

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**СТАНЬКО АНДРІЙ ІГОРОВИЧ**

**УДК 621.867.42**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВИХ МЕХАНІЗМІВ  
З ЕЛАСТИЧНИМИ ЗМІННИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДЛЯ  
ТРАНСПОРТУВАННЯ НАСІННЄВИХ ЗЕРНОВИХ  
МАТЕРІАЛІВ**

13 «Механічна інженерія»

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ А.І. Станько

Науковий керівник:  
Гевко Іван Богданович,  
доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Станько А.І.* Обґрунтування параметрів шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями для транспортування насінневих зернових матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 “Галузеве машинобудування”. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2023.

Дисертація присвячена теоретичному обґрунтуванню і новому технічному забезпеченню вирішення наукового завдання, яке полягає у зниженні ступеня пошкодження насінневих зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами шляхом розроблення нових змінних гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями і вибору раціональних конструктивних параметрів та режимів їх роботи.

Проведено структурний синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями з метою пошуку конструктивних рішень для зменшення пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами у порівнянні із традиційними жорсткими шнеками, використовуючи морфологічний аналіз з ієрархічним групуванням конструктивних ознак. Одержано декілька конструкцій гвинтових робочих органів, що відповідають меті синтезу, на які одержано патенти України на корисні моделі, зокрема з щіткоподібною гвинтовою частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, із суцільною камероподібною частиною.

Проведено теоретичні дослідження деформації волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів при транспортуванні зернового матеріалу. Виведено та розв’язано числовим методом диференціальне рівняння для середньої лінії деформації декількох волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу горизонтального та нахилоного гвинтового конвеєра із тихохідним режимом роботи під час транспортування сипкого матеріалу при коефіцієнті завантаження до 0,45. На основі проведеного розв’язку диференціального рівняння встановлено, що при зменшенні діаметра волокна від 2,3 мм до 1,7 мм для однакових зовнішніх навантажень

відбувається деформація волокон на величину 5 мм. При збільшенні робочої частини волокон від 20 мм до 40 мм для однакових зовнішніх навантажень відбувається деформація волокон на величину 8,6 мм. Відтак використання волокон із більшою довжиною робочої частини знижує навантажувальну здатність еластичного щіткоподібного шнека, проте призводить до зменшення величини травмування насінневого зернового матеріалу, що транспортується.

Проведено теоретичні дослідження параметрів взаємодії волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу із зерновим матеріалом. Виведено рівняння рівноваги зернини в початковий момент контакту із волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу. Визначено кут контакту між зерниною та волокном гвинтового робочого органу. Виведено рівняння для знаходження допустимого зовнішнього навантаження на зернину, при якому величина прогину волокон не перевищує граничну величину, при якій забезпечується транспортування зернового матеріалу.

Встановлено, що збільшення кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном призводить до зменшення значення зовнішнього навантаження  $P$ . При куті  $\alpha=90$  град на зернину діють тільки сили тертя. Збільшення відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, що взаємодіють із зерниною, призводить до зменшення навантаження  $P$ , при чому збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$  призводить до зростання навантаження  $P$ . Суттєве зменшення навантаження  $P$  спостерігається при  $l_1$ , що дорівнює діаметру зернини.

Визначено умову защемлення зернини між волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу та внутрішньою поверхнею кожуха. Встановлено, що збільшення кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном та відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу призводить до збільшення ймовірності защемлення зернини між волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу. Для коефіцієнта тертя між зерниною та волокном  $\mu_1 < 0,5$  кут  $\alpha$  знаходиться в межах від 50 град до 90 град, а відстань  $l_1$  від 4 мм до 5 мм при радіусі зернини 2 мм.

Визначено критичний кут контакту між зерниною і волокном та критичну відстань між центрами волокон круглого поперечного перерізу, при яких відбувається защемлення зернини. Встановлено співвідношення зазору між волокнами та діаметром зернини, при яких можливе защемлення зернини, з якого випливає, що чим більший коефіцієнт тертя  $\mu_1$ , тим менше таке співвідношення. Так для коефіцієнта тертя  $\mu_1=0,5$  защемлення зернини можливе при співвідношенні зазору до діаметра зернини від 0,75, а для  $\mu_1=0,3$  – від 0,89.

Спроековано та виготовлено дослідний зразок гвинтового конвеєра із можливістю використання різних діаметрів кожуха та змінних гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями (суцільною камероподібною частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, з щіткоподібною гвинтовою частиною), та з можливістю керування режимами роботи конвеєра за допомогою ПК через перетворювач частоти струму Altivar 71 з автоматичною візуалізацією та фіксацією отриманих результатів при дослідженні продуктивності транспортування та ступеня пошкодження насінневого зернового матеріалу після його переміщення в діапазонах частоти обертання гвинтового робочого органу від 0 до 511,2 об/хв, внутрішнього діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм та кута нахилу конвеєра від  $0^\circ$  до  $30^\circ$ .

Представлено результати експериментальних досліджень трьох різних типів гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями, на основі статистичної обробки яких, за допомогою прикладного програмного забезпечення, встановлено емпіричні закономірності впливу конструктивних параметрів та режимів роботи гвинтових конвеєрів із змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями на їх продуктивність та ступінь пошкодження насінневих зернових матеріалів при транспортуванні.

Одержано такі результати. Продуктивність під час транспортування гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною складала: для ячменю максимальна - 6,37 т/год., а мінімальна – 3,98 т/год.; для кукурудзи максимальна - 6,67 т/год., а мінімальна – 4,18 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  від 284 об/хв. до

511,2 об/хв. призводить до зростання продуктивності в 1,29 рази. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,11 рази, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,12 рази.

Продуктивність під час транспортування гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною складала: для ячменю максимальна - 6,61 т/год, а мінімальна – 3,49 т/год.; для кукурудзи максимальна - 6,92 т/год, а мінімальна – 3,84 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до оптимальної частоти обертання призводить до зростання продуктивності в 1,25 рази для ячменю (від 430 до 440 об/хв.) та в 1,22 рази для кукурудзи (від 450 до 480 об/хв.).

Продуктивність під час транспортування гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною складала: для ячменю максимальна - 4,37 т/год, а мінімальна – 1,77 т/год.; для кукурудзи максимальна - 5,25 т/год, а мінімальна – 2,56 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до 470...480 об/хв. призводить до зростання продуктивності в 1,25 рази. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,36 рази для ячменю та в 1,29 рази для кукурудзи, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,54 рази для ячменю та в 1,36 рази для кукурудзи.

Встановлено, що максимальна величина ступеня пошкодження зерна кукурудзи при транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами складала 0,26%, при транспортуванні гвинтовими робочими органами з периферійною еластичною щіткоподібною частиною - 0,25%, а при транспортуванні гвинтовими робочими органами з гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною - 0,24%. Травмування кукурудзи при її переміщенні шнеками з суцільним камероподібним елементом та периферійною еластичною щіткоподібною частиною є нижчою в 4,06... 4,32 рази, а при використанні шнека з щіткоподібним елементом є нижчою в 4,5 рази, ніж при використанні

звичайних жорстких шнеків. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до 511,2 об/хв. призводить до зростання ступеня пошкодження зерна кукурудзи в 1,55 рази.

Розроблені конструкції гвинтових конвеєрів оснащених гвинтовими робочими органами із еластичними поверхнями та інших видів гвинтових конвеєрів захищені дев'ятьма патентами України на корисні моделі, а гвинтовий конвеєр з еластичною щіткоподібною поверхнею, що виготовлений на основі патенту України № 150968, пройшов успішні промислові випробування у Селянському фермерському науково-виробничому господарстві «Коваль». Річний економічний ефект від використання дослідного зразка склав 6870 грн.

Ключові слова: гвинтовий конвеєр, шнек, еластична поверхня, продуктивність, рух зернових гранул, лабораторна установка, втрати насіння, потужність, швидкість витікання, коефіцієнт заповнення, процес, моделювання, змішувач, зерновий матеріал, силові параметри.

## ANNOTATION

*Stanko A.I.* Justification of parameters of screw mechanisms with elastic changeable surfaces for transportation of seed grain materials. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 133 "Industrial engineering". - Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2023.

The thesis is devoted to the theoretical foundations and new technical support for solving the scientific task, which consists in reducing the degree of damage to seed grain materials during transportation by screw conveyors by developing new variable screw working bodies with elastic surfaces and choosing rational design parameters and modes of their operation.

A structural synthesis of screw working bodies with elastic surfaces was carried out in order to reduce damage to grain materials during transportation by screw conveyors in comparison with traditional rigid screws, using morphological analysis with hierarchical grouping of structural features. Several designs of screw working bodies corresponding to the purpose of synthesis were obtained, for which patents of Ukraine for useful models were obtained, in particular with a brush-like helical part, with a peripheral elastic brush-like part, with a continuous chamber-like part.

Theoretical studies of the deformation of elastic brush-like screw working bodies fibers during the transportation of grain material have been carried out. The differential equation for the mean line of several fibers deformation of an elastic brush-like screw working body of a horizontal and inclined screw conveyors with a low-speed mode of operation during transportation of bulk material at a loading factor of up to 0.45 was derived and solved numerically.

Based on the solution of the differential equation, it was established that when the fiber diameter decreases from 2.3 mm to 1.7 mm for the same external loads, the fibers are deformed by 5 mm. When the working part of the fibers is increased from 20 mm to 40 mm for the same external loads, the fibers are deformed by 8.6 mm. Therefore, the use of fibers with the longer length of the working part reduces the

load capacity of the elastic brush-like auger, but leads to a decrease in the amount of damage to the seed grain material being transported.

Theoretical studies of the parameters of the interaction of the fibers of the elastic brush-like screw working body with the grain material have been conducted. The equation of the grain equilibrium at the initial contact moment with the fibers of the elastic brush-like screw working body is derived. The contact angle between the grain and the fiber of the screw working body is determined. An equation is derived for finding the permissible external load on the grain, at which the amount of fiber deflection does not exceed the limit value at which the transportation of the grain material is ensured.

It was established that an increase in the contact angle  $\alpha$  between the grain and the fiber leads to a decrease in the value of the external load  $P$ . At an angle  $\alpha=90$  degrees, only frictional forces act on the grain. An increase in the distance  $l_1$  between the centers of round cross-section fibers interacting with the grain leads to a decrease in the load  $P$ , while an increase in the friction coefficients  $\mu_1$  and  $\mu_2$  leads to an increase in the load  $P$ . A significant decrease in the load  $P$  is observed at  $l_1$ , which is equal to the diameter of the grain.

The condition of grain chocking between the fibers of the elastic brush-like screw working body and the inner surface of the casing is determined. It was established that an increase in the contact angle  $\alpha$  between the grain and the fiber and the distance  $l_1$  between the centers of the fibers of a circular cross-section leads to an increase in the probability of the grain being chocked between the fibers of the elastic brush-like helical working body. For the friction coefficient between grain and fiber  $\mu_1 < 0.5$ , the angle  $\alpha$  is in the range from 50 degrees to 90 degrees, and the distance  $l_1$  is from 4 mm to 5 mm with a grain radius of 2 mm.

The critical angle of contact between the grain and the fiber and the critical distance between the centers of the fibers of round cross-section, at which the chocking of the grain occurs, were determined. The ratio of the gap between the fibers and the diameter of the grain, at which chocking of the grain is possible, is established, from which it follows that the greater the friction coefficient  $\mu_1$ , the smaller this ratio is. Thus, for a friction coefficient of  $\mu_1=0.5$ , chocking of the grain is



possible when the ratio of the gap to the diameter of the grain is from 0.75, and for  $\mu_1=0.3$  – from 0.89.

A prototype of a screw conveyor with the possibility of using different casing diameters and variable screw working bodies with elastic surfaces was designed and manufactured (with a continuous chamber-like part, with a peripheral elastic brush-like part, with a brush-like screw part), and with the possibility of controlling the modes of the conveyor operation using a PC through the current frequency converter Altivar 71 with automatic visualization and fixation of the obtained results when studying the transportation performance and the degree of damage to the seed grain material after its movement in the ranges of the rotation frequency of the screw working body from 0 to 511.2 rpm, the inner diameter of the casing from 96 mm to 108 mm and the angle of the conveyor inclination from 0° to 30°.

The results of experimental studies of three different types of screw working bodies with elastic surfaces are presented. For the screw conveyors with variable screw working bodies with elastic surfaces empirical equations for determining productivity and degree of seed grain materials damage during transportation are derived, which is based on the experimental results statistical processing with the help of application software.

The following results were obtained. Productivity during transportation by a screw working body with an elastic continuous chamber-like part was: for barley, the maximum - 6.37 t/h, and the minimum - 3.98 t/h; for corn, the maximum is 6.67 t/h, and the minimum is 4.18 t/h. Increasing the rotation frequency of the screw working body  $n$  from 284 rpm. up to 511.2 rpm. leads to a 1.29 times increase in productivity. At the same time, an increase in the casing diameter from 96 mm to 108 mm provides a 1.11 times increase in productivity, and a change in the angle of inclination of the conveyor from 0 degrees to 30 degrees. leads to a decrease in productivity by 1.12 times.

Productivity during transportation by a screw working body with a peripheral elastic brush-like part was: for barley, the maximum - 6.61 t/h, and the minimum - 3.49 t/h; for corn, the maximum - 6.92 t/h, and the minimum - 3.84 t/h. Increasing the rotation frequency of the screw working body  $n$  from 284 rpm. to the optimal rotation

frequency leads to a productivity increase of 1.25 times for barley (from 430 to 440 rpm) and 1.22 times for corn (from 450 to 480 rpm).

Productivity during transportation by a screw working body with a brush-like screw part was: for barley, the maximum - 4.37 t/h, and the minimum - 1.77 t/h; for corn, the maximum is 5.25 t/h, and the minimum is 2.56 t/h. Increasing the rotation frequency of the screw working body  $n$  from 284 rpm. up to 470...480 rpm. leads to a 1.25 times increase in productivity. At the same time, an increase in the casing diameter from 96 mm to 108 mm provides an increase in productivity by 1.36 times for barley and 1.29 times for corn, and a change in the inclination angle of the conveyor from 0 degrees to 30 degrees. leads to a 1.54 times decrease in productivity for barley and 1.36 times for corn.

It was established that the maximum degree of damage to corn grain during transportation by screw working bodies with elastic continuous chamber-like parts was 0.26%, during transportation by screw working bodies with a peripheral elastic brush-like part - 0.25%, and during transportation by screw working bodies with a brush-like screw part - 0.24%. Damage to corn during its movement by augers with a solid chamber-like element and a peripheral elastic brush-like part is 4.06... 4.32 times lower, and when using an auger with a brush-like element, it is 4.5 times lower than when using conventional rigid augers. Increasing the rotation frequency of the screw working body  $n$  from 284 rpm. up to 511.2 rpm. leads to an increase in the degree of corn grain damage by 1.55 times.

The developed designs of screw conveyors equipped with screw working bodies with elastic surfaces and other types of screw conveyors are protected by nine patents of Ukraine for useful models, and the screw conveyor with an elastic brush-like surface, manufactured on the basis of Ukrainian patent No. 150968, passed successful industrial tests in Country agricultural scientific and production farm "Koval". The annual economic effect from the use of the experimental sample amounted to 6,870 UAH.

**Key words:** screw conveyor, auger, elastic surface, productivity, movement of grain granules, laboratory setup, seed loss, power, flow rate, filling factor, process, simulation, mixer, grain material, force parameters.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Публікації наукових статей, що входять в наукометричну базу Scopus*

1. Lyashuk O. L., Hevko I. B., Hud V. Z., Tkachenko I. G., Hevko O. V., Sokol M. O., Tson O. P., Kobelnyk V. R., Shmatko D. Z., Stanko A. I. Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw - fluid medium" system. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Bucharest/Romania, 2022. Vol. 68, No 3. P. 499-510. (Автором представлено розрахункову схему та обґрунтовано граничні умови для виведення диференціального рівняння коливань системи гвинтовий конвеєр – сипке середовище. Індексується в міжнародній наукометричній базі *SciVerse Scopus*).

### *Публікації у фахових виданнях*

2. Гевко І. Б., Довбуш Т. А., Цьонь О. П., Довбуш А. Д., Станько А. І. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх дослідження. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2021. Вип. 47. С. 63-72. (Автором на основі морфологічного аналізу розроблено ряд конструкцій гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями).

3. Hevko I., Liashuk O., Tson O., Dovbush T., Zalutskiy S., Stanko A. Installation for the investigation of screw working bodies with elastic surfaces and the results of their experimental tests. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2021. Vol. 103. No 3. P. 98–109. (Автором прийнято участь у проведенні та статистичних обробленнях даних експерименту).

4. Станько А.І. Дослідження еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів та розроблення технології їх виготовлення. *Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»*. Луцьк, 2022. Вип. 21. С. 125-131.

5. Гевко І., Станько А., Пік А., Лещук Р., Гурик О. Обґрунтування техніко-економічної ефективності використання гвинтових робочих органів зі щіткоподібною еластичною робочою поверхнею. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія “Агроінженерні*

дослідження”. Львів, 2022. № 26. С. 13-21. (Автором проведено порівняння виготовлення та експлуатації двох гвинтових робочих органів із різними еластичними поверхнями).

6. Diachun A., Hevko I., Stanko A., Korol O., Derysh O. The study of interaction parameters of the elastic brush screw working body fibers with the spherical surfaces of the grain material. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2023. Vol. 109. No 1. P. 32–42. (Автором виведено умову зацемлення зернини між еластичним гвинтовим робочим органом та кожухом гвинтового конвеєра).

#### ***Розділ в колективній монографії***

7. Hevko R., Trokhaniak A., Zalutskyi S., Stanko A. Screw conveyors with elastic surfaces. *Physical and mathematical justification of scientific achievements: collective monograph*. Boston, 2020. P. 80-96. (Автором взято участь у виведенні рівняння для визначення зусилля деформації еластичних секцій гвинтового робочого органу).

#### ***Тези конференцій та семінари***

8. Гевко Р. Б., Довбуш Т. А., Станько А. І. Розробка еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів для транспортування сипких матеріалів з мінімальними їх пошкодженнями. *Міжнародна науково-технічна конференція до 60- річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя* (Тернопіль, 14–15 травня 2020 р.). Тернопіль, 2020. С. 61-62. (Автором запропоновано нові конструкції еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів).

