left(1 - \frac{\arccos \frac{1-x/r}{r}}{\pi} \right) \cos \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}. \quad (46)$$

На основі останньої залежності і за значень $f = 0,2$; $f_p = 0,15$; $r = 0,1$ м; $m = 5$ кг; $g = 9,81$ м/с²; $\dot{x} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ м/с; $V_k = 0,2$ м/с; $x_{(к)} = r$ виконано розрахунки, результати яких представлені на рис. 6 і в табл. 1.

Таблиця 1. Значення мінімальних і максимальних потужностей за різних співвідношень \dot{x}/V_k

\dot{x}/V_k	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$N_{\text{сум min}}, \text{ Вт}$	1,645	2,081	2,5	3,29	3,962
$N_{\text{сум max}}, \text{ Вт}$	5,728	5,946	6,2	6,55	6,886

Оцінюючи величини енергетичних витрат стосовно всієї системи, відмітимо, що складова, пов'язана з необхідністю подолання опору переміщення рухомої площини, залежить як від співвідношення \dot{x}/V_k , так і від значення координати переміщення. Очевидно, що ця частина енергетичних витрат зростає зі збільшенням V_k . Однак, окрім позитивного зменшення складової F'_T важливе значення має зменшення силової дії на виріб, що може мати принципове значення.

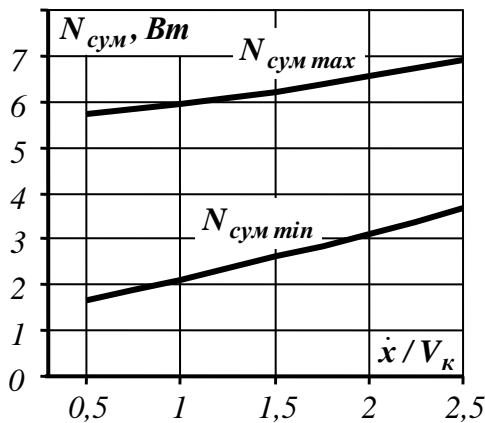


Рис. 6. Залежність величини сумарної миттєвої потужності, що розвивається в системі, від співвідношення швидкостей \dot{x}/V_k

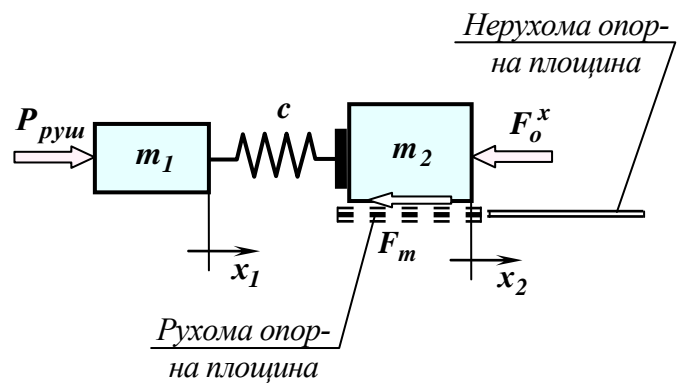


Рис. 7. Схема перевантажувального пристрою з пружним зв'язком

За двомасової моделі (рис. 7) маємо рівняння руху веденої маси:

$$\ddot{x}_2 + \frac{c}{m_2} x_2 = \frac{cV}{m_2} t - \frac{F'_T + F_0}{m_2}. \quad (47)$$

Приклад його розв'язання за початкових умов $t_{\Pi} = 0$; $x_{2\Pi} = -\frac{F_T}{c}$; $\dot{x}_{2\Pi} = 0$ і при значеннях $m_2 = 5$ кг, $c = 10000$; 50000 Н/м наведено на рис. 8.

