

АНОТАЦІЯ

Никеруй Ю.С. Обґрунтування параметрів канатної системи малих складських приміщень для переміщення сільськогосподарських продуктів у тарі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (13 – Механічна інженерія). – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню експлуатаційних показників канатних систем для завантаження малих складських приміщень сільськогосподарськими продуктами у тарі шляхом розроблення нових конструкцій механізмів та їх окремих елементів з обґрунтуванням раціональних параметрів.

Розроблена канатна система дозволяє адаптувати її для завантаження продуктами у тарі малих складських приміщень, які змінили своє функціональне призначення і можуть забезпечити зберігання сільськогосподарської продукції, яка вирощується фермерськими підприємствами. При цьому, для уникнення надкритичних навантажень на бокові стіни приміщень, а також суттєвого зниження повздовжніх коливань рамної конструкції з вантажами, яка переміщається за допомогою роликів по похило встановлених канатах, запропоновано застосовувати паралельно розташовані їх пари із забезпеченням однакового зусилля натягу та відповідно величини прогину канатів.

Канатна система забезпечує плавне переміщення вантажів від зони їх завантаження до зони вивантаження, а сам процес гальмування рамної конструкції за допомогою підпружинених важелів і підтискних роликів, які взаємодіють з нижньою поверхнею канатів, також відбувається без різких динамічних навантажень.

Це дозволяє суттєво знизити пошкодження сільськогосподарської продукції (наприклад яблук, груш та ін.) при завантаженні на зберігання.

Проведені теоретичні дослідження та виведені аналітичні залежності дозволили встановити, що при радіусі підтискних роликів $R = 45$ мм та довжині важелів $l_e = 400$ мм рекомендованими є такі параметри: відстань від осі шарнірного кріплення важелів до осі обертання опорних роликів $l_{кр} = 450...525$ мм, а величина кута розташування боковин рамної конструкції $\gamma = 26^\circ...34^\circ$, що відповідає діапазону початкового значення кута розташування важеля до горизонту ε_n від 45° до 75° .

При цьому, для максимальних величин ε_T і $l_{кр}$, значення кута нахилу канатів до горизонту α зростає від $2,7^\circ$ до $8,5^\circ$, тобто у 3,15 разів.

Проведений аналіз виведених аналітичних залежностей для визначення параметрів взаємодії роликів натяжних важелів з направляючими канатами показав, що домінуючий вплив на величину обертового моменту T_o має жорсткість пружини.

Збільшення відстані l_n точки кріплення пружини відносно шарнірного повертання важеля від 200 до 400 мм призводить до зростання величини T_o у 1,4...1,42 рази при різних значеннях кута ε . Зменшення абсолютного значення кута ε від 60° до 40° спричиняє зростання величини T_o у 1,94...1,97 рази при збільшенні величини l_e від 200 до 400 мм.

Показано, що раціональний кут нахилу канатів до горизонту для коротких канатних трас із гравітаційним переміщенням вантажу становить $5^\circ - 15^\circ$ градусів.

Для коротких канатних трас через незначну вагу канатів, порівняно із вагою підвісної платформи з вантажем, складовою прогину від ваги канатів можна знехтувати, відповідно, з похибкою менше 1% вітки навантаження можна апроксимувати прямими лініями.

Показано, що зона гравітаційного розгону вантажу для коротких похилих трас при рекомендованих довжинах канатів перевищує зону гравітаційного гальмування і для рекомендованих параметрів займає більш ніж 60% траси.

Побудовано динамічну імітаційну модель контактної взаємодії яблук. Модель дозволила провести обчислюваний експеримент та встановити час t_k і біжучі сили P контактної взаємодії в залежності від фізико-механічних

характеристик та кінематики яблук в залежності від початкових умов.

Наведено залежності зміни в часі сили ударної контактної взаємодії для яблука діаметром 80 мм з модулем зсуву $\mu_1 = G_1 = 1,1$ МПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,18$ із жорсткою сталюю поверхнею ($G_2 = 8,1 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu = 0,28$) для випадків, коли початкова швидкість яблука в момент контакту змінювалась від $v_0 = 0,2$ м/с до $v_0 = 1,4$ м/с. При цьому сила взаємодії зростала від $P_{0,2} = 11,5$ Н при часі взаємодії $t_{0,2} = 0,0088$ с, до $97,0$ Н при $t_{1,4} = 0,0055$ с.

Силу удару можна суттєво зменшити лише тоді, коли площадка виготовлена з матеріалу, для якого модуль зсуву є менший або рівний модулю зсуву яблук.

Для суттєвого зменшення сили контактної взаємодії P та збільшення часу контакту t (понад 0,01 с) необхідно, щоб модуль пружності площадки був значно меншим ніж модуль пружності яблук. Критичними значеннями сили P , при якій не порушується структура м'якоті яблука для твердих сортів, є $P_{\max} = 80$ Н, для м'яких: 35-40 Н.