9. Олексюк В. П., Довбуш А. Д., Станько А. І. Застосування еластичних щіткоподібних поверхонь для зниження пошкодження сипких матеріалів при їх транспортуванні гвинтовими робочими органами. *Збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції «Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку» присвячена 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України* (Київ, 7-8 листопада 2019 р.). Київ, 2019. С. 71-72. (Автором обґрунтовано можливість

*використання еластичних щіткоподібних поверхонь для зниження пошкодження сипких матеріалів).*

10. Гевко Р. Б., Станько А. І., Довбуш Т. А. Нові конструкції гвинтових робочих органів з еластичною секцією та щіткоподібними поверхнями. *Збірник тез доповідей Матеріали VI-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020»* (Херсон, 8-12 вересня 2020 р.). Херсон, 2020. С. 280-283. *(Автором запропоновано нові конструкції еластичних гвинтових робочих органів).*

11. Гевко І. Б., Гевко М. Р., Залуцький С. З., Станько А. І. Установа для дослідження параметрів шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями. *Міжнародна науково-технічна конференція присвячена пам'яті професора Гевка Богдана Матвійовича. Проблеми теорії проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин* (Тернопіль, 23-24 вересня 2021 р.). Тернопіль, 2021. С. 69-72. *(Автором взято участь у проектуванні експериментальної установки).*

12. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Цьонь О. П., Станько А. І. Технологія виготовлення еластичних шнеків. *Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні ОТМЕ-2022»* (Івано-Франківськ – Яремче, 1-5 лютого 2022 р.). - Івано-Франківськ, 2022. С. 69-71. *(Автором запропоновано спосіб виготовлення еластичних шнеків).*

13. Станько А. І., Дячун А. Є., Головатий І. В. Дослідження деформації еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів для транспортування сипких матеріалів. *Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. “Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики”*: присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин (Тернопіль, 29-30 вересня 2022 р.). Тернопіль, 2022. С. 177. *(Автором взято участь у виведенні диференціального рівняння деформації волокон щіткоподібних гвинтових робочих органів).*

### *Патенти України*

14. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат. 123753 Україна: МПК В65G 33/14 (2006.01), В65G 33/26 (2006.01), А46В 3/10 (2006.01), А46В 7/10 (2006.01). № а 2019 11228; заявл. 18.11.19; опубл. 19.05.21, Бюл. №20. 7 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

15. Еластичний шнек з розрізними пелюстками: пат. 124326 Україна: МПК В65G 33/16 (2006.01), В65G 33/26 (2006.01). № а202003160; заявл. 26.05.20; опубл. 26.08.21, Бюл. №34. 3 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

16. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат. 142241 Україна: МПК В65G 33/14 (2006.01), В65G 33/26 (2006.01). № u201911236; заявл. 18.11.19; опубл. 25.05.20, Бюл. №20. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

17. Еластичний шнек з розрізними пелюстками: пат. 143343 Україна: МПК В65G 33/14 (2006.01), В65G 33/26 (2006.01). № u202000461; заявл. 27.01.20; опубл. 27.07.20, Бюл. №14. 5 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

18. Гвинтовий змішувач з бункером рівномірного завантаження: пат. 150442 Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01). № u202105716; заявл. 11.10.21; опубл. 11.02.22, Бюл. №7. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

19. Шнековий змішувач: пат. 150443 Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01). № u202105718; заявл. 11.10.21; опубл. 11.02.22, Бюл. №7. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

20. Шнековий змішувач з регульованими отворами просипання: пат. 150445 Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01). № u202105720; заявл. 11.10.21; опубл. 11.02.22, Бюл. №7. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

21. Шнек з еластичним камероподібним елементом: пат. 150763 Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01), В65G 33/16 (2006.01). № u202106203; заявл. 04.11.21; опубл. 13.04.22, Бюл. №15. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

22. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат. 150968 Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01). № u202106202; заявл. 04.11.21; опубл. 18.05.22, Бюл. №20. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>17</b>
<b>РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>23</b>
1.1. Особливості конструкції гвинтових конвеєрів.....	23
1.2. Конструкції робочих органів гвинтових конвеєрів з еластичними поверхнями.....	30
1.3. Аналіз результатів досліджень гвинтових конвеєрів з еластичними гвинтовими робочими органами.....	46
1.4. Висновки.....	54
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛАСТИЧНИМИ ЩІТКОПОДІБНИМИ ГВИНТОВИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ.....</b>	<b>56</b>
2.1. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями.....	56
2.2. Дослідження деформації волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів при транспортуванні зернового матеріалу.....	60
2.3. Обґрунтування параметрів взаємодії волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу із зерновим матеріалом.....	71
2.4. Висновки.....	85
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ШНЕКОВИХ МЕХАНІЗМІВ З ЕЛАСТИЧНИМИ ЗМІННИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ НАСІННЄВИХ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>88</b>
3.1. Програма експериментальних досліджень.....	88
3.2. Параметри шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями для проведення експериментальних досліджень.....	89
3.3. Методика проведення експериментів з визначення продуктивності та ступеня пошкодження насіннєвого зернового матеріалу при їх транспортуванні шнековими механізмами з еластичними змінними поверхнями.....	96

3.4. Методика проведення експериментів з визначення величини максимальної деформації волокон еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною.....	107
3.5. Висновки.....	108
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ..</b>	108
4.1. Результати експериментальних досліджень продуктивності шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями.....	108
4.2. Результати експериментальних досліджень ступеня пошкодження насінневого зернового матеріалу після транспортування гвинтовими конвесрами із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями.....	126
4.3. Результати експериментальних досліджень з визначення величини максимальної деформації волокон еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною.....	135
4.4. Висновки.....	141
<b>РОЗДІЛ 5. ПРОЕКТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ШНЕКОВИХ МЕХАНІЗМІВ З ЕЛАСТИЧНИМИ ЗМІННИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ НАСІННЄВИХ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ .....</b>	145
5.1. Технологічність конструкцій та способи виготовлення гвинтових робочих органів з еластичними робочими поверхнями.....	145
5.2. Перспективні розробки шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями для зменшення ступеня пошкодження зернового матеріалу при його транспортуванні.....	149
5.3. Обґрунтування техніко-економічної ефективності використання гвинтових робочих органів з еластичними робочими поверхнями .....	158
5.4. Висновки.....	165
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	167
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	171
<b>ДОДАТКИ.....</b>	195



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Гвинтові конвеєри широко використовуються у багатьох галузях промисловості, будівництва та сільського господарства як надійні засоби транспортування різних типів сипких матеріалів. Основними перевагами таких конвеєрів є: простота конструкції та надійність, хороші показники точності подачі матеріалу, придатність для забезпечення показників охорони праці та автоматизації, значна гнучкість проектування конструкцій, широке застосування і поєднання додаткових процесів разом із транспортуванням матеріалів.

Подальші вектори проектування та дослідження гвинтових конвеєрів повинні бути спрямованими на усунення недоліків при транспортуванні насінневих зернових матеріалів, пов'язаних із тим, що частинки сипкого зернового матеріалу можуть защемлюватись у просторі між витками гвинтового робочого органу та кожухом, а також із тим, що через наявність зазору між витками шнека та кожухом не забезпечується самоочищення гвинтового конвеєра.

Огляд конструкцій, особливостей роботи різних типів конвеєрів та гвинтових робочих органів надає можливість використання синтезу на основі морфологічного аналізу для пошуку нових варіантів гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями для зменшення пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні.

Дослідженню гвинтових конвеєрів з еластичними гвинтовими робочими органами присвячено значно меншу кількість праць, ніж звичайним гвинтовим конвеєрам з металевими гвинтовими робочими органами, а тому вирішення ряду завдань проектування та практичної реалізації гвинтових конвеєрів з новими еластичними гвинтовими робочими органами, що забезпечують зменшення пошкодження насінневих зернових матеріалів, є актуальними, доцільними, значущими і перспективними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Роботу виконано відповідно до тематики наукового напрямку Тернопільського

національного технічного університету імені Івана Пулюя в рамках науково-дослідної держбюджетної теми «Розробка транспортно-технологічних систем з пружними та еластичними гвинтовими робочими органами» (№ державної реєстрації 0120U101916), яка реалізується в рамках Постанови Кабінету Міністрів України «Про розвиток сільськогосподарського машинобудування і забезпечення агропромислового комплексу конкурентоспроможною технікою».

**Мета роботи і завдання дослідження. Мета роботи** – зниження ступеня пошкодження насінневих зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами шляхом розроблення нових змінних гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями і вибору раціональних конструктивних параметрів та режимів їх роботи.

Для досягнення мети в роботі поставлені та вирішені такі **завдання**:

- провести аналіз конструктивних рішень гвинтових конвеєрів, зокрема гвинтових робочих органів, з оглядом особливостей їх застосування і на цій основі розробити передумови проектування нових гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями для транспортування насінневих зернових матеріалів;
- провести структурний синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями, основним критерієм якого є зменшення пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами у порівнянні із традиційними жорсткими шнеками, використовуючи морфологічний аналіз;
- провести теоретичні та експериментальні дослідження деформації волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів при транспортуванні зернового матеріалу з виведенням рівняння регресії залежності величини максимальної деформації волокон від їх конструктивних параметрів;
- провести теоретичні дослідження параметрів взаємодії волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу із зерновим матеріалом із виведенням теоретичних залежностей навантаження на зернину та умови защемлення зернини у гвинтовому конвеєрі;
- спроектувати та виготовити дослідний зразок гвинтового конвеєра із змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями та

провести експериментальні дослідження з виведенням емпіричних рівнянь регресії, що дають можливість адекватно прогнозувати продуктивність гвинтових конвеєрів із еластичними гвинтовими робочими органами та ступінь пошкодження насіннєвого зернового матеріалу;

- провести обґрунтування техніко-економічної ефективності використання гвинтових робочих органів з еластичними робочими поверхнями.

**Об'єкт дослідження** – процеси транспортування насіннєвих зернових матеріалів гвинтовими конвеєрами із змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу конструктивних параметрів та режимів роботи гвинтових конвеєрів із змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями на їх продуктивність та ступінь пошкодження насіннєвих зернових матеріалів при транспортуванні.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проведено з використанням основних положень теоретичної механіки, диференціального числення, чисельних методів розв'язку диференціальних рівнянь, опору матеріалів, морфологічного аналізу та інженерної творчості. Апробацію розроблених математичних моделей проведено методами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень із застосуванням спеціальної установки. Планування та статистичну обробку результатів експериментальних досліджень проведено на основі стандартних методик із використанням прикладного програмного забезпечення.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- одержало подальший розвиток дослідження деформації волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів при транспортуванні зернового матеріалу з розв'язком диференціального рівняння для середньої лінії деформації декількох волокон та виведенням емпіричного рівняння регресії величини максимальної деформації волокон, які дозволяють визначати конструктивні параметри волокон;

- вперше встановлено взаємозв'язок конструктивних параметрів волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів із силовими навантаженнями на зернини із елементами сферичних поверхонь;

- вперше на основі виведених аналітичних залежностей визначено умову защемлення зернини між волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу та внутрішньою поверхнею кожуха;

- вперше встановлено емпіричні закономірності впливу конструктивних параметрів та режимів роботи гвинтових конвеєрів із змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями на їх продуктивність та ступінь пошкодження насіннєвих зернових матеріалів при транспортуванні.

**Практичне значення отриманих результатів.** Проведено структурний синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями з метою пошуку конструктивних рішень для зменшення пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами у порівнянні із традиційними жорсткими шнеками, використовуючи морфологічний аналіз з ієрархічним групуванням конструктивних ознак. Одержано та виготовлено нові конструкції гвинтових робочих органів, що відповідають меті синтезу, зокрема з щіткоподібною гвинтовою частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, із суцільною камероподібною частиною.

Розроблені конструкції гвинтових конвеєрів оснащених гвинтовими робочими органами із еластичними поверхнями та інших видів гвинтових конвеєрів захищені дев'ятьма патентами України на корисні моделі, а гвинтовий конвеєр з еластичною щіткоподібною поверхнею, що виготовлений на основі патенту України № 150968, пройшов успішні промислові випробування у Селянському фермерському науково-виробничому господарстві «Коваль». Річний економічний ефект від використання дослідного зразка склав 6870 грн.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати кваліфікаційної роботи здобувачем отримано особисто. В одноосібній праці та працях, що опубліковані у співавторстві, проведено теоретичні [194, 207, 191, 53] дослідження гвинтових конвеєрів оснащених гвинтовими робочими органами із

еластичними поверхнями, здійснено синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями [143], розроблено дослідні взірці та технології їх виготовлення [178, 140, 72, 98, 160, 158], представлено результати їх експериментальних досліджень [143, 178, 140, 160], запатентовано нові конструкції гвинтових конвеєрів [111-119], обґрунтовано техніко-економічну ефективність використання гвинтових робочих органів з еластичною робочою поверхнею [100].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались й обговорювались на: II Міжнародній науково-практичній конференції «Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку» присвяченій 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України (м. Київ, 2019); Міжнародній науково-технічній конференції до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2020); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020» (м. Херсон, 2020); Міжнародній науково-технічній конференції присвяченій пам'яті професора Гевка Богдана Матвійовича. Проблеми теорії проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин (м. Тернопіль, 2021); X Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні ОТМЕ-2022» (м. Івано-Франківськ, 2022); Міжнародній науково-практичній конференції “Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики”: присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибка Тимофія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин (м. Тернопіль, 2022).

Робота доповідалась й отримала позитивний відгук на розширеному засіданні науково-технічного семінару Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

**Публікації.** Результати наукових досліджень викладено у 22 наукових працях, з них – 5 статей у фахових виданнях України, 1 стаття – у закордонному виданні, що індексується у наукометричній базі **Scopus**, 1 розділ

в колективній монографії, 9 патентів України на корисні моделі, 6 тез наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 217 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації 207 сторінок, в тому числі 166 сторінок основного тексту, 77 рисунків, 13 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1. Особливості конструкцій гвинтових конвеєрів

Гвинтові конвеєри широко використовуються у багатьох галузях промисловості, будівництва та сільського господарства, як надійні засоби транспортування різних типів сипких матеріалів. Основними перевагами таких конвеєрів є:

- простота конструкції та надійність. Наявність тільки декількох рухомих частин і компактні габаритні розміри в поперечному перерізі надають можливість створювати простіші за конструкцією системи подачі сипких матеріалів, що надійні при експлуатації;

- хороші показники точності подачі матеріалу. Важливою особливістю гвинтових конвеєрів є забезпечення точного контролю подачі сипких матеріалів. При тихохідному режимі роботи гвинтових конвеєрів і частоті обертання шнека менше 80 об/хв. продуктивність гвинтового конвеєра прямо пропорційна частоті обертання шнека;

- придатність для забезпечення показників безпеки, екології та охорони праці. Гвинтові конвеєри можуть бути сконструйовані із захистом від впливу зовнішнього середовища, а також дозволяють уникати проблеми витоків пилу, його загоряння та вибуху;

- значна гнучкість проектування конструкцій. Шнеки та кожухи гвинтових конвеєрів легко проектувати для під'єднання до різних завантажувальних бункерів та місць вивантаження матеріалу у виробничій зоні за рахунок зміни довжини секцій конвеєра та кутів їх нахилу. Тому такі конвеєри забезпечують гнучкий вибір для різних систем подачі сипких матеріалів.

- широке застосування. Витки шнеків можна модифікувати для різних додаткових виробничих процесів, наприклад, зрізані витки, гофровані витки, витки з лопатками або їх комбінації можуть використовуватись для

попереднього дроблення кускових включень у матеріалі, змішування та сепарації сипких матеріалів.

Поряд із перевагами основними причинами недоліків гвинтових конвеєрів є наступне: через наявність відносного руху сипких матеріалів та робочих елементів конвеєра знижується механічна ефективність транспортування сипких матеріалів; через наявність зазору між витками шнека та кожухом не забезпечується самоочищення гвинтового конвеєра; частинки сипкого матеріалу можуть защемлюватись у просторі між витками та кожухом і пошкоджуватись чи руйнуватись.

Теоретичним та експериментальним дослідженням, що пов'язані з визначенням конструкційних, динамічних, кінематичних параметрів, особливостей експлуатації при транспортуванні різноманітних сипких матеріалів гвинтовими конвеєрами, присвячено значну кількість наукових праць та практичних рекомендацій [2-20, 23-26, 28-49, 52-57, 63-65, 70-72, 76, 77, 80-95, 98, 100, 101, 103, 120-124, 126-145, 150-154, 156-158, 160, 162, 164-182, 185, 187-207].

На основі аналізу літературних та патентних джерел встановлено, що значний вклад у наукові дослідження гвинтових конвеєрів, гвинтових робочих органів, бункерів, особливостей переміщення сипких матеріалів здійснили П.М. Василенко [6-8], Б.М. Гевко [14-18, 94, 206], Р.М. Рогатинський [11, 37, 57, 94, 95, 121, 131-138, 144, 173, 202], М.І. Пилипець [103, 122, 123], Р.Б. Гевко [33-36, 98, 140, 141, 170-172, 185, 190, 191, 196], В.С. Ловейкін [83-86, 87-89], І.Б. Гевко [10, 11, 15, 19-32, 37, 40, 41, 55, 57, 65, 82, 95, 103, 121, 127, 128, 134, 136, 143-145, 152, 153, 156, 158, 160, 169, 178-182, 194, 195, 198, 200, 202, 205, 207], О.Л. Ляшук [17, 32, 56, 64, 90-92, 101, 121, 151, 158, 166, 170, 172, 175, 177, 179-181, 194-196, 198, 201, 204, 206], О.О. Налобіна [66, 96, 97, 192], В.В. Васильків [9], І.Я. Стадник [99, 115, 159], В.З. Гудь [40, 41, 45, 65, 95, 121, 127, 145, 151, 182], В.Ф. Дідух [1, 50, 51, 67, 161], В.М. Барановський [2, 175], О.Р. Дмитрів [40, 41, 83-86, 95, 130, 133, 151, 179], В.Р. Паньків [172, 175, 185], А.М. Григор'єв [42], Х. Герман [38], А.Є. Дячун [11, 15, 17, 24, 26, 29-32, 37, 39, 43, 44, 53-57, 63, 64, 90, 91, 101, 121, 128, 131, 134, 136-139, 144, 152-154, 156, 157, 179, 182, 200-202, 205, 206], Р.Я. Лещук [40, 41, 81, 82, 100, 179, 181], Д.Л. Серілко [142], С.З. Залуцький [12, 34-36, 70, 71, 141, 160, 170, 171, 178, 190,



191], Р.С. Грудовий [11, 15, 24, 39, 43, 44, 55, 128], М.Б. Клендій [77, 157, 185], В.В. Красніков, Д.А. Дерев'янюк [47-49], О.М. Троханяк [165, 170, 175, 191, 193, 196], Р.І. Owen, Р.В. Cleary, Y. Tian, Р. Yuan, F. Yang, A. Zaica, A. Visan, С. Rorres та багато інших науковців.

Основними параметрами при проектуванні та виборі гвинтових конвеєрів є: тип та умови транспортування сипких матеріалів, що піддаються транспортуванню, включаючи максимальний розмір частинок та густину матеріалу; продуктивність транспортування сипкого матеріалу; необхідна дистанція та кут нахилу транспортування сипкого матеріалу; конструктивні вимоги, такі як матеріал конвеєра, умови подачі матеріалу, температура середовища при експлуатації.

Найпоширенішими є горизонтальні гвинтові конвеєри (рис. 1.1) з широкою областю поперечних розмірів, довжин, конфігурацій та матеріалів конструкції. Вони спроектовані для транспортування матеріалів в основному з коефіцієнтом завантаження конвеєра 0,15, 0,30, 0,45 залежно від характеристик матеріалу, зокрема від питомої густини. Конвеєри із коефіцієнтом завантаження 0,45 використовуються для транспортування легких, не абразивних матеріалів, що легко переміщуються; із коефіцієнтами завантаження 0,15 та 0,30 – для транспортування сипких матеріалів більшої густини та з абразивними властивостями.



Рис. 1.1. Типовий горизонтальний гвинтовий конвеєр фірми KWS [215]

Рекомендоване місце розташування приводу конвеєра – зі сторони вивантажувального патрубку. При такій схемі кожна частина шнека піддається навантаженням на розтяг при транспортуванні матеріалу, що призводить до зменшення зношення та втомного руйнування компонентів конвеєра. Ідеально підходить для транспортування сипких, в'язких та напіврідких сипких

матеріалів, ефективно розподіляючи сипкі матеріали до багатьох локацій, використовуючи декілька отворів для завантаження та вивантаження матеріалів.

У конструкціях нахилених гвинтових конвеєрів (рис. 1.2) кожух розміщено під кутом до горизонтальної позиції. При збільшенні кута нахилу конвеєра знижується його ефективність; при цьому зростають затрати потужності транспортування через більший вплив сили тяжіння та зворотне пересипання матеріалу. В загальному ефективність конвеєра залежить від кута нахилу, характеристик сипкого матеріалу, типу кожуха конвеєра та кроку витків шнека. При нахилі конвеєра до 10 градусів втрати ефективності транспортування є мінімальними. У таких випадках можливе використання конвеєрів з U-подібним жолобом та повним кроком витків. Втрати ефективності можна компенсувати за рахунок збільшення швидкості обертання шнека, збільшення діаметра шнека та зменшення кроку витків шнека. При нахилі конвеєра між 10 та 20 градусів втрати ефективності транспортування знаходяться в межах від 10% до 40%. Також можливе використання конвеєрів з U-подібним жолобом, проте з 2/3 повного кроку витків шнека. При нахилі конвеєра від 20 до 30 градусів зниження ефективності можливе від 10% до 70%. Для таких конвеєрів використовуються трубчасті кожухи і шнеки із зменшеним кроком витків (1/2 або 2/3). При нахилі конвеєра від 30 градусів до 45 градусів зниження ефективності транспортування знаходиться в межах від 30% до 90%. Для таких конвеєрів також використовуються трубчасті кожухи і шнеки із зменшеним кроком витків (1/2 або 2/3) проте більшого діаметра та із більшою частотою обертання.



Рис. 1.2. Використання нахилених гвинтових конвеєрів [215]

Вертикальні гвинтові конвеєри (рис. 1.3) ефективні при транспортуванні сипких матеріалів під великим кутом нахилу або повністю вертикально. Деякі



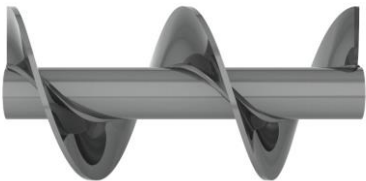
Рис. 1.3. Типовий вертикальний гвинтовий конвеєр фірми KWS [215]

виробники (KWS) розглядають гвинтові конвеєри, які розміщені під кутом більше 45 градусів, як вертикальні конвеєри. Компактна конструкція такого конвеєра дозволяє його розміщувати майже на всіх проектах виробничих зон. Такий конвеєр із мінімальною кількістю рухомих частин є економічно ефективним та надійним компонентом будь якого процесу переміщення сипких матеріалів. Продуктивність може досягати до 170 м<sup>3</sup>/год. У конструкціях довжиною до 9 метрів не використовуються додаткові опори з підшипниками. Для підвищення ефективності таких конвеєрів для їх завантаження використовуються додаткові горизонтальні гвинтові конвеєри.