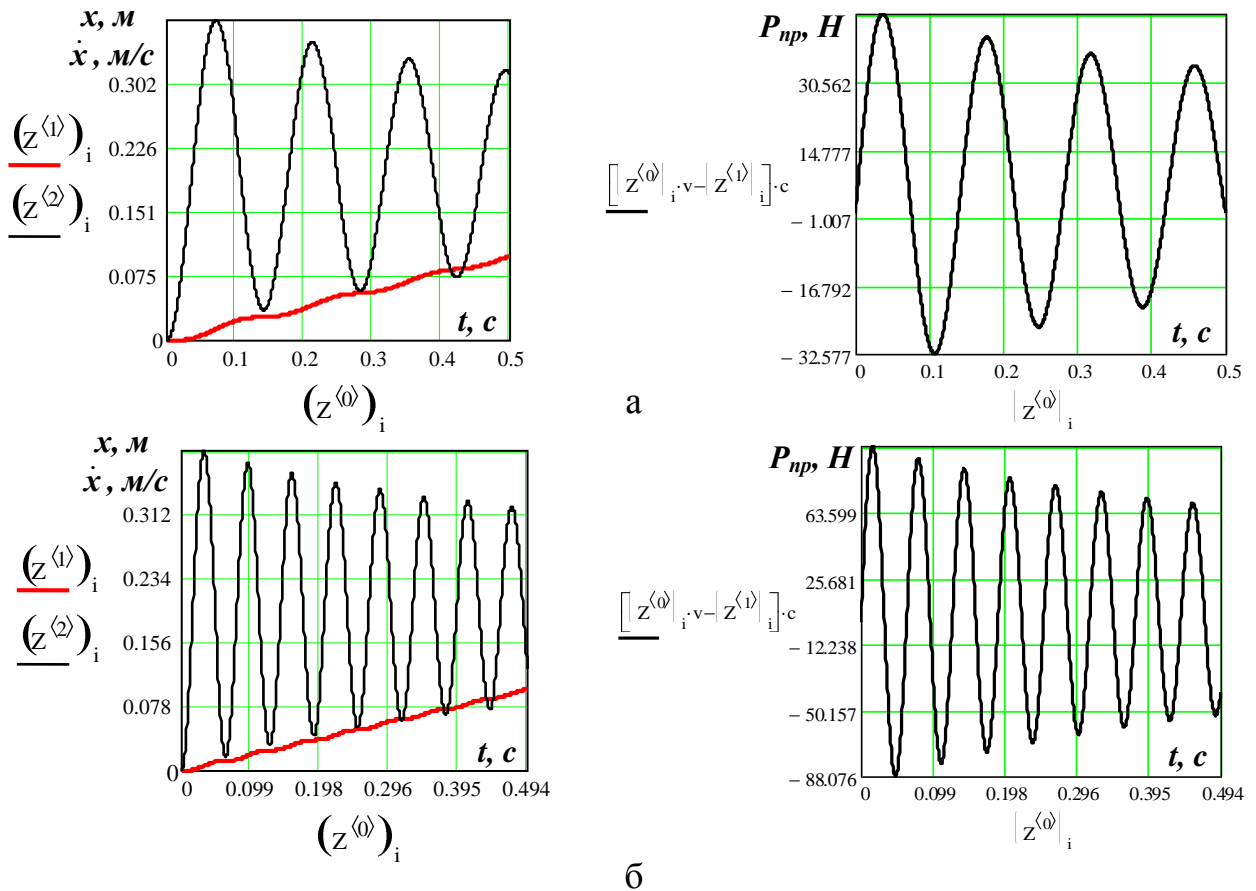


Рис. 8. Графіки залежностей $x = x(t)$, $\dot{x} = \dot{x}(t)$ і $P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}}(t)$ за значення жорсткості : а) 10000; б) 50000 Н/с

Схема до випадку, в якому реалізується переміщення вантажу по похилій рухомій площині вповдовж напрямної за рахунок рушійної сили $mg \sin \alpha$, наведена на рис. 9.