Розроблена конструкція канатного механізму та його елементів, способи регулювання їх параметрів, методика проведення експериментальних досліджень на базі розробленої експериментальної установки для визначення зусиль провертання важелів з роликками та підтискання канатів в їх різних зонах із застосуванням динамометра електронного марки ДЕ 0,5-0,5, дозволили здійснити комплекс експериментальних досліджень.

Встановлено залежності величини прогину тросів Δ_n від величини вертикального навантаження, яке визначається з маси m_g мірних вантажів для трьох зон їх розташування. Максимальна величина Δ_n від дії m_g знаходиться в середній частині троса.

За результатами досліджень сили вертикального навантаження важеля мірними вантажами встановлено, що зміна кріплення пружин в отворах плоских пластин з відстанню між першим та сьомим центрами рівною 180 мм призводить до зростання біжучої деформації пружини у $\Delta L \approx 4,2$ рази при $F = 123,75$ Н. При $F > 125$ Н і мінімальній відстані $l_T = 750$ мм відбувається провертання важеля з роликком і даний механізм втрачає своє функціональне

призначення.

При проведенні багатофакторного експерименту з визначення часу T транспортування штучних вантажів факторне поле змінних параметрів мало діапазони: маса m штучних вантажів: $35 \leq m \leq 95$ (кг); кут нахилу α канатів до горизонту: $10 \leq \alpha \leq 15$ (град.); зусилля натягу N канатів $2400 \leq N \leq 5000$ (Н).

При дослідженні впливу двох змінних параметрів на значення часу T транспортування сільськогосподарських продуктів у тарі третьому надавали фіксоване середнє значення з відповідними величини: $m = 65$ (кг); $\alpha = 15$ (град.); $N = 5000$ (Н).

Встановлено, що домінуючий вплив на мінімальний час T має кут α , далі маса m та зусилля натягу N канатів. Варто зауважити, що діапазон розбіжності значень величин T при зміні вищезазначених факторів є незначним і близьким до 5,7% для (m / α) та 6,6 % для (N / α) .

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що на основі виведених аналітичних залежностей вперше обґрунтовано раціональні конструктивні параметри рамної конструкції під тару з продуктами та кутові положення підпружинених важелів з роликками, які взаємодіють з нижньою поверхнею направляючих канатів для правої та лівої сторони рухомих елементів рамної конструкції відносно центральної вертикальної осі, а також кута розташування направляючих канатів до горизонту.

Встановлено силові параметри при взаємодії роликів натяжних важелів з направляючими канатами при переміщенні роликової рамної конструкції з вантажами у тарі.

Вперше для коротких канатних систем розроблена модель гравітаційного переміщення підвішеного вантажу із визначенням поточних прогинів навантажених канатів, їх натягу, кінематичних та енергосилових параметрів технологічного процесу.

Розроблено математичну модель ударної взаємодії яблук між собою та з робочими поверхнями тари при їх збиранні та транспортуванні. В моделі з використанням теорії Герца визначені напруження та інші біжучі параметри ударної взаємодії тіл. Особливістю моделі є встановлення змін вказаних

параметрів в часі, що дозволяє моделювати процес в режимі обчислюваного експерименту. Наведено залежності зміни контактних сил у часі, а також приклади зміни кінематики яблук при початкових кутових та тангенціальних швидкостях.

Вперше встановлені закономірності впливу конструктивних, кінематичних і динамічних параметрів розробленої канатної системи на якість виконання технологічного процесу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні нових компоновальних схем та конструкції канатної системи для завантаження сільськогосподарських продуктів у малі складські приміщення та встановлено їх раціональні конструктивно-технологічні параметри.

Розроблено та виготовлено експериментальну конструкцію канатного механізму та рамної підвіски з центральними та підтискними роликками, які закріплені на підпружинених важелях, і для завантаження продуктами у тарі складського приміщення основними парами паралельно розташованих канатів з регулюванням їх кута нахилу та зусилля натягу.

Запропоновані методики проведення експериментальних досліджень з визначення впливу регульованих параметрів механізму та його елементів з використанням стандартного та розробленого обладнання.

Побудовані рівняння регресії, поверхні відгуку та двомірні перерізи часу переміщення штучних вантажів у складському приміщенні від кутів розташування канатів до горизонту, маси вантажів та зусилля натягу канатів.

Технічна новизна виконаних розробок захищена 4-ма деклараційними патентами України на корисні моделі.

Отримані наукові та практичні результати, методики й рекомендації, а також експериментальний канатний механізм для переміщення сільськогосподарських продуктів у тарі в малому складському приміщенні впроваджено у ТОВ «Колос-2» (м. Тербовля, Тернопільської області).