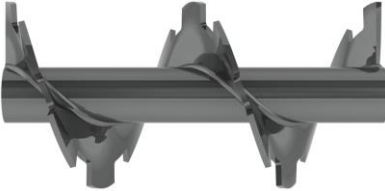

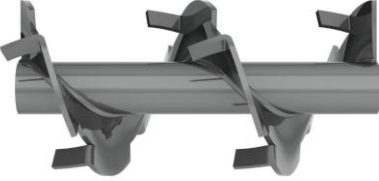

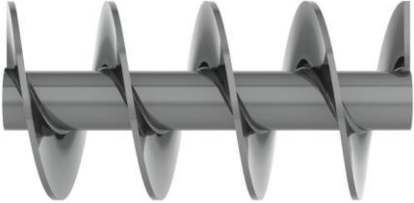

Основні типи гвинтових робочих органів гвинтових конвеєрів представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1


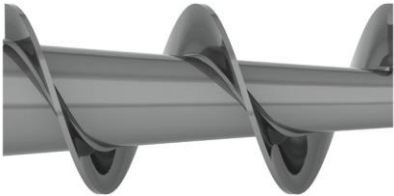
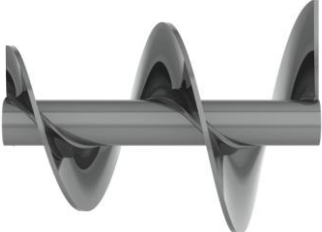
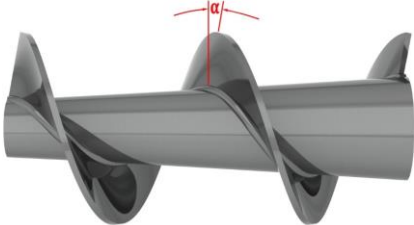

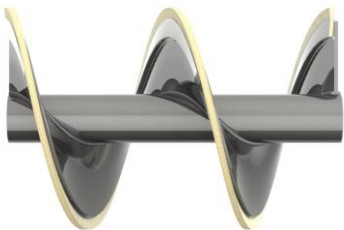
Основні типи гвинтових робочих органів [216]

Загальний вигляд гвинтового робочого органу	Опис
1	2
	<p><b>Стандартні витки.</b> Якщо крок витків дорівнює діаметру витків, то такі шнеки прийнято як стандартні і використовуються у більшості звичайних горизонтальних гвинтових конвеєрах.</p>

Продовження таблиці 1.1

1	2
	<p><b>Стрічкові витки</b> з підтримуючими опорами використовуються для транспортування в'язких та схильних до налипання матеріалів, що створюють нарости в зонах взаємодії витків та кожуха.</p>
	<p><b>Витки із вирізами</b> використовуються для змішування різних матеріалів в процесі їх транспортування. Різна конфігурація вирізів дозволяє у більшій чи меншій мірі матеріалам просипатись та інтенсивно змішуватись при транспортуванні.</p>
	<p><b>Витки із змінним кроком</b> використовуються для контролю кількості матеріалу, що захоплюється вздовж отвору бункера. Збільшуючи крок на кожному витку вздовж шнека можна поступово збільшувати об'єм матеріалу, що потрапляє на шнек.</p>
	<p><b>Витки із вирізами та загинами</b> забезпечують інтенсивніший процес змішування. При цьому матеріал, що проходить через вирізи, піднімається та змішується з матеріалом, що переміщується слідом. Також їх можна використовувати при необхідності аерації та охолодження матеріалів.</p>
	<p><b>Пустотілі витки</b> використовуються з метою подачі рідин для охолодження або нагрівання матеріалу, що транспортується.</p>
	<p><b>Витки із коротким кроком</b> використовуються у нахилених конвеєрах для підвищення їх ефективності та для контролю подачі матеріалу з бункера.</p>
	<p><b>Двозахідні витки</b> використовуються для пришвидшення процесу транспортування в місцях завантаження із бункера та вивантаження. Зазвичай використовуються у шнеках для буріння для зрівноважування сил різання.</p>

Продовження таблиці 1.1

1	2
	<p><b>Лопатки гвинтової форми</b> встановлюються навколо круглої або квадратної центральної труби, формуючи сегментні спіралі. Використовуються у змішувальному та місильному обладнанні, коли до сипкого матеріалу додається рідина.</p>
	<p><b>Витки із конусним валом</b> забезпечують поступове зростання робочого об'єму шнека. Забезпечують однорідне завантаження шнека при повному бункері. У комбінації із змінним кроком забезпечують найкращу можливість рівномірного захоплення матеріалу із бункера, при цьому можна використовувати стандартні кожухи.</p>
	<p><b>Конічні витки</b> забезпечують поступове зростання робочого об'єму шнека. Забезпечують однорідне завантаження шнека при повному бункері. Потребують застосування конічних кожухів.</p>
	<p><b>Компресійні витки</b> забезпечують поступове зростання робочого об'єму шнека. Забезпечують стиснення матеріалу під час транспортування. Зазвичай витки нахилені вперед для протидії силам, що виникають в процесі стиснення матеріалу. Також використовуються для зневоднення та фільтрації матеріалів.</p>
	<p><b>Витки без валів</b> використовуються для транспортування в'язких та схильних до налипання матеріалів, що створюють нарости в зонах взаємодії витків та кожуха або волокнистих матеріалів, що схильні намотуватись на витки.</p>
	<p><b>Еластичні витки</b> використовуються для транспортування крихких елементів та матеріалів, схильних до пошкодження.</p>

## 1.2. Конструкції робочих органів гвинтових конвеєрів з еластичними поверхнями

У технологічних процесах транспортування сипких матеріалів в агропромисловому виробництві гвинтові конвеєри з різними типами робочих органів знайшли широке застосування при переміщенні зернових, насінневих матеріалів, гранульованих мінеральних добрив та ін. При їх транспортуванні в замкнутих як жорстких, так і еластичних кожухах, вони зазнають значних пошкоджень, що не відповідає агротехнічним вимогам. До основних причин травмування сипкого матеріалу є попадання його частинок в зазор між обертовою гвинтовою поверхнею робочого органу та нерухомою внутрішньою поверхнею направляючого кожуха. З метою уникнення цього недоліку досить часто поверхню шнека виконують з еластичних матеріалів [109-114], що зображено на рис. 1.4 та 1.5 [140].

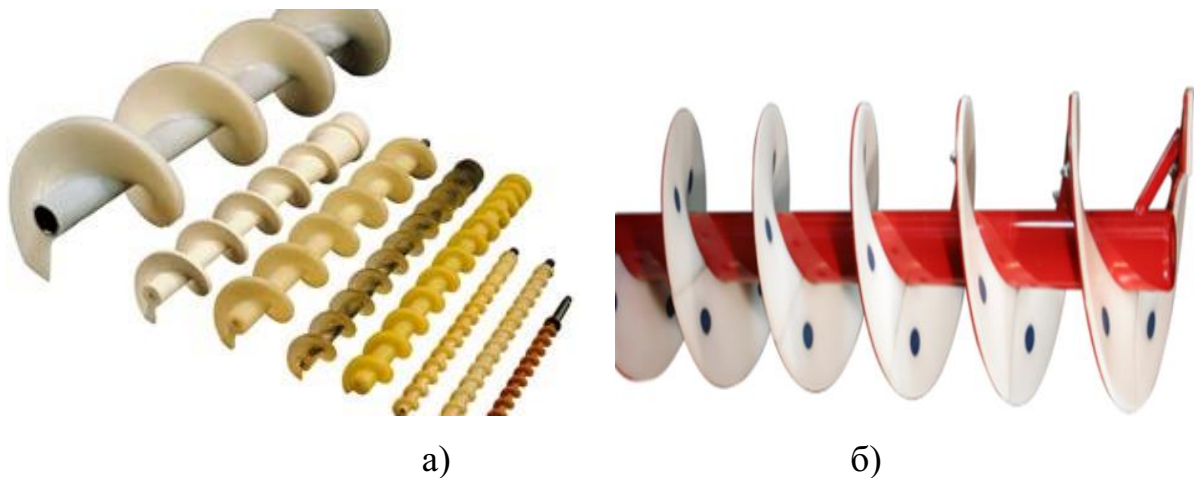


Рис. 1.4. Робочі органи компанії «WAMGroup» з полімерним покриттям гвинтових витків (а), компанії «LundellPlasticsCorp» з полімерними спіральними накладками на гвинтових витках (б)

Полімерні покриття гвинтових ребер сприяють збільшенню їх ресурсу роботи, однак не забезпечують суттєвого зниження пошкоджень сипких матеріалів.

Одним з напрямків забезпечення мінімізації пошкоджень зернових та насінневих матеріалів є застосування на периферійній поверхні спіралей шнеків щіткоподібних еластичних елементів, що зображено на рис. 1.5.

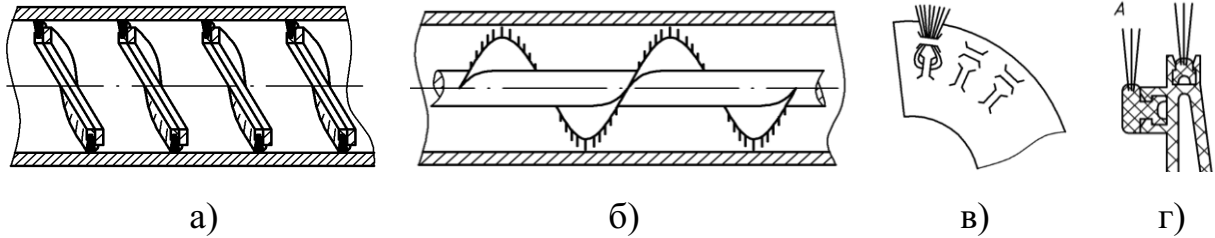


Рис. 1.5. Схеми еластичних гвинтових робочих органів: а - патент Франції №0067725; б - патент Німеччини №4001121; в - А.С. №1652230; г - А.С. №1613404

Такі робочі органи мають ряд недоліків, а саме підвищену трудомісткість при їх виготовленні, а також та низькі функціональні показники та ремонтпридатність.

У патенті Китаю CN209956835U «Щітковий гвинтовий конвеєр» (рис. 1.6) вказано, що звичайні гвинтові конвеєри можуть в нормальних умовах транспортувати лише певний один тип матеріалів. Це пов'язано із наявністю зазору між гвинтовим робочим органом та кожухом. Якщо транспортувати різні типи матеріалів, то частина з них переміщуються не повністю і залишається у кожуху. Після зупинки конвеєра частина матеріалу на нижній частині кожуха може формувати тверді блоки, що впливають на наступне транспортування матеріалу після чергового запуску конвеєра.

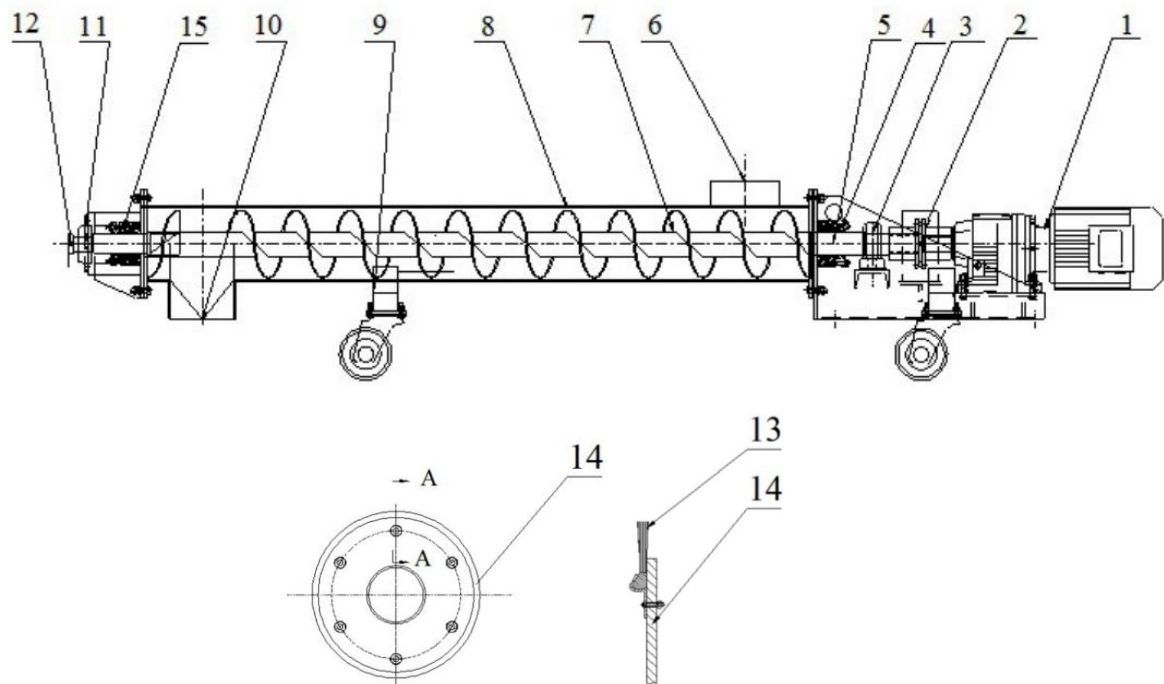


Рис. 1.6. Патент Китаю CN209956835U

Тому звичайні гвинтові конвеєри потребують додаткового очищення, що впливає на ефективність автоматизації процесів транспортування матеріалів. При використанні щіткових гвинтових робочих органів гвинтові конвеєри можна використовувати для транспортування різноманітних матеріалів, уникаючи утворення залишків у кожусі, а також для змішування матеріалів, що транспортуються в певному порядку. У конструкції конвеєра рис. 1.6 до основних металевих витків 14 гвинтового робочого органу прикріплено за допомогою затискачів та болтів стрічку із щітковими елементами 13.

У патенті Німеччини DE102005053082A1 (рис. 1.7) представлено гвинтовий конвеєр для завантаження зернових матеріалів на сільськогосподарські машини. У конвеєрі використано гвинтовий робочий орган, що складається із основної металевої гвинтової частини 3 та додаткової частини 16 більшого діаметру у вигляді гвинтового щіткового елемента із нейлону або поліуретану. Використовується для транспортування круп або сушених фруктів. Забезпечує одночасне транспортування матеріалу та його очищення від пилу та лущиння через змінне сито 15 із потраплянням у бункер 14.

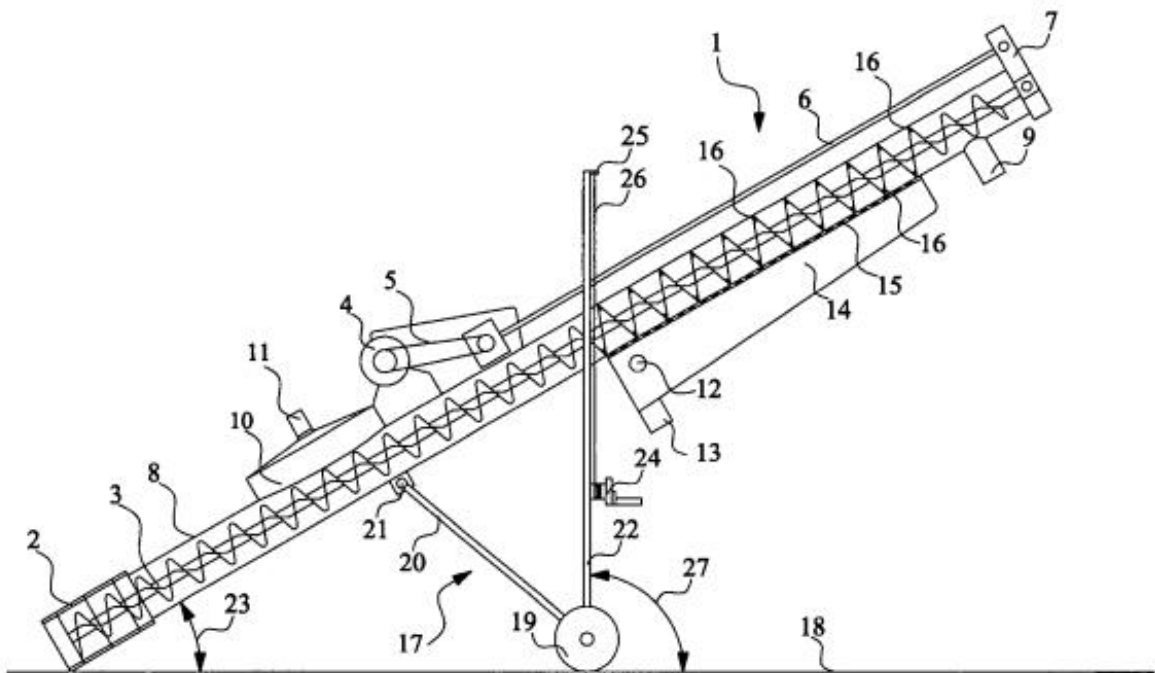


Рис. 1.7. Патент Німеччини DE102005053082A1



Гвинтовий робочий орган патенту США 5,573,660 (рис. 1.8) використовується для транспортування сипких матеріалів та сформований у вигляді шнека без валу із декількох гвинтових стрічок, на зовнішній із яких закріплено щітковий елемент 57 та чохол 39, які взаємодіють із внутрішньою поверхнею кожуха.

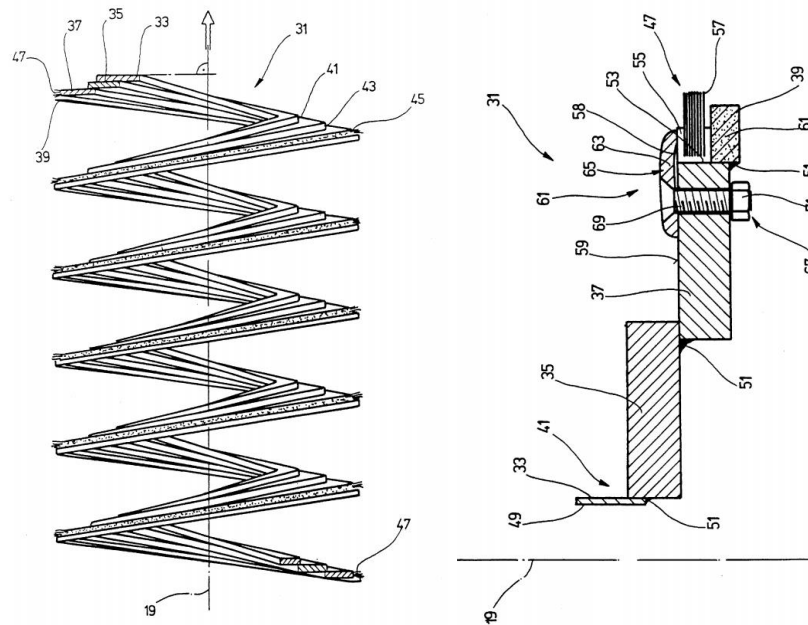


Рис. 1.8. Патент США 5,573,660

Гвинтовий робочий орган та кожух може виготовлятися з металу або пластмаси. Довжина таких конвеєрів може досягати 40 м з діаметром від 20 до 2000 мм. Встановлено, що продуктивність гвинтового конвеєра у багатьох випадках значно залежить від кута нахилу кожуха. Зокрема, при куті нахилу конвеєра більше 35 градусів матеріал просипається через внутрішній отвір гвинтового робочого органу, що виконаний без валу; при цьому продуктивність транспортування може впасти до нуля. Виконання ступінчастого гвинтового робочого органу із щітковим елементом дозволяє збільшити кут нахилу конвеєра при транспортуванні сипкого матеріалу.

Гвинтовий конвеєр патенту Південної Кореї KR100941923B1 (рис. 1.9) призначений для усунення твердих домішок із рідин. Основними елементами є сітчастий барабан та гвинтовий робочий орган, виготовлений без вала. На

зовнішній поверхні гвинтового робочого органу розміщено щіткові елементи, які забезпечують одночасну подачу матеріалу та очищення отворів сітчастого барабана. Запропоновано два варіанти кріплення щіткових елементів. У першому з них щіткові елементи 202 закріплюються у спеціальних тонколистових капсулах 201 із фіксацією за допомогою притискачів 300 та болтів. У другому варіанті щіткові елементи виконані у вигляді окремих блоків 11 із полімерних матеріалів, що закріплюються за допомогою болтів на боковій стороні металевого гвинтового робочого органу. Щітки складаються із набору волокон і дротів, виготовлених із синтетичних гумових матеріалів та металу. Для фіксації щіток в отворі використовуються методи плавлення струмами високої частоти, термічні методи або склеювання.