Їй відповідають параметри:

$$\beta = \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}; \quad F_T' = f_p mg \sin \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}; \quad (48)$$

$$F_T'' = f_p mg \cos \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}; \quad (49)$$

$$F_0 = f_0 F_T'' = f_0 f_p mg \cos \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}. \quad (50)$$

При цьому рівняння руху записується у формі:

$$\ddot{x} = g \sin \alpha - f_p g \sin \arctg \frac{\dot{x}}{V_k} - f_0 f_p g \cos \arctg \frac{\dot{x}}{V_k}. \quad (51)$$

Результати розрахунків за умовою (51) наведені в табл. 2, а на рис. 10 наведені порівняльні дані теоретичних розрахунків і результати їх експеримен-

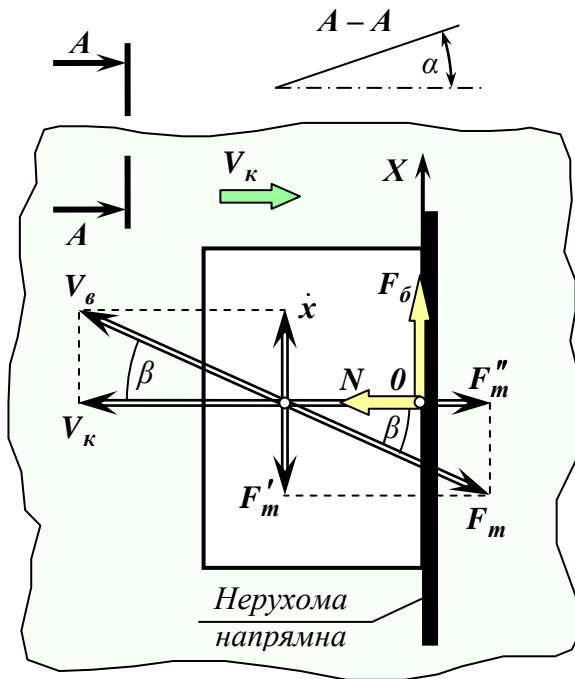


Рис. 9. Схема до випадку опорної рухомої похилої площини

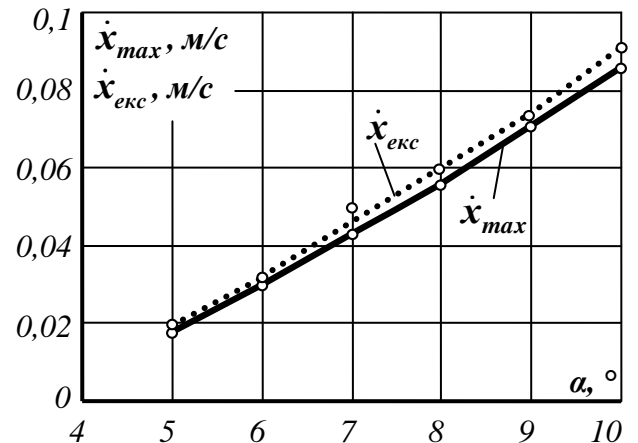


Рис. 10. Залежність стабілізованої швидкості \dot{x}_{\max} від кута нахилу α за значень $f_p = 0,3$; $f_0 = 0,2$; $V_k = 0,2$ м/с

тальної апробації на основі лабораторного стенда за схемою по рис. 9. Наведені результати вказують на можливість конструктивного використання визначеної особливості взаємодії вантажів з похилими рухомими площинами і напрямними.

Таблиця 2. Результати розрахунків по визначенню стабілізованої швидкості $\dot{x} = \text{const}$ за значень $f_p = 0,3$; $f_0 = 0,2$; $V_k = 0,2$ м/с

$\alpha, ^\circ$	5	6	7	8	9	10
$\dot{x}_{\max}, \text{m/s}$	0,018	0,030	0,043	0,056	0,071	0,086

Енергетичний аналіз гравітаційних опускних пристроїв привів до висновку про доцільність використання одержаних розрахункових залежностей у тому числі і щодо пристроїв зі змінними радіусами кривизни.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналітичного моделювання перехідних процесів показано, що частка роботи рушійної сили, задіяної в переміщеннях вантажів і пов'язаної з подоланням сил інерції, еквівалентна кінетичній енергії рухомої маси.

2. Встановлено, що у випадках прискореного руху вантажів на вертикальних ділянках співвідношення між кінетичною енергією рухомої маси і роботою рушійної сили проти сил тяжіння визначається співвідношенням прискорення заданого закону до прискорення вільного падіння.