Окремі результати роботи впроваджено в навчальний процес підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» для викладання дисципліни «Механізація

зберігання сільськогосподарської продукції» та підготовки фахівців освітньо-наукового рівня доктор філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» для викладання дисципліни «Основи взаємодії робочих органів з робочим середовищем» в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

Ключові слова: параметри канатної системи, направляючі канати, прогин канатів, рамна конструкція, пари роликів, підтискний важіль, ударна взаємодія яблук, тара, час транспортування продукції, сила натягу канатів, маса вантажів, кут нахилу канатів до горизонту, експериментальна установка канатного механізму.

ABSTRACT

Nykerui Y.S. Substantiation of rope system parameters of small warehouses for agricultural products transportation in containers. – Qualification scientific paper as a manuscript copyright.

Doctor of Philosophy thesis on specialism 133 «Industrial Engineering» (13 – Mechanical Engineering). – Ternopil I. Puluj national technical university, Ternopil, 2021.

The thesis under discussion is devoted to the increase of rope system performance for small warehouses loading with agricultural products in containers by means of the development of new design of mechanisms and their separate parts including the substantiation of the most efficient parameters.

The developed rope system makes possible its adaptation for loading by products in containers in small warehouses which have changed their functional use and can provide the storage of agricultural products grown by farmers. In this case the pairs of rollers have been suggested to use in a parallel way and provide the same stressing force and respectively the same value of ropes deflection to avoid excessive loads on the warehouse side walls and also to provide the essential decrease of the weighted framework longitudinal oscillations while it is moving on the ropes with the help of rollers.

The rope system under consideration guarantees the smooth transportation of

products from their loading area to the unloading area, and the whole process of the framework braking by means of spring-loaded levers and clamping rollers which interact with the ropes lower surface is taking place without sharp dynamic oscillations.

The system under discussion makes possible the considerable decrease of the agricultural products damage (for example apples, pears etc.) under loading and storing conditions.

The conducted theoretical investigation and obtained analytical dependencies have proved that the following parameters can be recommended when the radius is $R = 45$ mm and the lever length $l_{lev} = 400$ mm: distance from the levers hinging axis to the supporting rollers axis of rotation $l_{fa} = 450...525$ mm and the value of framework sidepieces location angle $\gamma = 26^\circ...34^\circ$ which corresponds to the range of initial value of the lever location angle in relation to horizon ε_n from 45° to 75° .

In this case, for maximum values ε_T and l_{fa} the rope canting angle value α is getting higher from $2,7^\circ$ to $8,5^\circ$, i.e. 3,15 times higher.

The conducted analysis of the obtained analytical dependencies to determine the parameters of tension levers rollers interaction with guide ropes has shown that the spring tension has made the most important impact on the torque value T_o .

The increase of distance l_{lev} of the spring fixing point relative to the lever hinging from 200 to 400 mm has resulted in 1,4...1,42 times increase of value T_o at different values of angle ε . The decrease of the angle absolute value from 60° to 40° has resulted in the 1,94...1,97 times increase of value T_o at increased value l_{lev} from 200 to 400 mm.

It is proved that the rational ropes canting angle for short rope routes with gravity movement of cargo equals to $5^\circ - 15^\circ$.

For short rope routes due to the small weight of ropes in comparison with the hanging loaded platform weight the curve constituent caused by rope weight can be neglected, respectively with the deviation less than 1% the loaded branches can be approximated by straight lines.

It is shown that the area of cargo gravity acceleration for short sloping routes under recommended rope length conditions has exceeded the gravity braking area and

it covers more than 60% of the whole route for the recommended parameters.

The constructed dynamic simulation model of apples contact interaction has made possible to make a calculation experiment and determine the time t_k and travelling forces P of the contact interaction depending on the physical-mechanical characteristics and apples kinematics relative to the initial conditions.

The temporal variations dependencies of impact contact interaction force for an apple of 80 mm diameter with the shear modulus $\mu_1 = G_1 = 1,1 \text{ MPa}$, the Poisson ratio $\nu = 0,18$ with rigid steel surface ($G_2 = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, $\nu = 0,28$) have been presented for the cases when the apple initial velocity at the contact moment varied from $v_0 = 0,2 \text{ m/s}$ to $v_0 = 1,4 \text{ m/s}$. In this case the interaction force has increased from $P_{0,2} = 11,5 \text{ H}$ at interaction time $t_{0,2} = 0,0088 \text{ s}$ to $97,0 \text{ H}$ at $t_{1,4} = 0,0055 \text{ s}$.

Impact force can be considerably smaller only in case when the platform is made of the material for which the shear modulus is less or the same as the shear modulus of apples.

For the considerable decrease of contact interaction force P and increase the contact time t (more than 0,01s) it's necessary that the platform modulus of elasticity will be by one-two order lower than the apples modulus of elasticity. The critical values of force P when the apple flesh structure isn't damaged for hard varieties are the following $P_{\max} = 80 \text{ H}$, for the soft ones - 35-40 H .