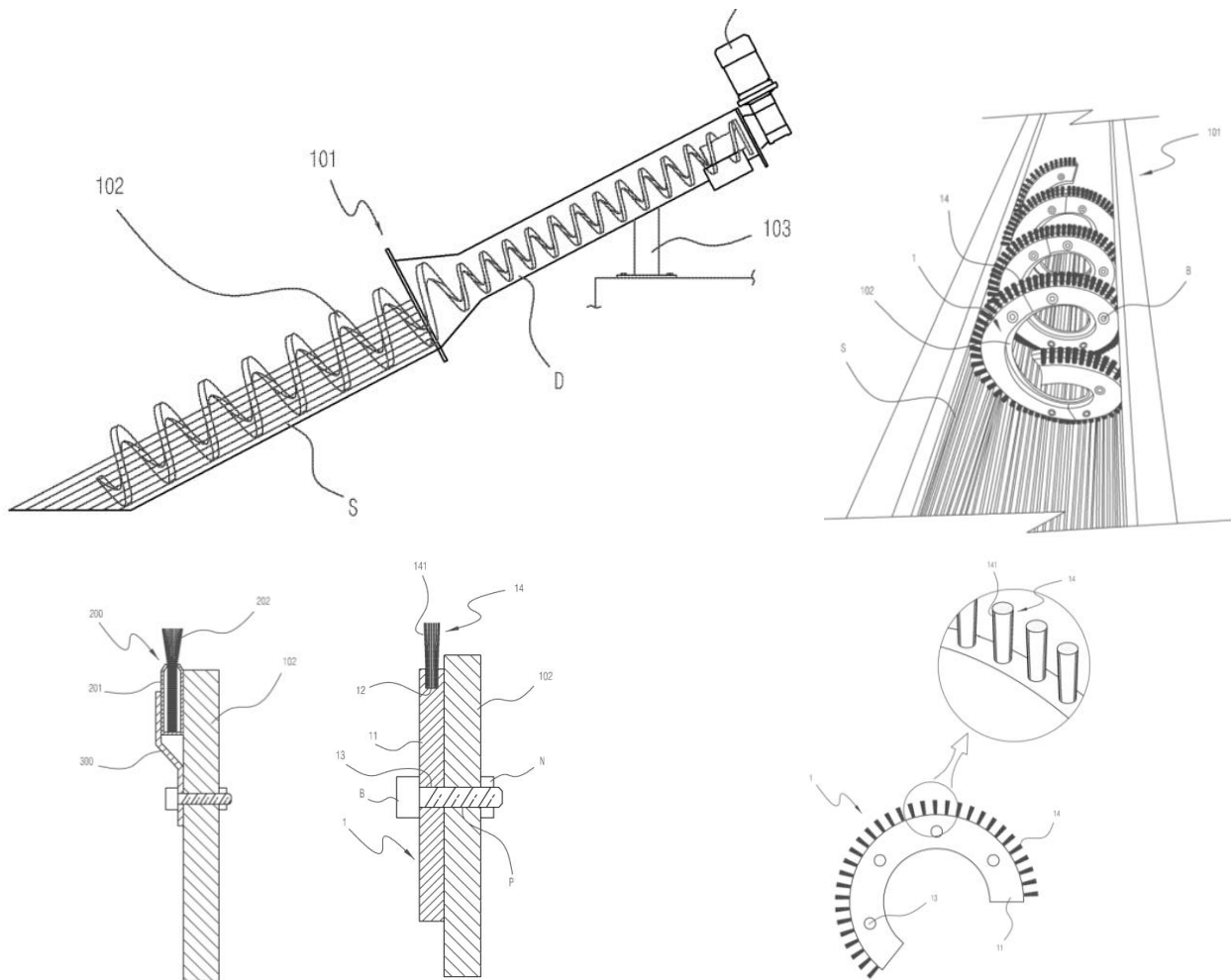


Рис. 1.9. Патент Південної Кореї KR100941923B1

Гвинтовий конвеєр патенту Китаю CN209411039U (рис. 1.10) призначений для транспортування зерен рису без їх пошкодження завдяки розміщеному по контуру гвинтового робочого органу 11 щіткового елемента 10 у вигляді розрізних шарів м'якого пластику, що дозволяє усунути зазор між внутрішньою поверхнею кожуха та гвинтового робочого органу. Також зменшенню пошкодження зерен сприяє спеціальна форма вивантажувального патрубку 3, що зменшує ударні навантаження на зерна.

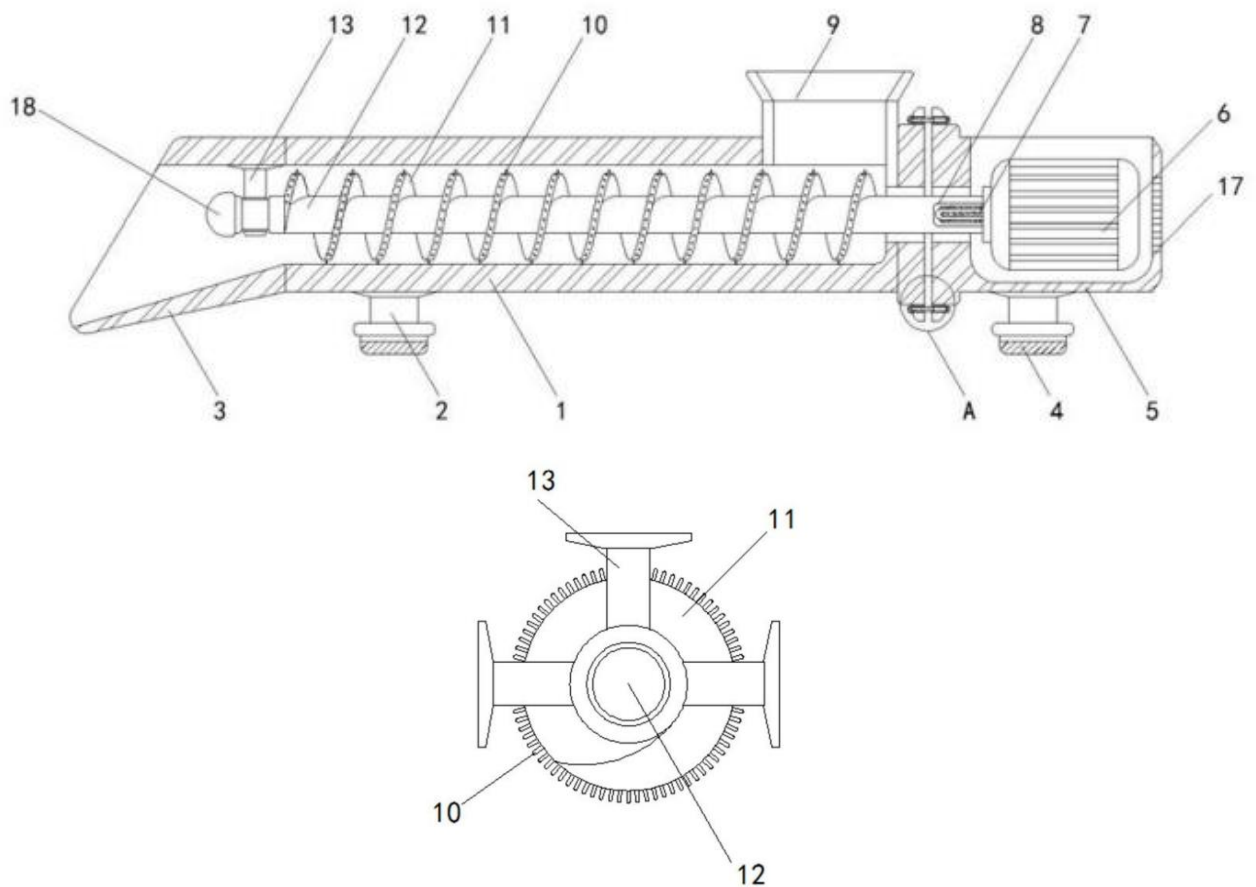


Рис. 1.10. Патент Китаю CN209411039U

Перевагою гвинтового конвеєра патенту Китаю CN109592316B (рис. 1.11) є забезпечення функції очищення витків гвинтового робочого органу після транспортування сипких матеріалів. Забезпечення цієї функції здійснюється за рахунок використання щіткового елемента 411, що розміщений на кільці 41 на внутрішній поверхні кожуха 1. Кільце 41 складається із декількох сегментів і встановлюється разом із щітковими елементами на гвинтовий робочий орган

при виникненні необхідності його очищення. При повертанні витків гвинтового робочого органу щіткові елементи переміщуються вздовж внутрішньої поверхні кожуха.

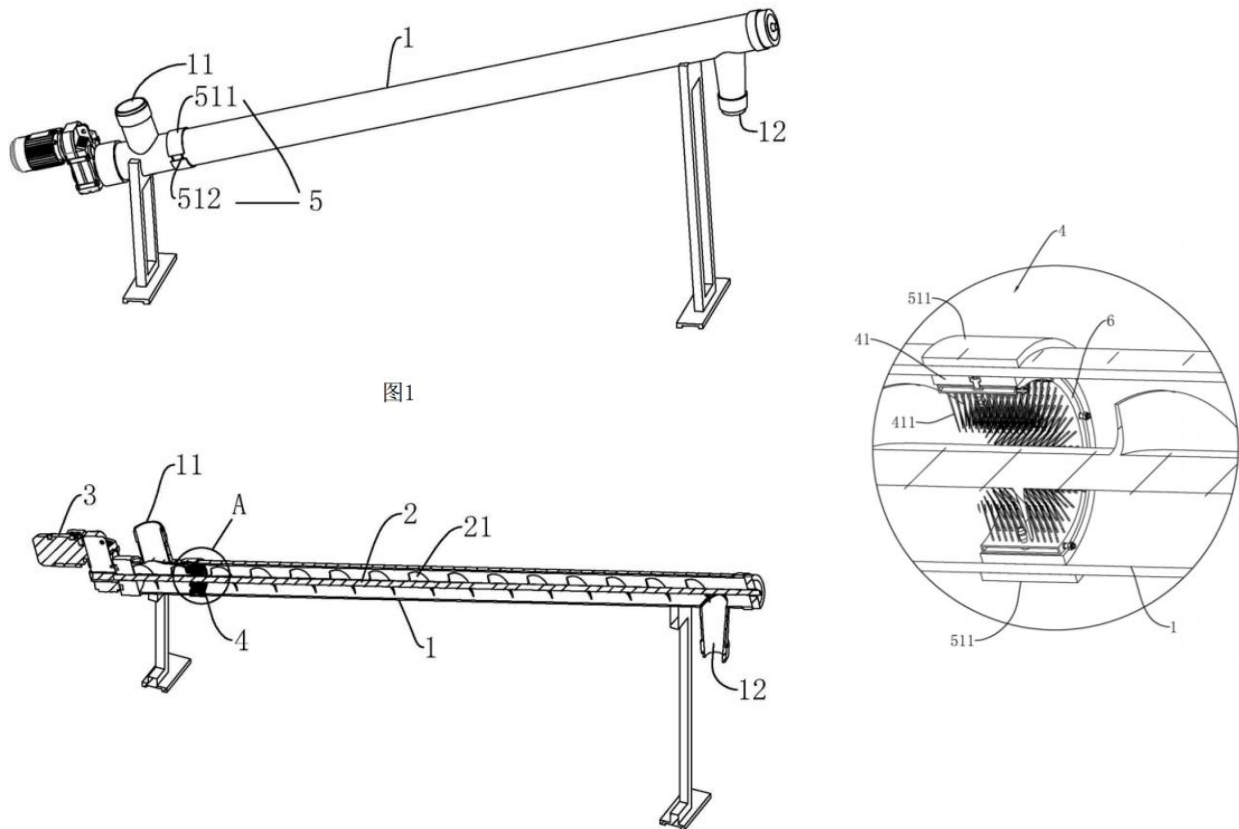


Рис. 1.11. Патент Китаю CN109592316В

У патенті України UA 69808 (рис. 1.12) на витках гвинтового робочого органу закріплено заклепками накладки 6 з полімерного матеріалу із ділянкою зменшеної жорсткості в зоні контакту з кожухом конвеєра. Накладки дозволяють зменшити коефіцієнт тертя між зерновим матеріалом та гвинтовою поверхнею, а також знизити відсоток травмованих зерен за рахунок зменшеного зазору між витком та кожухом конвеєра.

У гвинтовому конвеєрі з патенту України UA 75314 (рис. 1.13) металевий гвинтовий робочий орган 6 огорнутий спеціальною еластичною зносостійкою плівкою 7 з повітряним проміжком 9. Таке виконання робочого органу дозволяє зменшити ударні навантаження на зерновий матеріал, що транспортується.

Крім того, форма плівки адаптується відповідно до зазору між гвинтовим робочим органом та внутрішньою поверхнею кожуха, що дозволяє зменшити ймовірність защемлення зернин і відповідно їх пошкодження.

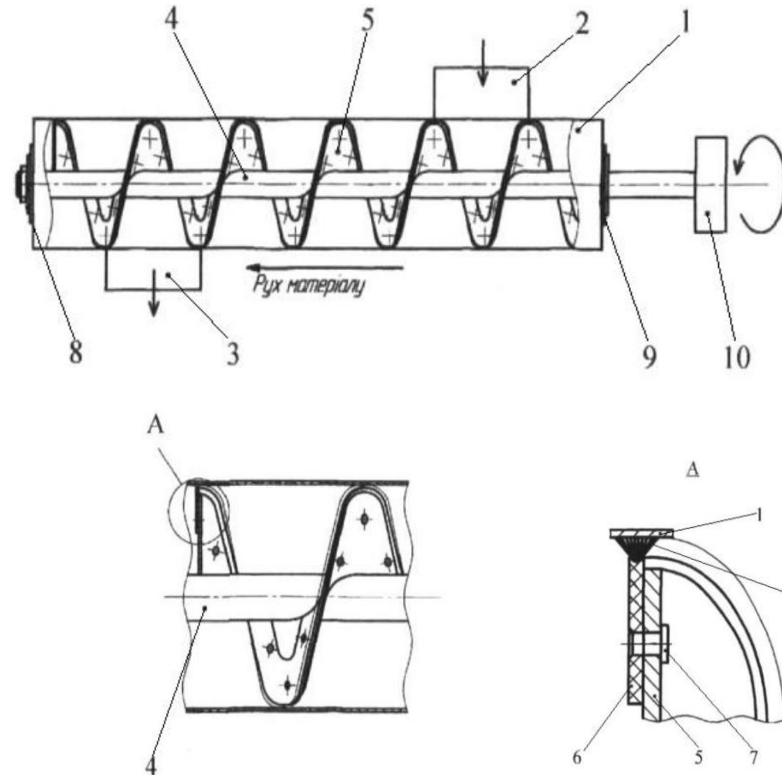


Рис. 1.12. Гвинтовий конвеєр, патент України UA 69808

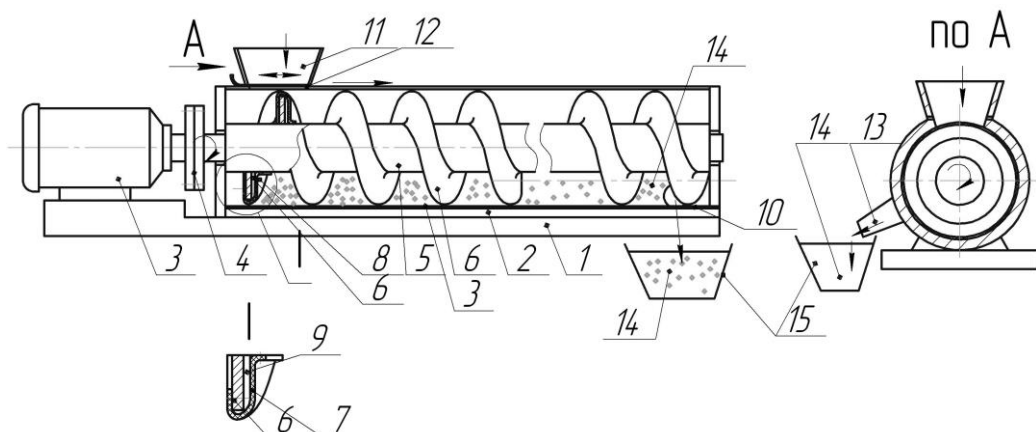


Рис. 1.13. Гвинтовий конвеєр, патент України UA 75314

У конструкції гвинтового конвеєра патенту України UA 75313 (рис. 1.14) посередині між двома спареними витками гвинтового робочого органу та на їх

периферійній поверхні розміщено полімерний еластичний елемент 7 з метою зменшення травмування насінневого матеріалу при транспортуванні на зберігання, протруювання, покриття захисними матеріалами, завантаження у різні ємності з метою висівання. Досягається зменшення зазору між гвинтовим робочим органом та поверхнею кожуха.

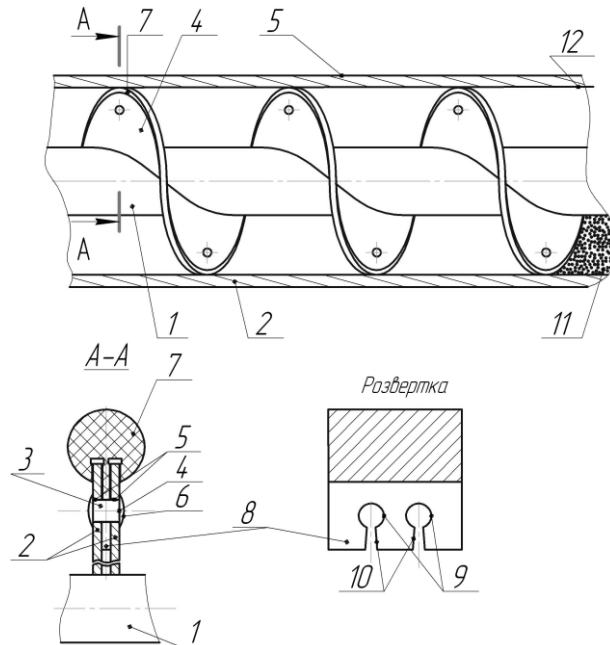


Рис. 1.14. Гвинтовий конвеєр, патент України UA 75313

Основними елементами гвинтового робочого органу з еластичними секціями (рис. 1.14) є вал 1 із привареною навитою гвинтовою стрічкою 2, до котрої за допомогою болтів 5, гайок 6 із граверними шайбами та гвинтових секційних пластин 4 прикріплено еластичні секції 3, виготовлені із полімерних матеріалів, зокрема поліуретану. Еластичні секції формують гвинтову робочу поверхню для подачі зернового матеріалу. Між периферійною поверхнею еластичних секцій та внутрішньою поверхнею кожуха зберігається мінімальний зазор, що наближається до нуля.

На рис. 1.15 представлено різні виконання еластичних секцій, зокрема із накладанням пелюстків (рис. 1.15 б), із зазором між пелюстками (рис. 1.15 в), у вигляді сегментів (рис. 1.15 г), які закріплено на стик або із накладанням (рис. 1.16). За рахунок зниженої жорсткості еластичних секцій при потраплянні та

защемленні зернин у зазорі між кожухом та гвинтовим робочим органом в процесі транспортування відбувається прогин пелюстків або частини периферійної поверхні за рахунок сил подачі матеріалу та сил тертя. Зусилля прогину еластичних секцій є меншим за зусилля пошкодження зернового матеріалу, тому ступінь пошкодження матеріалу є нижчим ніж при транспортуванні звичайними сталевими шнеками.