3. Показано, що у випадках ударних навантажень в системах з пружними зв'язками необхідно забезпечувати умови невиходу асинхронних електродви-

гунів за межі стійкої частини статичної механічної характеристики.

4. Уточнено положення про можливість визначення миттєвих потужностей в пружних системах на основі пружних сил і миттєвих швидкостей руху ведених мас. В перехідних процесах пуску визначено, що величини потужностей, які розвиваються рушійними силами, залежать від законів руху і часу перебігу процесів, однак енергетичні витрати за цей період стабілізовані величиною кінцевої швидкості.

5. Розроблено математичні моделі взаємодії вантажів з комбінаціями рухомих і нерухомих площин. Показано, що швидкість руху опорної площини оцінюється як варіативний фактор впливу на кінематику і динаміку процесу.

6. Визначено, що робота проти сил тертя в гравітаційному опускному пристрої не залежить від форми ломаної або криволінійної форми площини спуску. Одержані енергетичні співвідношення дозволяють виконувати розрахунки спусків криволінійної форми.

7. Розроблена методика розрахунків жорстких систем для переміщення вантажів з симетричними синусоїдальними, косинусоїдальними та іншими симетричними законами з компенсацією енергетичних витрат розгону в режимах вибігу. Показана можливість такої компенсації за рахунок кінематичних зв'язків.

8. Підтверджено, що обрані закони руху вантажів в жорстких системах визначають динаміку силової взаємодії між ними і робочими органами. Однак в системах з компенсацією кінетичної енергії в режимах вибігу вибір різних законів на загальну величину енергетичних витрат не впливає.

9. Показано, що ефективним засобом впливу на гідро- та аеродинаміку рідинних або повітряних потоків є використання частотних перетворювачів в системах живлення електричних двигунів насосів та вентиляторів.

10. Визначено, що за інших рівних умов вибір діаметрів трубопроводів за умовами міцності і забезпеченням еквівалентної пропускну здатності, масові показники трубопроводів не змінює.

11. Розроблено конструкції елементів-трансформаторів кінетичної і потенціальної енергії як складових в системах енергозбереження.

12. Розроблено рекомендації щодо обмеження енергетичних витрат в системах транспортування вантажів, що стосуються жорстких і пружних систем.

13. Річний економічний ефект від впровадження розробок по темі дисертації на ПАТ "Гнідавський цукровий завод" склав 217 тис. грн.

ПЕРЕЛІК РОБІТ, ЩО ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Соколенко, А.І. Кінематика і динаміка пакувального обладнання із системами пасивних елементів / А.І. Соколенко, С.А. Бут, М.М. Хваста, К.В. Васильківський // Упаковка. – 2010. – № 3. – С. 38–41.

Особистий внесок здобувача – запропонував використовувати пасивні елементи для подовження часу перехідних процесів у взаємодії між ведучою і веденою масами.

2. Соколенко, А.І. Моделювання процесів перевантаження пакованих виробів на приймальну площину шляхом зіштовхування / А.І. Соколенко, К.В. Ва-

сильківський, Є.В. Костюк, М.М. Хваста // Упаковка. – 2010. – № 4. – С. 51–53.

Особистий внесок здобувача – розробив аналітичну модель перехідного процесу.

3. Соколенко, А.І. Моделювання процесу перевантаження виробів циліндричної форми / А.І. Соколенко, К.В. Васильківський, М.М. Хваста, С.А. Бут // Харчова промисловість. – 2010. – № 9. – С. 107–110.

Особистий внесок здобувача – розробив і виконав аналіз аналітичної моделі процесу перевантаження виробів циліндричної форми з рухомою площиною на нерухому.

4. Хваста, М.М. Кінематика переміщень вантажів на похилих опорних рухомих площинах / М.М. Хваста, А.І. Соколенко, К.В. Васильківський, С.О. Павлов // Харчова промисловість. – 2010. – № 9. – С. 110–112.

Особистий внесок здобувача – розробив аналітичну модель і фізичне підґрунтя переміщення вантажів на рухомих опорних площинах, встановлених під кутом до лінії горизонту.