The rope mechanism and its members developed design, the ways of their parameters adjustment, the technique of experimental research conducting based on the developed experimental unit to determine the turning efforts of levers with rollers and ropes pressing in different areas using the electronic force meter DE 0,5-0,5 made possible the conducting of a complex of experimental study.

The dependencies of ropes curve value Δ_n on the vertical load value found from the mass of the measured cargo m_g for three areas of their location have been obtained. The maximum value Δ_n of the action m_g has been found in the middle part of the rope.

According to the results of the study of the lever vertical loading force with precut cargo it has been found that the spring attachment change in the holes of flat plates with the distance between the first and the seventh centers equals to 180 mm

resulted in the $\Delta L \approx 4,2$ times increase of the current spring deflection at $F = 123,75 H$. At $F > 125 H$ and minimal distance $l_T = 750$ mm the lever with the roller turning has occurred and the mechanism under discussion has lost its functional purpose.

The factor field of the variable parameters during the multifactor experiment conducting aimed at determining time T in single-piece cargo transportation was within the following range: mass m of single-piece cargo: $35 \leq m \leq 95$ (kg); ropes angle of inclination relative to the horizon α : $10 \leq \alpha \leq 15$ (deg.); tension effort N of the ropes $2400 \leq N \leq 5000$ (H).

While studying the influence of two variable parameters on time T value during the agricultural products transportation in containers the third one was given a fixed average value with the following values: $m = 65$ (kg); $\alpha = 15$ (deg.); $N = 5000$ (H).

Angle α , mass m , and tension force N of the ropes respectively have been found to make the greatest impact on minimal time T . It should be mentioned that the range of values T varieties under above-mentioned factors change can be neglected and it is close to 5,7% for (m / α) and 6,6 % for (N / α) .

The scientific novelty of the obtained results is that the most efficient design parameters of a framework as a container with products and angular positions of spring-loaded levers with rollers interacting with the low surface of the guide ropes for right and left sides of the framework moving members relative to the central vertical axis and also to the guide ropes angle of location relative to the horizon have been substantiated for the first time on the basis of the obtained analytical dependencies.

The force parameters at tension levers rollers interaction with the guide ropes have been determined at the moment of sharp braking of the roller framework with the cargo in containers.

A model of suspended cargo gravity transportation has been developed for the first time for short rope systems to determine the current curves of the loaded ropes, their tension, kinematic and power-force parameters of the technological process under discussion.

The mathematical model of apples impact interaction among themselves and with containers working surfaces under their harvesting and transportation conditions has been developed. The stresses and other traveling parameters of impact interaction of bodies have been determined in the model under study using the theory of Hertz. The specific feature of the model is the determination of the specified temporal variations enabling the process simulation in the mode of a calculation experiment. The dependencies of contact forces temporal variations and also the examples of apples kinematic variation at initial angular and tangential velocities have been given.

The influence pattern of design, kinematic and dynamic parameters of the developed rope system under discussion on the manufacturing process quality has been determined for the first time.

The practical value of the obtained results has involved both the development of new lay-out schemes and a rope system design for agricultural products loading in small warehouses and the determination of their most efficient design-technological parameters.

An experimental design of a rope mechanism and a frame suspension with the central and pressing rollers fixed on the spring loaded levers has been developed and manufactured for the warehouse loading with the products in containers when the main pairs of the ropes are located in a parallel way and their sloping angle and tension efforts can be adjusted.

The techniques of experimental study conducting to determine the influence of the mechanism under discussion and its components adjusted parameters using the standard and developed equipment have been proposed.

The regression equations, response surfaces and two-dimensional cross-sections of packaged cargo transportation time in warehouses dependence on rope canting angle, cargo weight and rope tensile force have been constructed.

The technical innovation of the developed design has been defended by the 4 declaration utility model patents of Ukraine.

The obtained scientific and practical results, techniques and recommendations, and also the experimental rope mechanism for agricultural products transportation in containers in a small warehouse have been implemented in LLC «Kolos-2»

(Terebovlya town, Ternopil region).

Some results of the paper under discussion have been introduced in the educational process of Bachelor educational-qualification level specialists training in specialty 133 «Industrial Engineering» to teach the subject «Mechanization of storage of agricultural products» and training of specialists of educational and scientific level, Doctor of Philosophy, specialty 133 «Industrial Engineering» for teaching the subject «Fundamentals of interaction of working bodies with the working environment» in the Ternopil I. Puluj national technical university.

Key words: rope system parameters, guide ropes, rope curve, framed structure, pairs of rollers, clamping lever, apples impact interaction, container, time of products transportation, funicular force, cargo weight, rope canting angle, experimental unit of rope mechanism.