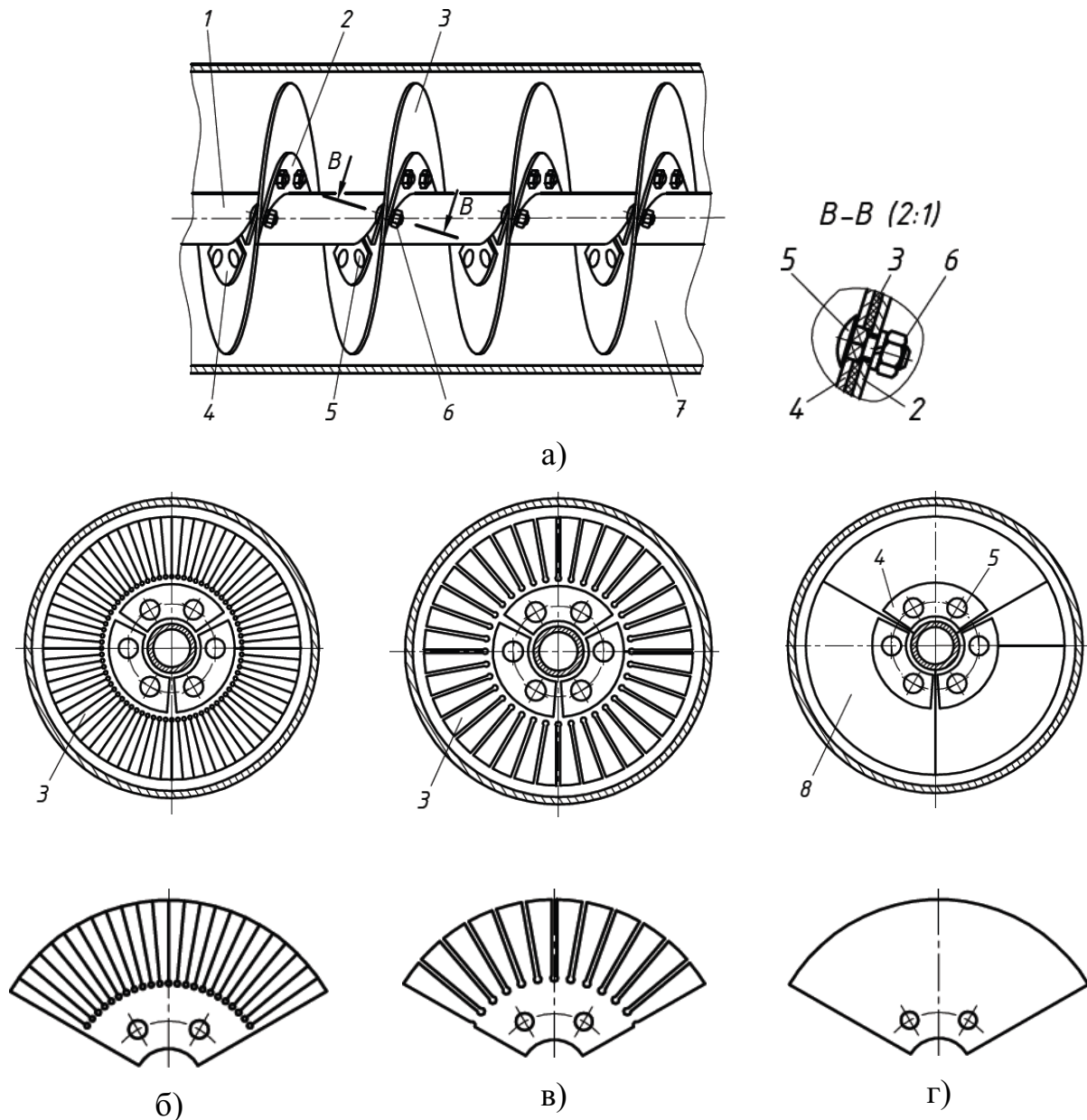


Рис. 1.15. Гвинтовий робочий орган з еластичними секціями: а) загальний вигляд; б) виконання еластичної секції з накладанням пелюстків; в) виконання еластичної секції із зазором між пелюстками; г) виконання еластичної секції у вигляді сегментів [70]

Геометричні параметри еластичних секцій розраховують залежно від властивостей зернового матеріалу, що транспортується, а також матеріалу самих секцій. До переваг також відноситься можливість швидкої заміни секцій у випадку їх зношення.

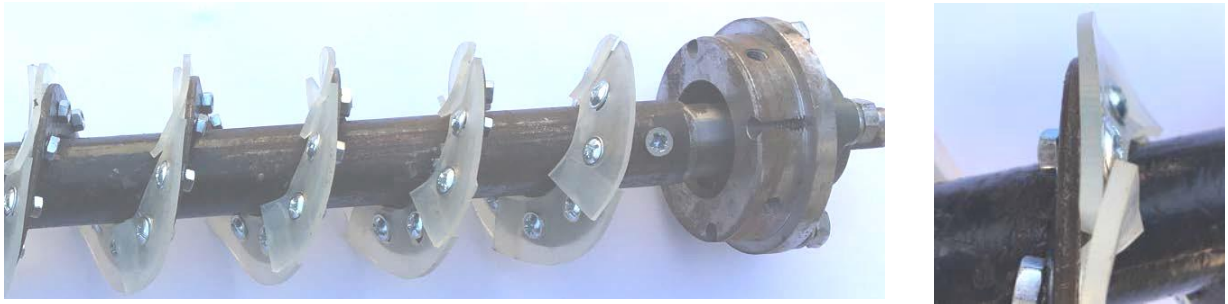


Рис. 1.16. Гвинтовий робочий орган із накладними еластичними секціями з поліуретану [70]

У роботі [70] для дослідження величини прогину еластичних секцій гвинтового робочого органу під дією зовнішнього навантаження залежно від геометричних параметрів секції розроблено спеціальний пристрій, що зображений на рис. 1.17. Такий пристрій також використано в подальших дослідженнях дисертації. Навантажування здійснювалось за допомогою мірних вантажів з одночасним вимірюванням величини прогину еластичних секцій.

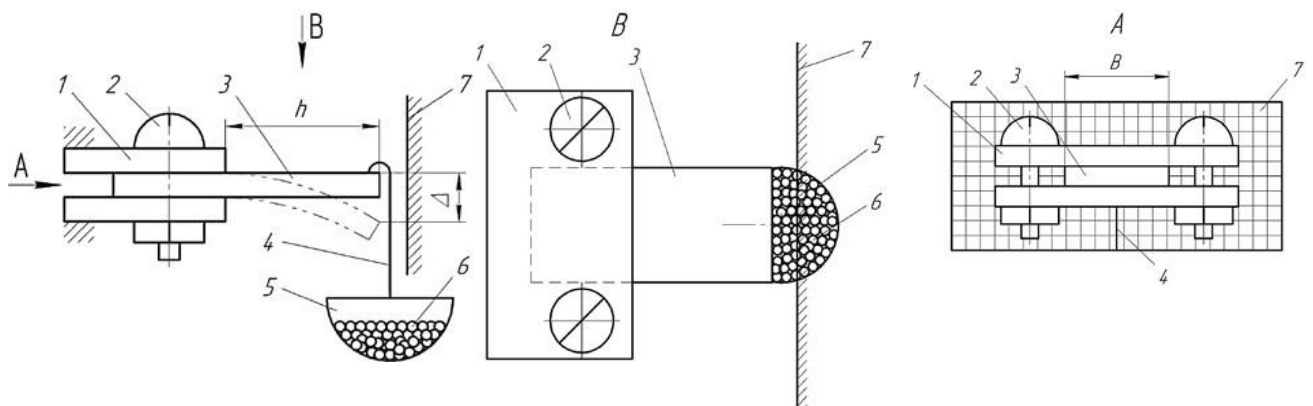


Рис. 1.17. Пристрій для дослідження величини прогину еластичних секцій гвинтового робочого органу [70]

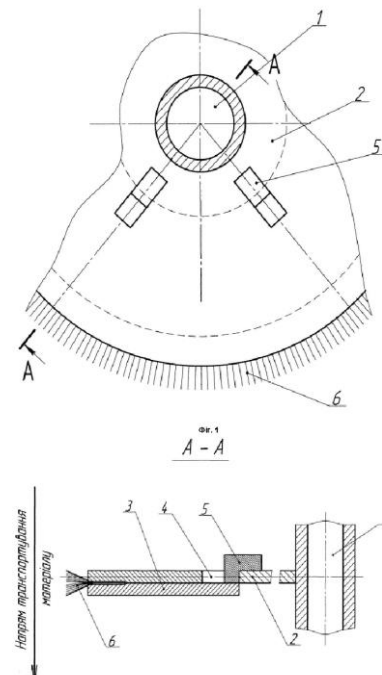
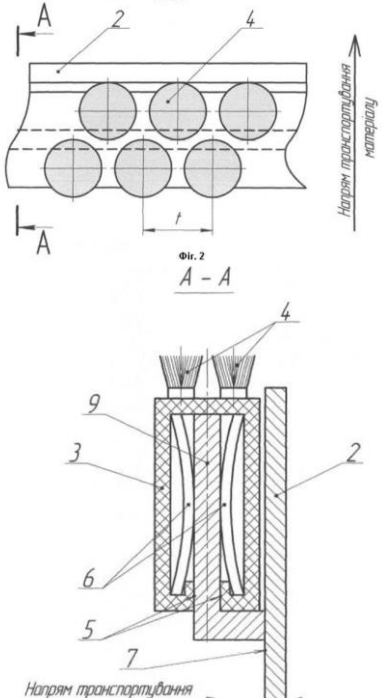
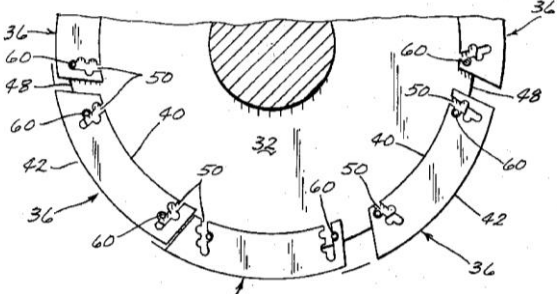
Короткий огляд патентів гвинтових конвеєрів, що використовуються для транспортування зернових насінневих матеріалів, представлено у таблиці 1.2.



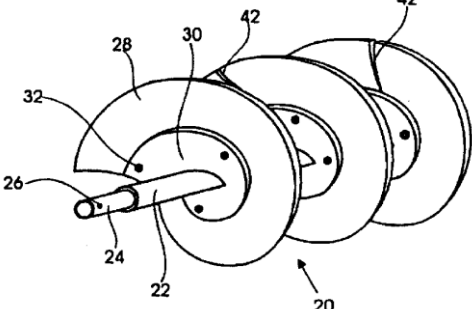
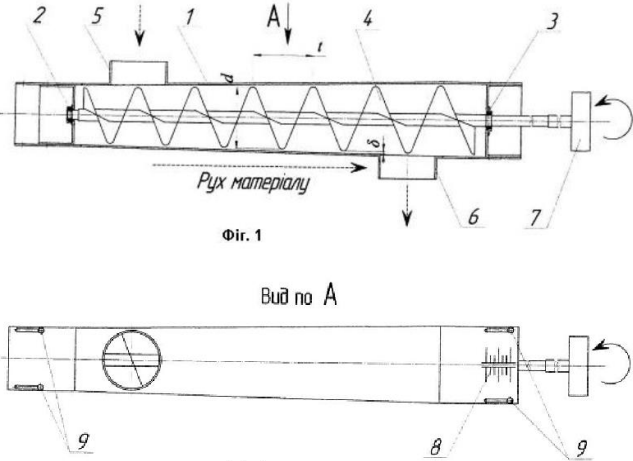
Огляд патентів гвинтових конвеєрів, що використовуються для транспортування зернових насінневих матеріалів

Назва і номер патенту	Схема гвинтового конвеєра	Коротка характеристика
1	2	3
<p>1. Гвинтовий робочий орган із волокнистим матеріалом (пат. USA 4,192,418)</p>		<p>Забезпечує зниження ступеня пошкодження зернового матеріалу</p>
<p>2. 3 периферійною гнучкою стрічкою (а.с. 1645220)</p>		<p>Забезпечує зниження ступеня пошкодження зернового матеріалу: 1 – вал; 2 - внутрішні базові витки; 3 - периферійна гнучка стрічка</p>
<p>3. 3 еластичними витками (пат. України UA 19506)</p>		<p>Зменшення пошкодження зернового матеріалу; володіє можливістю забезпечення змінної жорсткості</p>

Продовження таблиці 1.2

1	2	3
<p>4. Із щіткоподібним елементом (пат. України UA 69998)</p>		<p>Забезпечує зниження ступеня пошкодження зернового матеріалу</p>
<p>5. Із двома рядами щіткоподібних елементів (пат. України UA 70000)</p>		<p>Забезпечує зниження ступеня пошкодження зернового матеріалу із збереженням продуктивності транспортування</p>
<p>6. Із регульованими зовнішніми накладками (пат. USA 4,398,607)</p>		<p>Забезпечення регулювання зазору між гвинтовим робочим органом та внутрішнім діаметром кожуха</p>

## Продовження таблиці 1.2

1	2	3
7. Із еластичними периферійними витками (пат. USA 5,687,732)		Забезпечує зниження ступеня пошкодження зернового матеріалу
8. Із конічним гвинтовим робочим органом (пат. України UA 58312)		Забезпечується регулювання зазору між шнеком та кожухом

Компанія Sudenga представила на ринку гвинтові конвеєри із шнеками з щітковими елементами, один з яких представлено на рис. 1.18. За даними компанії такі шнеки підтримують високу продуктивність транспортування без пошкодження насінневих зерен.



Рис. 1.18. Шнек із щітковими елементами компанії Sudenga

Стальні основні витки забезпечують переміщення матеріалу, тоді як нейлонові волокна забезпечують прогинання на кромці витків, де зазвичай відбувається пошкодження матеріалу. Доступні діаметри від 4 дюймів до 8 дюймів з продуктивністю від 90 до 2600 бушелів за годину. Рекомендується для транспортування насіння бобових із забезпеченням їх цілісності, проте не рекомендовано використовувати разом із міндобривом.

Одним із загальних розв'язків проблеми зменшення зазору між гвинтовим робочим органом та внутрішньою поверхнею кожуха є обрамлення кромки зовнішнього діаметра витків спеціальними полімерними екструдованими вставками, що запропоновано компаніями POBCO, Screw Flight Australia, BulkNet's Australian, KWS. Таке рішення дозволяє забезпечувати мінімальні зазори між шнеком та кожухом без ризику виникнення контакту між металом кожуха та металом шнека. Параметри обрамлення представлено на рис. 1.19.

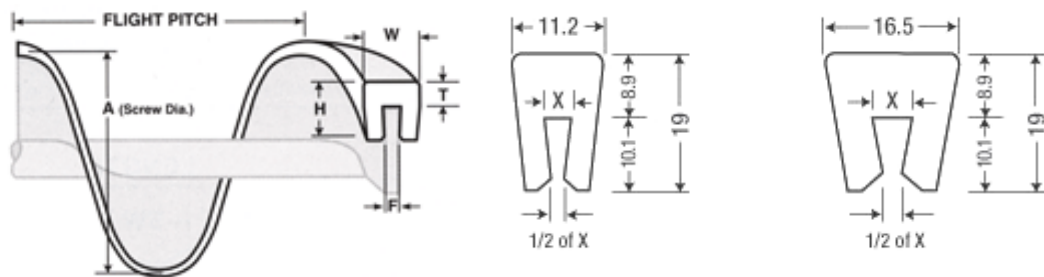


Рис. 1.19. Обрамлення кромки зовнішнього діаметра витків шнека спеціальними полімерними екструдованими вставками [212]

Матеріалом обрамлення кромки витків є високомолекулярний поліетилен, проте доступні інші варіанти матеріалу залежно від вимог до застосування. Розміри шнеків, для яких виготовляються полімерні вставки, знаходяться в межах діаметра від 6 до 36 дюймів, товщини витків до 3/8 дюйма.

Перевагами такого обрамлення є підвищення ефективності гвинтового конвеєра, а також воно може використовуватись як напрямна в місцях необхідного встановлення проміжних підшипників. При цьому, полімерні вставки виконують роль підшипників ковзання. При встановленні на кромку витків вставка закріплюється одним болтом на базовому витку (рис. 1.19).

Компанією Maljohn представлено полімерні вставки із щітковими елементами (рис. 1.20) для встановлення на периферії витків шнека, при цьому щіткові елементи розміщено на сталюму каналі в середині полімеру. Рекомендовано використовувати для транспортування матеріалів, що легко піддаються травмуванню звичайними металевими шнеками.



Рис. 1.20. Спеціальна полімерна вставка із щітковими елементами для встановлення на периферії витків шнека компанії Maljohn [214]

В роботі [135] запропоновано конструкцію шнекових транспортерів, де робочий орган виконано із еластичних матеріалів. Перевагами такого робочого органу (рис. 1.21) є його відносно мала маса, невисока вартість, менша

матеріалоємність і основне – зменшення травмування матеріалів під час транспортування.

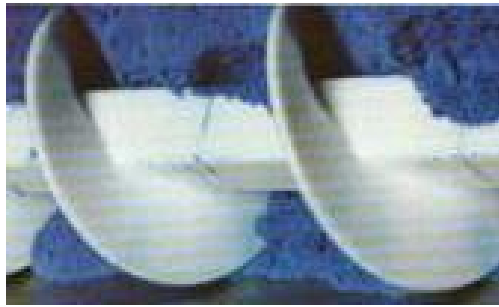


Рис. 1.21. Гвинтовий еластичний робочий орган

### 1.3. Аналіз результатів досліджень гвинтових конвеєрів з еластичними гвинтовими робочими органами

Дослідженню гвинтових конвеєрів з еластичними гвинтовими робочими органами присвячено значно меншу кількість праць, ніж звичайним гвинтовим конвеєрам з металевими гвинтовими робочими органами.

У статті Tian Y., Yuan P., Yang F., Gu J. та ін. [197] проведено дослідження вертикального гвинтового конвеєра з гнучкими дискретними гвинтовими витками (рис. 1.22) для вирішення проблеми захоплення сипкого матеріалу між шнеком та внутрішньою поверхнею кожуха, що характерна для звичайних гвинтових конвеєрів. На основі теоретичного аналізу виведено математичну модель для знаходження потужності транспортування матеріалу, що перевірена методами комп'ютерного моделювання та експериментальними дослідженнями.

Представлено формулу для визначення довжини волокон:

$$l = \frac{\pi d_s^2}{4} \sqrt{\frac{E\pi}{dN_1}}, \quad (1.1)$$

де  $d_s$  – діаметр волокна, знаходиться в межах від 0,5 мм до 2,5 мм;  $E$  – модуль пружності матеріалу волокна;  $dN_1$  - зусилля деформації волокна.

При цьому встановлено рекомендовані довжини волокон від 1,5 мм до 39 мм.

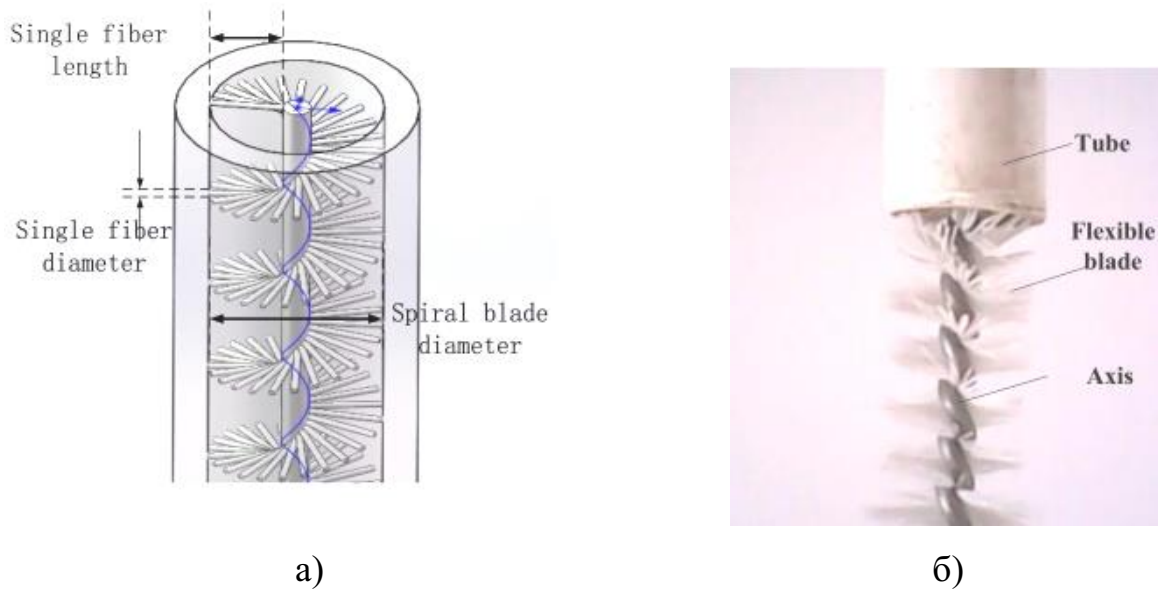


Рис. 1.22. Гвинтовий робочий орган з гнучкими дискретними витками:  
а) комп'ютерна модель; б) експериментальний зразок [197]

Використано поняття коефіцієнта дискретності волокон гвинтового робочого органу:

$$\lambda = \frac{d_j}{d_s + d_j}, \quad (1.2)$$

де  $d_j$  - середня відстань між двома послідовними волокнами.

Потужність транспортування сипкого матеріалу гвинтовим робочим органом з дискретними витками представлено як суму потужностей, що затрачуються на тертя між транспортованим матеріалом та волокнами, на тертя між матеріалом та внутрішньою поверхнею кожуха, та на тертя між волокнами і внутрішньою поверхнею кожуха.