5. Соколенко, А.І. Енергетика піднімання вантажів у пакувальному обладнанні / А.І. Соколенко, М.М. Хваста, І.Ф. Максименко, К.В. Васильківський // Упаковка. – 2010. – № 5. – С. 44–45.

Особистий внесок здобувача – виконав аналіз складових енергетичних витрат.

6. Соколенко, А.И. Технологии фасования / А.И. Соколенко, В.А. Поддубный, Р.Н. Леус, М.М. Хваста // Научно-аналитическое издание "Технологии и инновации". – 2011. – № 5. – С. 75–76

Особистий внесок здобувача – надав інформацію щодо особливостей фасування газованих напоїв і перехідних процесів обладнання.

7. Хваста, М.М. Взаємозв'язки між енергетичними і матеріальними потоками в системах транспортування вантажів / М.М. Хваста // Наукові праці НУХТ. – 2015. – Т. 21. – № 5. – С. 151–157 (*накометричні бази Google Scholar та Index Copernicus*).

Особистий внесок здобувача – виконав одноосібно.

8. Хваста, М.М. Енергетичні трансформації в гравітаційних накопичувальних пристроях / М.М. Хваста, А.І. Соколенко, В.С. Костюк // Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи: матеріали 76 наукової конф. молодих учених, аспірантів і студентів / Національний університет харчових технологій. – К. : НУХТ, 2010. – Ч. III. – С. 77.

Особистий внесок здобувача – на основі аналітичної моделі довів, що енергетичні витрати, пов'язані з подоланням сил тертя не залежать від форми спуску.

9. Хваста, М.М. Динаміка перехідних процесів в транспортно-технологічних системах харчових виробництв / М.М. Хваста, В.С. Костюк // Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи : матеріали міжнародної науково-практичної конференції / Націона-

льний університет харчових технологій. – К. : НУХТ, 2010. – Ч. I. – С. 92.

Особистий внесок здобувача – показав, що енергетичні витрати в перехідних процесах пов'язані з подоланням сил опору і наданням веденій масі кінетичної енергії, як роботі проти сил інерції.

10. Хваста, М.М. Особливості вибору параметрів обладнання в транспортно-технологічних системах харчових виробництв / М.М. Хваста, Є.В. Костюк // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: матеріали 77 наукової конф. молодих учених, аспірантів і студентів / Національний університет харчових технологій. – К. : НУХТ, 2011. – Ч. II. – С. 232.

Особистий внесок здобувача – запропонував математичний апарат для визначення технологічних сил опорів при переміщеннях вантажів.

11. Мудрак, А.В. Дослідження динаміки вкладання вантажів / А.В. Мудрак, М.М. Хваста, В.М. Криворотько, С.А. Бут // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: матеріали 78 наукової конф. молодих учених, аспірантів і студентів / Національний університет харчових технологій. – К. : НУХТ, 2012. – Ч. II. – С. 246–247.

Особистий внесок здобувача – визначив умови вкладання вантажів на приймальні площини з обмеженими швидкостями їх контактування.

12. Молчанов, І.Ф. Аналітичне моделювання робочих процесів в обладнанні ліній пакування / І.Ф. Молчанов, М.М. Хваста // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: матеріали 79 наукової конф. молодих учених, аспірантів і студентів / Національний університет харчових технологій. – К. : НУХТ, 2013. – Ч. II. – С. 443–444.

Особистий внесок здобувача – запропонував математичну модель процесу переміщення вантажів.

13. Патент 62351 UA, B65G 65/00 (2011.01) Пристрій для піднімання та переміщення вантажів / Соколенко А.І., Леус Р.М., Хваста М.М., Павлов С.О., Максименко І.Ф.; заявник Національний університет харчових технологій. – № u201101169; заявл. 02.02.2011; опубл. 25.08.2011, Бюл. № 16, 2011 р.

Особистий внесок здобувача – запропонував конструктивне втілення реалізації обмежень швидкості контактування ведучої і веденої мас.

АНОТАЦІЯ

Хваста М.М. Удосконалення теорії розрахунків перехідних процесів в динаміці обладнання харчових виробництв: – 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 представлено аналіз сукупності матеріальних і енергетичних потоків виробництв, особливостей трансформації матеріальних і енергетичних потоків, матеріального забезпечення процесів утворення паковань і збільшених

вантажних одиниць.