Для комп'ютерного моделювання процесу транспортування сипкого матеріалу вертикальним гвинтовим конвеєром використано метод дискретних елементів (рис. 1.23 і рис. 1.24). Максимальний кут нахилу витків 30 градусів, діаметр витків 70 мм, максимальна відстань між волокнами витка 1 мм, гвинтовий робочий орган довжина 150 мм обертається із частотою до 800 об/хв. Кількість частинок сипкого матеріалу 10000.

Швидкість переміщення частинок становила від 100 мм/с (для кута нахилу витків 10 град.) до 1200 мм/с (для кута нахилу витків 30 град.). У роботі

визначено, що збільшення кута нахилу витків підвищує ефективність транспортування сипкого матеріалу. Встановлено, що для частоти обертання вертикального гвинтового робочого органу 200 об/хв. не відбувається осьове переміщення частинок матеріалу вздовж осі кожуха.

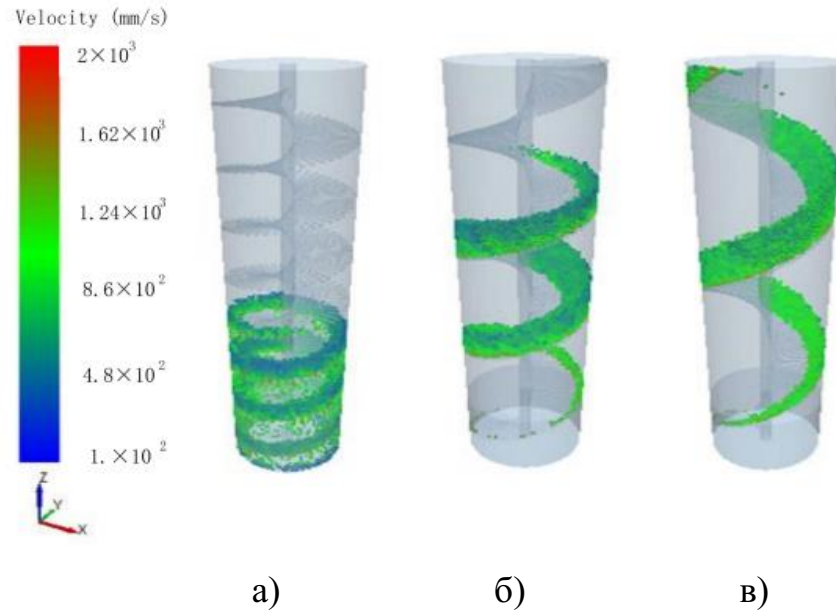


Рис. 1.23. Моделювання процесу транспортування сипкого матеріалу вертикальним гвинтовим конвеєром метод дискретних елементів з визначенням лінійної швидкості частинок матеріалу: а) кут нахилу витків 10 град.; б) кут нахилу витків 20 град.; в) кут нахилу витків 30 град. [197]

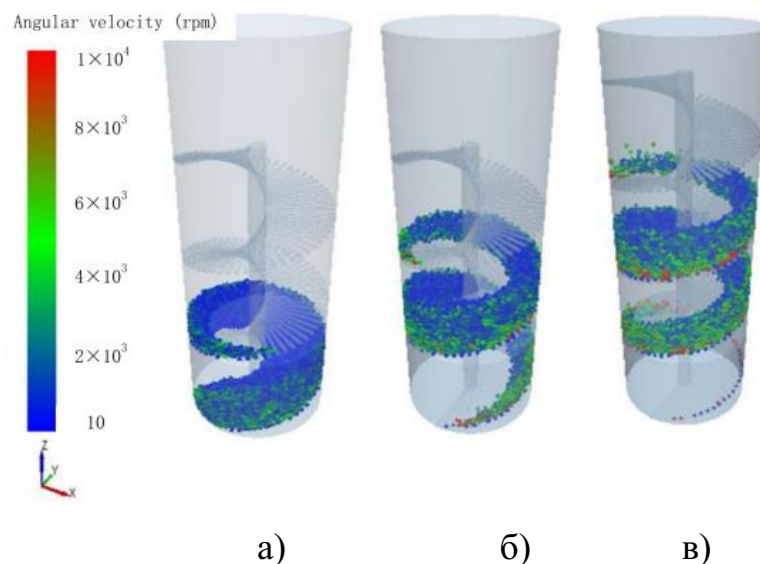


Рис. 1.24. Моделювання процесу транспортування сипкого матеріалу вертикальним гвинтовим конвеєром метод дискретних елементів з визначенням кутової швидкості частинок матеріалу: а) частота обертання робочого органу 200 об/хв.; б) частота обертання робочого органу 600 об/хв.; в) частота обертання робочого органу 800 об/хв. [197]



У дослідженнях Zaica A., Visan A., Paun A., Olan M. та інших [167, 176, 203] розглянуто процес нанесення захисного покриття на поверхню насіннєвого матеріалу, використовуючи спеціальну установку (рис. 1.25), одним із головних елементів конструкції якої є гвинтовий конвеєр із гвинтовим робочим органом з щітковими елементами. Установка складається із рами 1, бункера 2, розпилювального барабана 3 (в середині якого розміщено розподільний диск), розпилювача рідини 4, гвинтового конвеєра 5, бака із рідиною 6 та системи управління 7. Фото спеціальної установки та результати процесу нанесення покриття насіннєвого матеріалу представлено на рис. 1.26 та рис. 1.7 Щітки гвинтового робочого органу виготовлені із віскозних волокон і забезпечують одночасне транспортування та однорідне покриття насіннєвого матеріалу спеціальною рідиною.

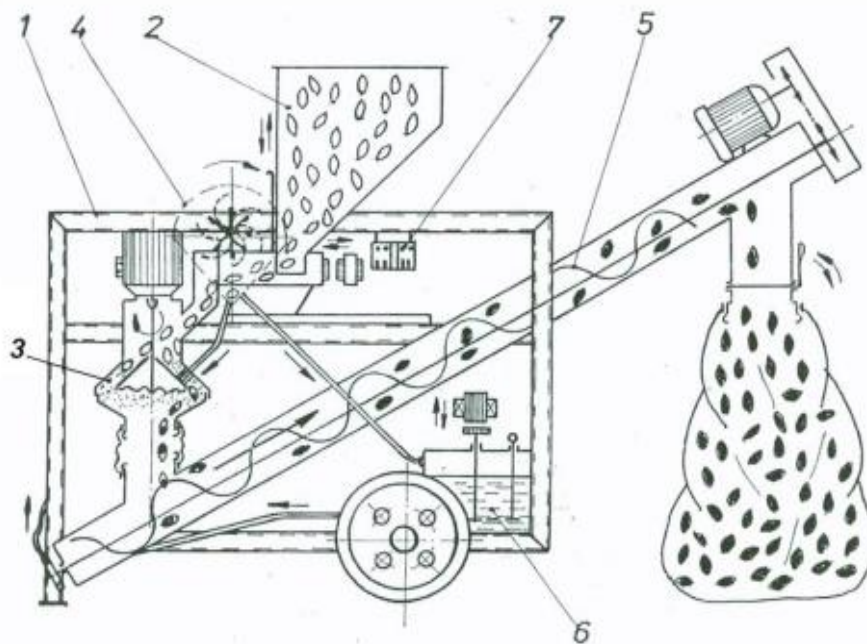


Рис. 1.25. Схема установки для нанесення захисного покриття на поверхню насіннєвого матеріалу [167, 176, 203]

Частота обертання гвинтового робочого органу становила від 110 об/хв. до 282 об/хв. Ступінь покриття насіннєвого матеріалу становив від 50,8% до 65,6%. Найкращі результати одержано при частоті обертання гвинтового робочого органу 282 об/хв.



а)



б)

Рис. 1.26. Спеціальна установка для нанесення покриття насінневого матеріалу: а) загальний вигляд; б) гвинтовий робочий орган з щітковими елементами [167, 176, 203]



Рис. 1.27. Результат нанесення покриття насінневого матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з щітковими елементами [167, 176, 203]

Неправильне транспортування зернових насінневих матеріалів може призвести до значного зниження їх якості. На ринку існує велика кількість різних типів конвеєрів для переміщення насінневих матеріалів у вигляді насипних вантажів. Проте існує обмежена кількість інформації щодо пошкоджень зернових матеріалів, які використовуються для сівби, внаслідок транспортування різними конвеєрами.

У роботі Manjit K. Misra, Yuh-Yuan Shyu, Leopoldo Baudet, Stephen J. Marley [168] досліджено продуктивність шести різних конвеєрів при транспортуванні насінневого матеріалу сої з визначенням їх впливу на пошкодження зерен. В результаті опитування 66 виробників сої встановлено, що 25,8% виробників для транспортування сої використовують гвинтові конвеєри із стальними шнеками; 24,2% - стрічкові конвеєри, 19,7% - гвинтові конвеєри із шнеками з гумовими витками в зоні завантаження; 15,2% - пневматичні конвеєри; 10,6% – ковшові конвеєри; 3% - інші типи конвеєрів; 1,5% не використовують конвеєри. Крім вказаних конвеєрів також проведено дослідження гвинтового конвеєра із шнеком, на периферійній поверхні якого закріплено полімерну стрічку із щітковими елементами з нейлону. Металева основа забезпечувала міцність шнека, а щітковий елемент забезпечував переміщення зерен.

При дослідженнях кути нахилу конвеєрів становили  $15^\circ$  та  $30^\circ$ , кількість проходів матеріалу – 2. Вологість насіння становила 10,7% та 14,8%. Вага переміщеного матеріалу при кожному експерименті – 500 кг. Зразки зерен відбирались на вході та виході конвеєрів. Якість насінневих зерен оцінювалась за наявністю їх руйнування, проростання та пошкодження оболонки. Зруйновані зерна відбирались способом просіювання. Дослідження проростання висіяних 100 зерен проводилось протягом 7 днів при температурі  $25^\circ \text{C}$  із наступним записом відсотків зерен, що проросли. Для визначення пошкодження оболонки зерен здійснювалось замочування 100 зерен в 1% розчині гіпохлориду натрію протягом 10 хвилин. Зерна із пошкодженими оболонка набухали більше ніж непошкоджені зерна.

При куті нахилу конвеєрів  $30^\circ$  продуктивність ковшового конвеєра, гвинтового конвеєра із стальними шнеком та пневматичного конвеєра була майже однаковою і становила 62 т/год.; продуктивність гвинтового конвеєра із шнеками з гумовими витками в зоні завантаження становила 58 т/год.; гвинтового конвеєра із шнеком з щітковими елементами - 54 т/год.; стрічкового конвеєра - 50 т/год.

Найбільший приріст руйнувань зерен сої спостерігався при застосуванні гвинтового конвеєра із стальними шнеком - 0,56%. При застосуванні гвинтового конвеєра із шнеками з гумовими витками в зоні завантаження цей показник становив 0,24%; при застосуванні пневматичного конвеєра – 0,2%; а при використанні гвинтового конвеєра із шнеком з щітковими елементами – 0,02%.

Також застосування гвинтового конвеєра із стальними шнеком призводило до найбільшого руйнування оболонки зерен – 4,3% при двох послідовних завантаженнях і переміщеннях. Використання гвинтового конвеєра із шнеками з гумовими витками в зоні завантаження та пневматичного конвеєра призводило до руйнування оболонки 2,8% зерен сої за два переміщення. Вказаний показник для гвинтового конвеєра із шнеком з щітковими елементами, ковшового конвеєра та стрічкового конвеєра відповідно становив 1,59%; 0,66% та 0,38%.

Застосування гвинтового конвеєра із стальними шнеком, гвинтового конвеєра із шнеками з гумовими витками в зоні завантаження та пневматичного конвеєра призводило до зменшення величини проростання насіння на 2,5%. При цьому, такий показник для гвинтового конвеєра із шнеком з щітковими елементами, ковшового конвеєра та стрічкового конвеєра становив до 0,1%.

Значне зростання величини травмування зерен сої спостерігалось при збільшенні кута нахилу транспортування від 15° та 30° для гвинтового конвеєра із стальними шнеком (1,49%) та гвинтового конвеєра із шнеками з гумовими витками в зоні завантаження (0,66%). Тоді як для гвинтового конвеєра із шнеком з щітковими елементами така зміна була не значною і в межах статистичної похибки.

Основними причинами зростання пошкодження зерен сої при транспортуванні гвинтового конвеєра із стальними шнеком та гвинтового конвеєра із шнеками з гумовими витками в зоні завантаження є малий коефіцієнт завантаження конвеєра, збільшений кут нахилу конвеєра, низька вологість зерна та комбінації вказаних факторів.

У роботі Залуцького С.З. [70] проведено дослідження параметрів взаємодії еластичних гвинтових робочих органів із зерновим матеріалом. Зокрема виведено рівняння для знаходження сили взаємодії між еластичним витком та зерниною у випадку її защемлення у зазорі між витком та кожухом:

$$N_b = \frac{E(b^4 - a^4) \sqrt{r_3 (\cos \alpha_T - \cos \alpha_n) (2l - r_3 (\cos \alpha_T - \cos \alpha_n))}}{16l^2 (b - a) k}. \quad (1.3)$$

Також у роботі [70] виведено умову защемлення зернини між еластичним гвинтовим робочим органом та внутрішньою поверхнею кожуха:

$$\mu_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \mu_2}{1 + \mu_2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (1.4)$$

де  $\mu_1$  та  $\mu_2$  – коефіцієнти тертя між зерниною та еластичним гвинтовим робочим органом та між зерниною та кожухом відповідно;  $\alpha$  – кут контакту між зерниною та еластичним гвинтовим робочим органом.

Крім цього, у роботі [70] представлено результати експериментальних досліджень прогину витків еластичних гвинтових робочих органів, потужності на приводі, продуктивності та ступеня пошкодження зернового матеріалу при транспортуванні гвинтовими конвеєрами з еластичними гвинтовими робочими органами. Зокрема виведено рівняння регресії потужності на приводі гвинтового конвеєра з секційною еластичною поверхнею [70]:

$$P = 0,055 + 0,11 \cdot 10^{-2} n - 0,06 \cdot 10^{-4} \alpha - 0,014 \Delta + 0,21 \cdot 10^{-5} n \alpha + 0,84 \cdot 10^{-4} n \Delta + 0,75 \cdot 10^{-4} \alpha \Delta - 0,33 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,21 \cdot 10^{-4} \alpha^2 - 0,5 \cdot 10^{-4} \Delta^2. \quad (1.5)$$

Факторне поле досліджень: частота  $n$  обертання гвинтового робочого органу від 200 об/хв. до 500 об/хв.; кут  $\alpha$  нахилу конвеєра від  $0^\circ$  до  $40^\circ$ ; зазор  $\Delta$  між гвинтовим робочим органом та кожухом від 0 до 4 мм.

Рівняння регресії ступеня пошкодження зернового матеріалу при транспортуванні гвинтовими конвеєрами з еластичними гвинтовими робочими органами [70]:

$$T_e = 0,0011 + 0,0012\alpha + 0,0002n + 0,051\Delta. \quad (1.6)$$

Збільшення частота  $n$  обертання гвинтового робочого органу від 200 об/хв. до 500 об/хв. призводить до зростання ступеня пошкодження зернового матеріалу від 0,17% до 0,23 %. При зміні кута нахилу конвеєра від  $0^\circ$  до  $40^\circ$  ступень пошкодження зернового матеріалу зростає від 0,165% до 0,21 %. Порівняно із звичайними сталевими шнеками використання еластичних гвинтових робочих органів призводить до зменшення ступеня пошкодження зернового матеріалу в 1,63 рази для  $\Delta = 4$  мм, в 1,92 для  $\Delta = 2$  мм і в 4,04 рази для  $\Delta = 0$  мм.

#### 1.4. Висновки

На основі аналізу наукових публікацій та патентів зроблено такі висновки.

1. Гвинтові конвеєри широко використовуються у багатьох галузях промисловості, будівництва та сільського господарства як надійні засоби транспортування різних типів сипких матеріалів. Основними перевагами таких конвеєрів є: простота конструкції та надійність, хороші показники точності подачі матеріалу, придатність для забезпечення показників охорони праці, значна гнучкість проектування конструкцій, широке застосування і поєднання додаткових процесів разом із транспортуванням матеріалів.

2. Подальші дослідження повинні бути спрямованими на усунення недоліків гвинтових конвеєрів при транспортуванні насінневих зернових матеріалів, пов'язаних із тим, що частинки сипкого зернового матеріалу можуть защемлюватись у просторі між витками гвинтового робочого органу та

кожухом, а також із тим, що через наявність зазору між витками шнека та кожухом не забезпечується самоочищення гвинтового конвеєра.

3. Огляд конструкцій, особливостей роботи різних типів конвеєрів та гвинтових робочих органів надає можливість для пошуку нових варіантів гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями для зменшення пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні із використанням синтезу на основі морфологічного аналізу.

4. Основними напрямками забезпечення зменшення пошкоджень зернових та насінневих матеріалів є: покриття витків робочих органів полімерними матеріалами; кріплення на витках полімерних спіральних накладок; застосування на периферійній поверхні спіралей шнеків щіткоподібних еластичних елементів; виконання гвинтових робочих органів з еластичними секціями у вигляді сегментів та пелюстків; обрамлення кромки зовнішнього діаметра витків спеціальними полімерними екструдованими вставками.

5. Дослідженню гвинтових конвеєрів з еластичними гвинтовими робочими органами присвячено значно меншу кількість праць ніж звичайним гвинтовим конвеєрам з металевими гвинтовими робочими органами, а тому ряд завдань проектування гвинтових конвеєрів з еластичними робочими поверхнями, що забезпечують зменшення пошкодження насінневих зернових матеріалів, потребують подальшого вирішення. Зокрема обґрунтування умов защемлення зернини між поверхнею еластичного гвинтового робочого органу та внутрішньою поверхнею кожуха на основі встановлення взаємозв'язку між силовими та геометричними параметрами переміщення зернового матеріалу та експериментального дослідження продуктивності транспортування і ступеня пошкодження зернового матеріалу.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛАСТИЧНИМИ ЩІТКОПОДІБНИМИ ГВИНТОВИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ

#### 2.1. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями

Для пошуку нових варіантів гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та для мінімального пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні використано метод синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу [30, 143]. У результаті проведеного аналізу впливу різних факторів на процес транспортування насінневих сипких матеріалів шляхом структурно-схематичного синтезу із застосуванням морфологічного аналізу було визначено обмежену кількість їх складових елементів та зв'язків між ними, які представляють конструктивні ознаки, на основні чого складено морфологічну матрицю у вигляді таблиці 2.1. Вона поділена на стовпці, в заголовках яких представлені морфологічні ознаки елементів гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями для мінімального пошкодження зернових матеріалів і зв'язки між ними, а до їх складу внесено альтернативи кожної ознаки без критичного аналізу. Обрані такі основні морфологічні ознаки: привод, шнек, який поділяється на гвинтовий робочий орган із еластичними поверхнями та кожух, і завантажувальний механізм.

Морфологічну модель конструктивних ознак та елементів гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями (табл. 2.1) можна представити у вигляді морфологічної матриці (2.1), що утворена з допомогою методу синтезу ієрархічних груп із використанням морфологічного аналізу. При використанні запропонованого методу синтезу кількість варіантів визначатиметься за формулою [30, 143]:

$$N = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i, \quad (2.1)$$



Таблиця 2.1

Морфологічна таблиця ознак конструктивних елементів гвинтових транспортерів із гвинтовими робочими органами, що оснащені еластичними поверхнями

1.1. Електропривод. 1.2. Двигун внутрішнього згорання.	1. Вид	Привод	
2.1. Безперервний. 2.2. Циклічний (з прискоренням і сповільненням).	2. Вид руху		
3.1. Один. 3.2. Два.	3. Кількість		
4.1. Суцільна. 4.2. Секційна.	4. Конструкція гвинта	Конструкція гвинта з еластичними поверхнями	Шнек
5.1. Жорсткий. 5.2. Гнучкий. 5.3. Комбінований.	5. Жорсткість гвинта		
6.1 Одно типова. 6.2. Багато типова.	6. Комбінація спіралі		
7.1. Однозахідний. 7.2. Двозахідний. 7.3. Багатозахідний.	7. За кількістю спіралей		
8.1. З одним кроком. 8.2. З різним кроком.	8. За кроком		
9.1. З суцільним прорізом основи для кріплення еластичних елементів. 9.2. З круглими отворами основи для кріплення еластичних елементів. 9.3. З еліпсоподібними отворами основи для кріплення еластичних елементів. 9.4. Із суцільним полімерним покриттям спіралі. 9.5. Із суцільним полімерним покриттям спіралі та основи. 9.6. Із кріпленням еластичних гвинтових пелюстків на спіралі. 9.7. Із торцевим кріпленням еластичних елементів в отворах спіралі. 9.8. Із кріпленням еластичних елементів у швелероподібній основі спіралі. 9.9. Спіраль із подвійною основою кріплення еластичних елементів. 9.10. З периферійними стичними накладками на спіралі. 9.11. З периферійною еластичною щіткоподібною частиною на спіралі. 9.12. З суцільним периферійним камеро-подібним елементом на спіралі.	9. Тип гвинта		
10.1. Спіральний. 10.2. Стрічковий. 10.3. Гофрований. 10.4. Лопатевий.	10. Профіль		
11.1. Додатковою внутрішньою основою. 11.2. Гвинтами.	11. Спосіб кріплення		
12.1. Суцільна. 12.2. Секційна. 12.3. З еластичною внутрішньою основою.	12. Конструкція жолоба		
13.1. Гравітаційний. 13.2. Примусовий. 13.3. Роздільний. 13.4. З калібруванням. 13.5. З подрібненням.	13. Процес	Завантажувальний механізм	
14.1. Бункер. 14.2. Насадка. 14.3. Завантажувальний пристрій (підбирач).	14. Тип		

де  $z$  – ієрархічний рівень;  $l$  – кількість ієрархічних рівнів;  $x$  – певна підгрупа відповідного ієрархічного рівня;  $q$  – кількість підгруп відповідного ієрархічного рівня;  $K_i$  – альтернатива конструктивної ознаки елемента певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня;  $m$  – кількість альтернатив конструктивної ознаки елементів певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня.

Модель механічної системи «Конструктивні ознаки та елементи гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями», згідно запропонованого групування, представлено на рисунку 2.1. Загальна кількість генерованих варіантів гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями при використанні запропонованого методу синтезу становитиме:

$$N_{до} = \begin{array}{|l} 9.1 \\ 9.2 \\ 9.3 \\ 9.4 \\ 9.5 \\ 9.6 \\ 9.7 \\ 9.8 \\ 9.9 \\ 9.10 \\ 9.11 \\ 9.12 \end{array} + \begin{array}{|l} 10.1 \\ 10.2 \\ 10.3 \\ 10.4 \\ 10.5 \\ 10.6 \\ 10.7 \\ 10.8 \end{array} + \begin{array}{|l} 4.1 \\ 4.2 \end{array} + \begin{array}{|l} 5.1 \\ 5.2 \\ 5.3 \end{array} + \begin{array}{|l} 6.1 \\ 6.2 \end{array} + \begin{array}{|l} 7.1 \\ 7.2 \\ 7.3 \end{array} + \begin{array}{|l} 8.1 \\ 8.2 \end{array} + \begin{array}{|l} 12.1 \\ 12.2 \\ 12.3 \\ 12.4 \\ 12.5 \end{array} + \begin{array}{|l} 1.1 \\ 1.2 \end{array} + \begin{array}{|l} 2.1 \\ 2.2 \end{array} + \begin{array}{|l} 3.1 \\ 3.2 \end{array} + \begin{array}{|l} 13.1 \\ 13.2 \\ 13.3 \\ 13.4 \\ 13.5 \end{array} + \begin{array}{|l} 14.1 \\ 14.2 \\ 14.3 \end{array} = 127.$$

Використовуючи даний метод синтезу розроблено конструкції гвинтових конвеєрів з гвинтовими робочими органами, оснащеними еластичними поверхнями, які порівняно з традиційними мають окремі ефективніші характеристики. Так на рис. 2.2 представлено досліджувані гвинтові робочі органи із еластичними поверхнями.

Гвинтовий робочий орган, зображений на рис. 2.2 а виконано з щіткоподібним гвинтовим елементом. При його розробленні та виготовленні використана конструктивна ознака 9.2.

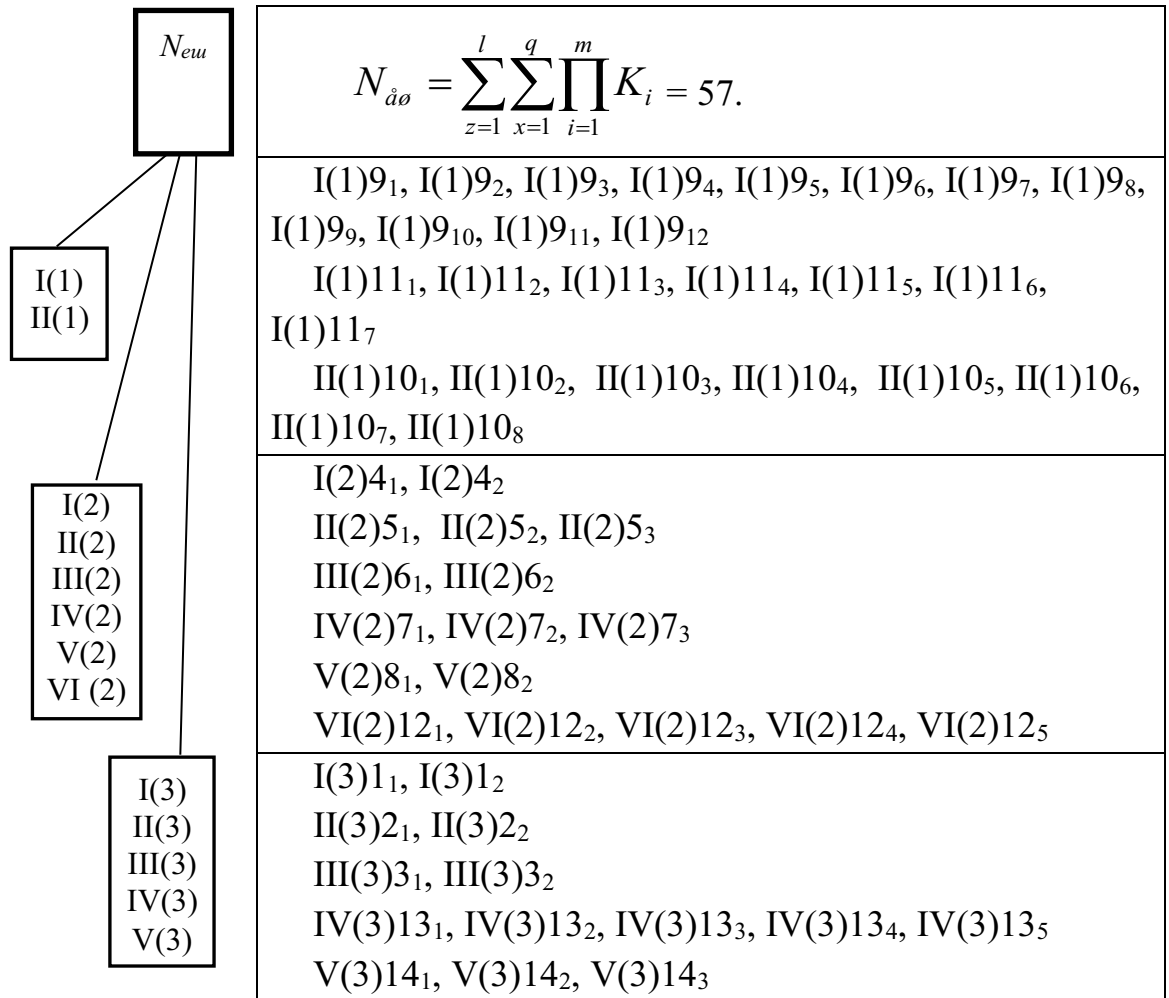
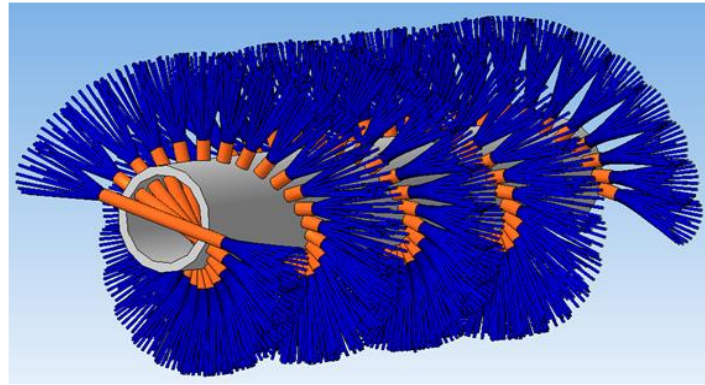


Рис. 2.1. Модель механічної системи «Конструктивні ознаки та елементи гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями»: I - VIII – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

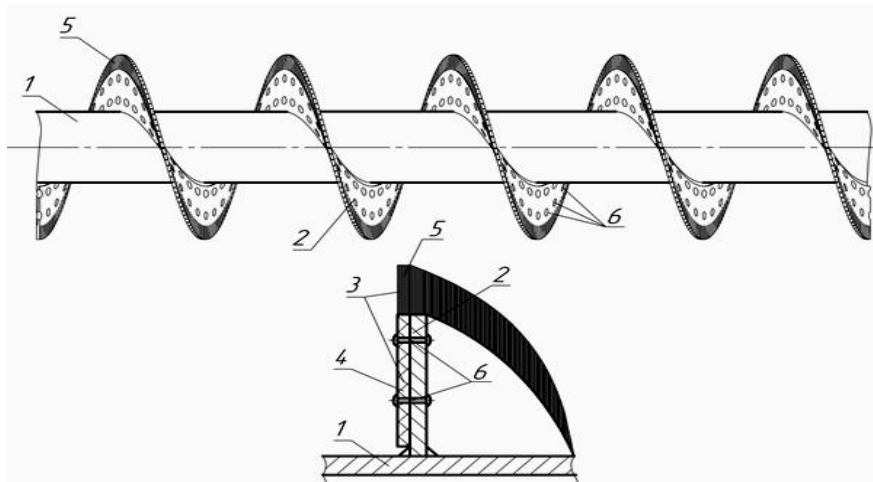
На рис. 2.2 б зображено гвинтовий робочий орган з периферійною еластичною щіткоподібною частиною. При його розробці та виготовленні використана конструктивна ознака 9.11.

На рис. 2.2 в представлено розроблений гвинтовий робочий орган оснащений суцільним периферійним камероподібним елементом. При його розробці та виготовленні використана конструктивна ознака 9.12.

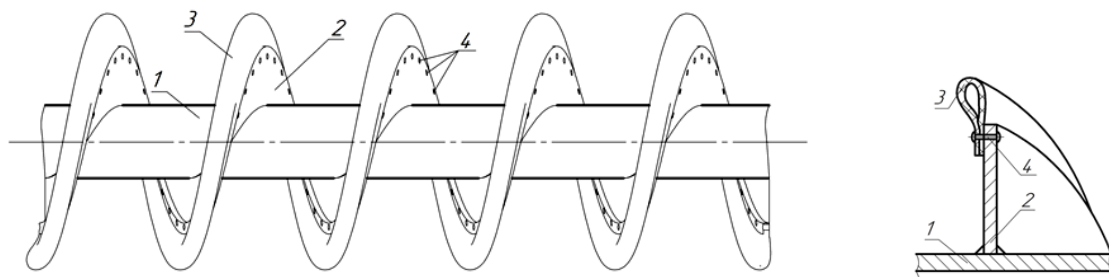
Превагами синтезованих гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями є зниження ступеня пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами.



a)



б)



в)

Рис. 2.2. Синтезовані конструкції гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями а) з щіткоподібною гвинтовою частиною; б) з периферійною еластичною щіткоподібною частиною; в) із суцільною камероподібною частиною

## 2.2. Дослідження деформації волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів при транспортуванні зернового матеріалу

Розроблені нові конструкції гвинтових конвеєрів із еластичними щіткоподібними гвинтовими робочими органами (ЕЩГРО) потребують додаткових досліджень впливу їх конструктивних та кінематичних параметрів

на величину деформації волокон щіткоподібного шнека з можливістю прогнозування протидії навантаженню зі сторони матеріалу, що транспортується, із врахуванням забезпечення деформації волокон в межах гранично допустимої величини без зворотного руху окремих елементів сипкого матеріалу.

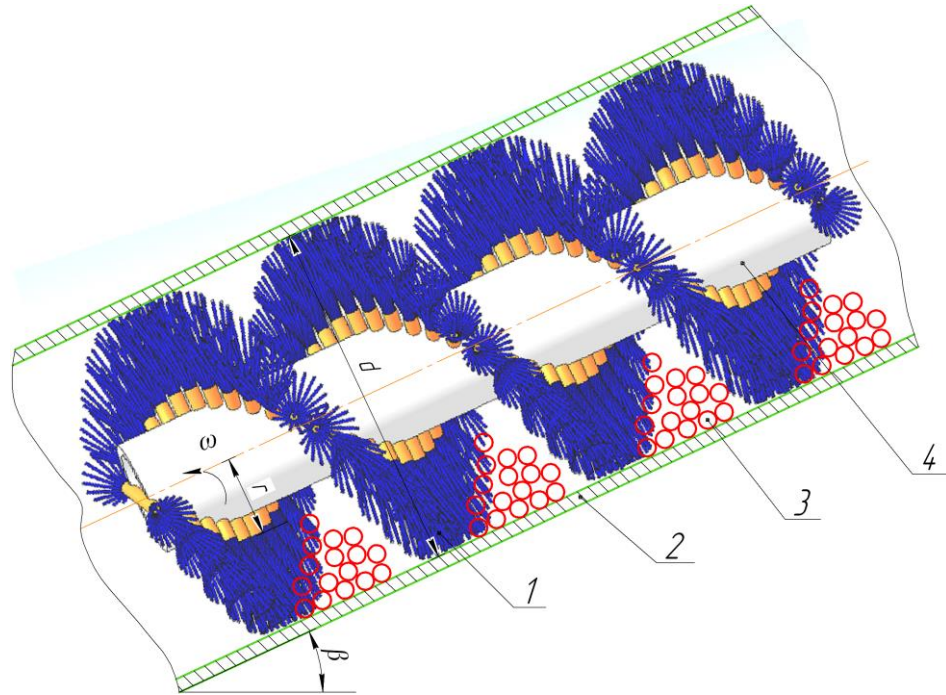
При цьому слід врахувати, що при використанні еластичних поверхонь у випадках защемлення частинок зернового матеріалу між внутрішньою поверхнею направляючого кожуха та периферійною поверхнею еластичних щіток, останні прогинаються і пропускають матеріал, не травмуючи його.

Розрахункову схему для визначення величини деформації ЕЦГРО при транспортуванні сипких матеріалів представлено на рис. 2.3.

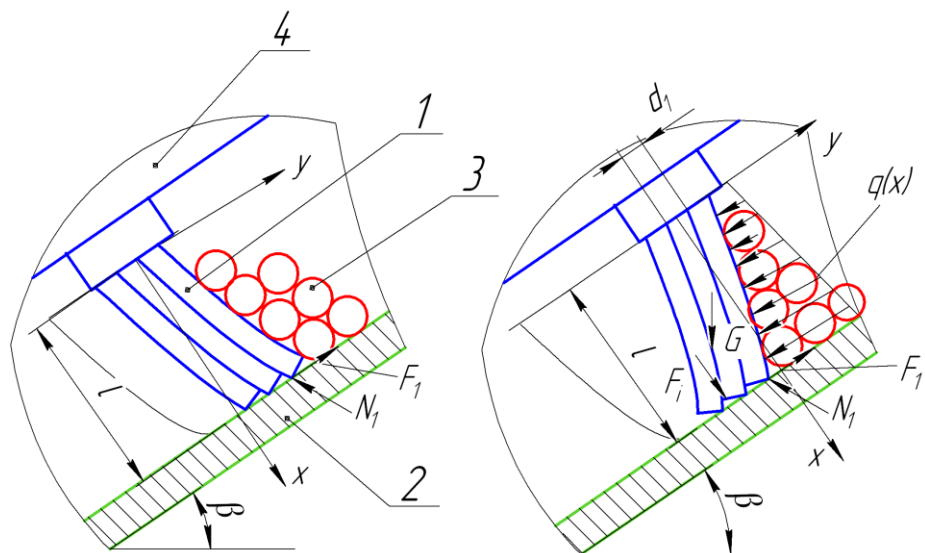
В процесі розрахунків встановлено, що жорсткість вала робочого органу та кожуха є набагато більшою, ніж жорсткість еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів, тому деформації цих елементів не враховані при моделюванні. Переміщення волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу (рис. 2.3 а) визначено із аналізу деформацій ідеалізованої системи з пружними елементами, яку представлено на рисунку 2.3 в. Щіткоподібний гвинтовий робочий орган, при встановленні у кожух без зазору для зменшення травмування зернового матеріалу, піддається початковій радіальній та осьовій деформації і опирається на поверхню кожуха (рис. 2.3 б), при цьому волокна жорстко закріплені на валі. При обертанні вала та зростання навантаження під дією транспортування сипкого матеріалу волокна ЕЦГРО прогинаються (рис. 2.3 в).

При перевищенні навантаження на ЕЦГРО гранично допустимої величини (рис. 2.3 г) волокна прогинаються до утворення між кожухом та ЕЦГРО зазору, величина якого є достатньою для переміщення сипкого матеріалу у зворотному напрямку. Оскільки жорсткість волокон ЕЦГРО є нижчою за жорсткість окремих елементів сипкого зернового матеріалу, останній не піддається пошкодженню.

Проведемо дослідження статичних деформацій волокон щіткоподібного гвинтового робочого органу.

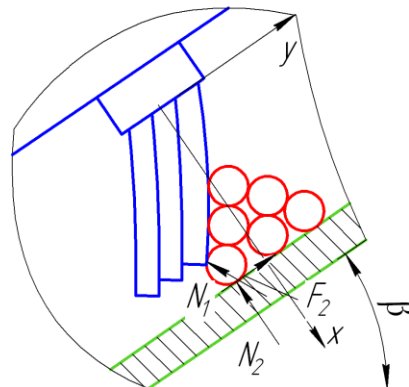


а)



б)

в)



г)

Рис. 2.3. Розрахункова схема для визначення деформації еластичними щіткоподібними гвинтовими робочими органами при транспортуванні сипких матеріалів: 1 - ЕЩГРО; 2 – кожух; 3 – сипкий матеріал; 4 – вал

Розподілене навантаження  $q(x)$  в осьовому напрямку гвинтового робочого органу під час транспортування зернового матеріалу на волокна щіткоподібного гвинтового робочого органу є нерівномірним по довжині волокон і залежать від коефіцієнта завантаження  $q_1$ , кута  $\beta$  нахилу кожуха та швидкісного режиму роботи гвинтового конвеєра. При цьому максимальне значення такого навантаження виникає на зовнішньому діаметрі гвинтового робочого органу, а мінімальне – на внутрішньому діаметрі.

Розподілене навантаження на волокна ЕЩГРО під час транспортування сипкого матеріалу при малому коефіцієнті завантаження горизонтального та полого нахиленого гвинтового конвеєра із тихохідним режимом роботи можна апроксимувати залежністю:

$$q(x) = \frac{(q_{\max} - q_{\min})x}{l} + q_{\min}, \quad (2.2)$$

де  $l$  – довжина робочої частини волокон ЕЩГРО;  $q_{\max}$  - максимальне розподілене навантаження на волокна (виникає на зовнішньому діаметрі щіткоподібного гвинтового робочого органу);  $q_{\min}$  - мінімальне розподілене навантаження на волокна.

Рівняння середньої лінії деформації декількох волокон ЕЩГРО розміщених в одній площині перпендикулярній розподіленому навантаженню  $q(x)$ :

$$nEI \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x) - N_1 \sin \gamma \cdot y + F_i \cdot y + G \cdot y \cdot \cos \beta \cos \theta, \quad (2.3)$$

де  $n$  - кількість волокон розміщених в одній площині, перпендикулярній розподіленому навантаженню  $q(x)$ ;  $E$  – модуль пружності матеріалу волокна ЕЩГРО;  $M(x)$  - момент згину волокна ЕЩГРО;  $N_1$  - зусилля початкової деформації волокон ЕЩГРО при його встановленні у кожух;  $\gamma$  – кут нахилу волокон ЕЩГРО після початкової деформації;  $F_i$  - відцентрова сила, що діє на

волокна при обертанні ЕЩГРО;  $G$  – сила ваги, що діє на волокна;  $G = mg$ ;  $I$  – момент інерції поперечного перерізу волокна ЕЩГРО;  $\beta$  – кут нахилу кожуха;  $\theta$  – кут повороту ЕЩГРО;  $m$  – маса волокон;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Момент згину волокна ЕЩГРО визначаємо за формулою [149]:

$$M(x) = \int_x^l Q(x) dx + M(0), \quad (2.4)$$

де  $Q(x)$  – перерізує зусилля у волокнах ЕЩГРО;  $M(0)=0$  – момент згину початкового перерізу волокна ЕЩГРО.