Розроблено методики щодо мінімізації в енергетичному забезпеченні процесів переміщення вантажів в жорстких і пружних системах. Встановлено співвідношення параметрів, за яких в режимах ударних взаємодій навантаження асинхронних двигунів не виходять за межі стійкої частини статичних механічних характеристик. Встановлено, що у випадках прискореного руху вантажів на вертикальних ділянках співвідношення між кінетичною енергією рухомої маси і роботою рушійної сили проти сил тяжіння визначається відношенням прискорення заданого закону руху до прискорення вільного падіння.

Визначено, що в перехідних процесах пуску енергетичні витрати за цей період і за стабілізованого значення кінцевої швидкості залишаються сталими.

Ключові слова: динаміка, взаємодія мас, навантаження, переміщення, формування, пружність, жорсткість, модель, енергетичні витрати.

ANNOTATION

Hvasta M.M. Improvement of the theory of calculations of transients in the dynamics of equipment for food industries: – 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, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to the evaluation of the interactions of material and energy flows in the machinery and equipment of food production.

In the introduction, the expediency and relevance of the thesis work is justified. The importance of searches in the organization of interaction between material and energy flows, limitation of specific energy costs in cargo transportation systems was noted.

Section 1 analyzes the interactions of material and energy flows in food technologies, the specifics of energy supply for the movement of goods. On the basis of the analysis, research problems are formulated.

Section 2 is devoted to descriptions of methods for conducting theoretical studies, the choice of physical bases and assumptions that are the basis of theoretical models, the results of experimental verification of the latter.

Analytical modeling of statics, kinematics, dynamics and energy exchange processes is based on the classical positions of mechanics, Newton's laws, the principles of possible displacements, D'Alembert, superpositions, Ammonton-Coulomb friction laws and conservation laws in their direct use.

The third section is devoted to the interrelations between energy and material flows in cargo transportation systems.

It is shown that part of the energy costs associated with overcoming inertia forces is equivalent to the kinetic energy of the moving mass. In cases of accelerated movement of goods on vertical sections, the relationship between the kinetic energy of the moving mass and the work of the driving forces against gravity is determined by the ratio of the acceleration of a given law and the acceleration of gravity. In cases

of using symmetrical laws of moving loads on vertical sections in rigid systems, the energy costs associated with overcoming inertia forces are compensated for in the run-out areas.

It is shown that the possibility of providing the condition for the induction of asynchronous electric motors beyond the boundaries of a stable part of the static mechanical characteristic.

It is established that the decrease in the acceleration time increases the power, but the energy costs with the stabilized values of the final speed remain constant.

The mathematical models of interaction of cargoes with combinations of moving and fixed planes are developed. It is shown that the velocity of the motion of the reference plane is evaluated as a variational factor affecting the kinematics and dynamics of the process.

It is determined that the work against frictional forces in a gravity lowering device does not depend on the shape of the broken or curvilinear form of the descent plane. The obtained energy relations allow to make calculations of slopes of curvilinear form.

The method of calculation of rigid systems for moving loads with symmetric sinusoidal, cosine-bearing and other symmetric laws with compensation of energy expenditure of acceleration in runoff modes is developed. The possibility of such compensation is shown due to kinematic connections.

Section 4 is devoted to reloading systems and storage devices for piece cargo. Cumulative devices and complexes of modern food production concern all parts of their transport-technological systems.

It is shown that storage devices of piece cargo transfer transport-technological systems to the category of systems with flexible connections, and their existence is associated with the need for rebuilding the flows, dividing them, forming and disbanding arrays of products, etc. It is shown that the processes of overloading cylindrical products were described using nonlinear differential equations.

On the basis of the elements of the theory of probability, relationships are obtained that relate to the performance of automatic machines and the capacity of storage devices that connect them technologically.

Theoretical developments are the basis for constructive solutions aimed at the use of kinetic and potential energies in their accumulations and transformations.

Key words: *dynamics, mass interaction, loads, displacement, formation, elasticity, rigidity, model, energy costs.*