Перерізує зусилля у волокнах ЕЩГРО:

$$Q(x) = F_1 + N_1 \cos \gamma - \int_x^l q(x) dx - G \cdot \sin \beta, \quad (2.5)$$

де  $F_1$  – сила тертя між волокнами ЕЩГРО та кожухом.

Зусилля початкової деформації волокон ЕЩГРО при його встановленні у кожух знайдено при розгляді волокон як консольно закріпленої балки [149]:

$$N_1 = \frac{3nfEI}{l^3}, \quad (2.6)$$

де  $f$  – величина початкової деформації волокон ЕЩГРО при його встановленні у кожух.

При цьому величина початкової деформації волокон ЕЩГРО, при його встановленні у кожух, визначається за формулою:

$$f = \sqrt{l^2 - (l - k)^2}, \quad (2.7)$$

де  $k$  – довжина частини волокна, що використовується для усунення зазору між ЕЩГРО та кожухом.



Цю довжину знаходимо на основі конструктивних параметрів конвеєра:

$$k = \frac{D-d}{4}, \quad (2.8)$$

де  $D$  - зовнішній діаметр ЕЩГРО до встановлення у кожух;  $d$  - внутрішній діаметр кожуха.

Момент інерції поперечного перерізу волокна ЕЩГРО круглої форми [149]:

$$I = \frac{\pi d_1^4}{64} \quad (2.9)$$

де  $d_1$  – діаметр поперечного перерізу волокна.

Кут нахилу волокон ЕЩГРО після початкової деформації:

$$\gamma = \arcsin \frac{\sqrt{l^2 - \left(l - \frac{D-d}{4}\right)^2}}{l}. \quad (2.10)$$

Підставляючи формули (2.7), (2.8), (2.9) у рівняння (2.6), одержуємо:

$$N_1 = \frac{3n \sqrt{l^2 - \left(l - \frac{D-d}{4}\right)^2} E \pi d_1^4}{64l^3}. \quad (2.11)$$

Відцентрова сила, що діє на волокна при обертанні ЕЩГРО:

$$F_i = m\omega^2(r+l), \quad (2.12)$$

де  $\omega$  - кутова частота обертання ЕЩГРО;  $r$  – радіус центрального вала.

Сила тертя між волокнами ЕЩГРО та кожухом:

$$F_1 = N_1 \mu_1, \quad (2.13)$$

де  $\mu_1$  – коефіцієнт тертя між волокнами ЕЩГРО та кожуха.

Підставляючи формули (2.4), (2.5), (2.12), (2.13) у рівняння (2.3), одержуємо рівняння середньої лінії деформації декількох волокон еластичного щіткоподібного шнека:

$$nEI \frac{d^2 y}{dx^2} = \int_x^l N_1 (\cos \gamma + \mu_1) dx - \int_x^l \int_x^l \left( \frac{(q_{\max} - q_{\min})x}{l} + q_{\min} \right) dx dx - \int_x^l mg \sin \beta dx -$$

$$- N_1 \sin \gamma \cdot y + m \cdot y (\omega^2 (r + l) + g \cos \beta \cos \theta). \quad (2.14)$$

При наявності зазору між волокнами ЕЩГРО та кожухом рівняння (2.14) має спрощений вигляд:

$$nEI \frac{d^2 y}{dx^2} = - \int_x^l \int_x^l q(x) dx dx - \int_x^l mg \sin \beta dx + m \cdot y (\omega^2 (r + l) + g \cos \beta \cos \theta). \quad (2.15)$$

Після інтегрування рівняння (2.14) одержуємо:

$$nEI \frac{d^2 y}{dx^2} = N_1 (\cos \gamma + \mu_1) (l - x) - \frac{1}{2} (q_{\max} (l^2 - x^2) + q_{\min} (l - x)^2) \left( 1 - \frac{x}{l} \right) -$$

$$- mg \sin \beta (l - x) - N_1 \sin \gamma \cdot y + m \cdot y (\omega^2 (r + l) + g \cos \beta \cos \theta). \quad (2.16)$$

Враховуючи рівняння (2.11), одержуємо:

$$\frac{nE\pi d_1^4}{64} \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{3n \sqrt{l^2 - \left( l - \frac{D-d}{4} \right)^2} E\pi d_1^4}{64l^3} \left( (\cos \gamma + \mu_1) (l - x) - \sin \gamma \cdot y \right) -$$

$$- \frac{1}{2} (q_{\max} (l^2 - x^2) + q_{\min} (l - x)^2) \left( 1 - \frac{x}{l} \right) - mg \sin \beta (l - x) + m \cdot y (\omega^2 (r + l) + g \cos \beta \cos \theta). \quad (2.17)$$

Диференціальне рівняння (2.17) можна використовувати для визначення деформації волокон ЕЩГРО при статичних навантаженнях.

Загальний розв'язок диференціального рівняння (2.17) [149]:

$$y = A_1 \sin(k_1 x) + A_2 \cos(k_1 x) + y^*, \quad (2.18)$$

де  $A_1$ ,  $A_2$  – коефіцієнти, які можна визначити із граничних умов;  $y^*$  - частковий розв'язок рівняння;  $k_1$  – частотна характеристика.

Початкові умови для розв'язку рівняння (2.17): при  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $\frac{dy}{dx} = 0$ .

Розв'язок диференціального рівняння (2.17) виконано за допомогою чисельного методу і представлено у вигляді графіків на рис. 2.4 – рис. 2.7 для різних змінних параметрів.

На графіках рисунка 2.4 представлено вигляд середньої лінії деформованих волокон еластичного щіткоподібного шнека при різних значеннях зовнішнього розподіленого навантаження на волокна зі сторони матеріалу, що транспортується.

На графіках рисунка 2.5 представлено вигляд середньої лінії деформованих волокон еластичного щіткоподібного шнека при різних значеннях діаметра  $d_1$  поперечного перерізу волокна.

На графіках рисунка 2.6 представлено вигляд середньої лінії деформованих волокон еластичного щіткоподібного шнека при різних значеннях довжини  $k$  частини волокна, що використовується для усунення зазору між еластичним щіткоподібним шнеком та кожухом.

На графіках рисунка 2.7 представлено вигляд середньої лінії деформованих волокон еластичного щіткоподібного шнека при різних значеннях довжини  $l$  робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека.

Крива 1 рис. 2.4 відповідає рис. 2.3 б для випадку, коли щіткоподібний шнек при встановленні у кожух піддається початковій деформації до 2,5 мм і опирається на поверхню кожуха. При цьому зовнішнє розподілене навантаження зі сторони матеріалу, що транспортується відсутнє.

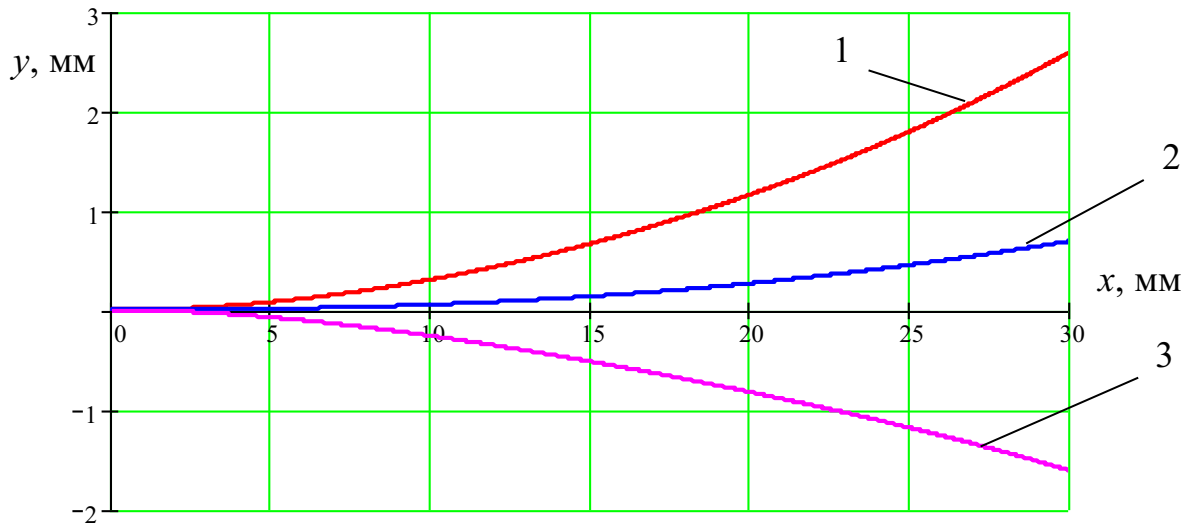


Рис. 2.4. Графіки середньої лінії деформації чотирьох нейлонових волокон ЕЦГРО розміщених в одній площині перпендикулярній розподіленому навантаженню при  $l=30$  мм,  $k=0,1$  мм,  $d_1=2$  мм,  $\beta =45$  град: 1) деформація при початковому встановленні ЕЦГРО у кожух гвинтового конвеєра  $q_{\max}=0$  Н/мм,  $q_{\min}=0$  Н/мм; 2)  $q_{\max}=0,05$  Н/мм,  $q_{\min}=0,02$  Н/мм; 3)  $q_{\max}=0,1$  Н/мм,  $q_{\min}=0,06$  Н/мм

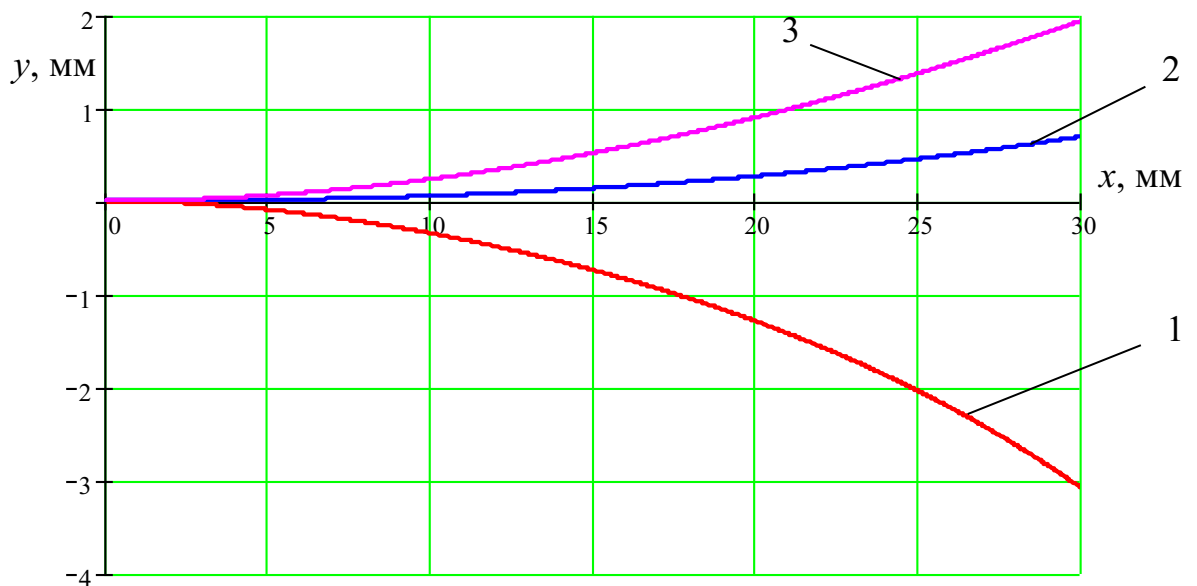


Рис. 2.5. Графіки середньої лінії деформації чотирьох нейлонових волокон ЕЦГРО розміщених в одній площині перпендикулярній розподіленому навантаженню при  $l=30$  мм,  $k=0,1$  мм,  $q_{\max}=0,05$  Н/мм,  $q_{\min}=0,02$  Н/мм,  $\beta =45$  град: 1)  $d_1=1,7$  мм; 2)  $d_1=2$  мм; 3)  $d_1=2,3$  мм

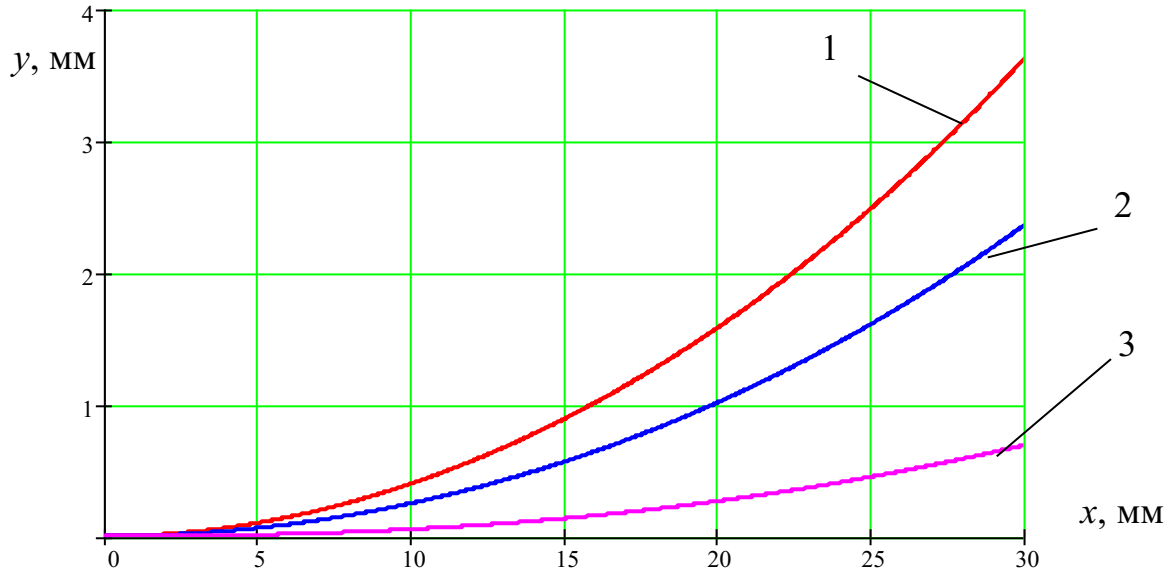


Рис. 2.6. Графіки середньої лінії деформації чотирьох нейлонових волокон ЕЦГРО розміщених в одній площині перпендикулярній розподіленому навантаженню при  $l=30$  мм,  $q_{\max}=0,05$  Н/мм,  $q_{\min}=0,02$  Н/мм,  $d_1=2$ мм,  $\beta=45$  град: 1)  $k=0,3$  мм; 2)  $k=0,2$  мм; 3)  $k=0,1$  мм

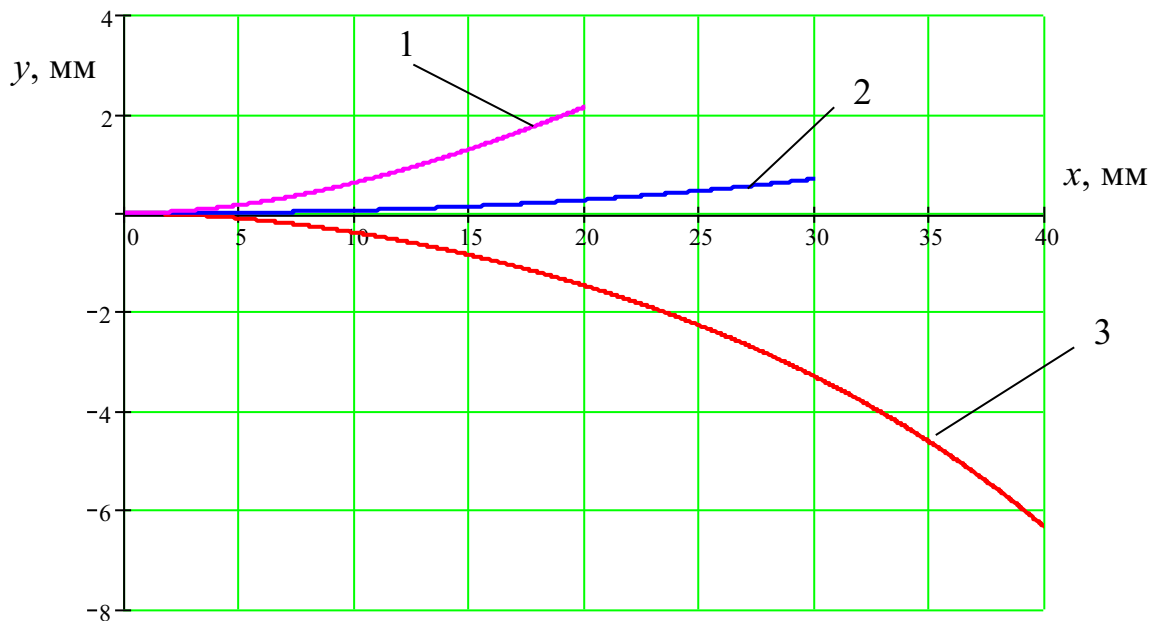


Рис. 2.7. Графіки середньої лінії деформації чотирьох нейлонових волокон ЕЦГРО розміщених в одній площині перпендикулярній розподіленому навантаженню при  $k=0,1$  мм,  $q_{\max}=0,05$  Н/мм,  $q_{\min}=0,02$  Н/мм,  $d_1=2$ мм,  $\beta=45$  град: 1)  $l=20$  мм; 2)  $l=30$  мм; 3)  $l=40$  мм

При зростанні зовнішнього навантаження  $q_{\min}$  та  $q_{\max}$  до 0,06 Н/мм та 0,1 Н/мм відповідно відбувається деформація волокон еластичного щіткоподібного шнека до  $-1.5$  мм (крива 3 рис. 2.5), що відповідає рис. 2.3 в, а загальний прогин волокон становить 5 мм.

При зменшенні діаметра волокна (рис. 2.5) від 2,3 мм (крива 3) до 1,7 мм (крива 1) для однакових зовнішніх навантажень відбувається деформація волокон у від'ємному напрямку осі  $y$  від 2 мм до  $-3$  мм, а загальний прогин становить 5 мм.

При збільшенні величини  $k$  (рис. 2.6) від 0,1 мм до 0,3 мм виникає збільшення попередньої деформації волокон (рис. 2.3 б) від 0,7 мм до 3,5 мм, що забезпечує підвищення навантажувальної здатності еластичного щіткоподібного шнека. Проте зростає потужність транспортування матеріалу через підвищення сили тертя між волокнами еластичного щіткоподібного шнека та кожухом конвеєра.

При збільшенні робочої частини волокон  $l$  (рис. 2.7) від 20 мм (крива 1) до 40 мм (крива 3) для однакових зовнішніх навантажень відбувається деформація волокон у від'ємному напрямку осі  $y$  від 2,2 мм до  $-6,4$  мм, а загальний прогин становить 8,6 мм. Тому використання волокон із більшою довжиною  $l$  робочої частини знижує навантажувальну здатність еластичного щіткоподібного шнека, проте зменшується величина травмування матеріалу, що транспортується.

Реальне значення величин деформації волокон еластичного щіткоподібного шнека в процесі транспортування сипких матеріалів є вищими, внаслідок виникнення динамічних навантажень. Оскільки ймовірність виникнення резонансу є незначною, реальне значення величини деформації волокон еластичного щіткоподібного шнека в процесі транспортування сипких матеріалів визначається добутком величини деформації волокон при статичних розрахунках на коефіцієнт динамічності :  $y_r = y \cdot k_d$ .

### **2.3. Обґрунтування параметрів взаємодії волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу із зерновим матеріалом**

Для визначення силових параметрів взаємодії волокон ЕЩГРО із зерновим матеріалом, а також умови защемлення зернини у конвеєрі, як приклад розглянуто зернові матеріали з елементами сферичної поверхні, що є частиною таких сільськогосподарських культур, як кукурудза [70], горох та еліпсоїдної поверхні.

Для формування математичної моделі прийнято декілька припущень та ідеалізацію параметрів взаємодії зернини із волокнами ЕЩГРО. Форму зернини прийнято ідеальною без врахування мікровиступів на поверхні; поперечний переріз волокон виконано круглої форми; довжина усіх волокон є однаковою; коефіцієнти тертя між зерниною, волокнами та кожухом конвеєра є постійними величинами; переміщення волокон відносно вала знаходяться в межах малих пружних деформацій з постійними коефіцієнтами жорсткості; радіальне та кутове зміщення зернини, коливні навантаження та взаємодію з іншими зернинами не враховано.

Розрахункову схему для визначення параметрів транспортування зернини ЕЩГРО представлено на рис. 2.8. Зернина 5 із сферичним або еліпсоїдним елементом переміщується волокнами 4 еластичним щіткоподібним гвинтовим робочим органом 1 з центральним валом. У кожусі 2 гвинтового конвеєра зернина 5 защемлена між двома волокнами ЕЩГРО та внутрішньою поверхнею кожуха. Зернина може взаємодіяти із більшою кількістю волокон. При подальшому обертанні вала відбувається деформація волокон із переміщенням зернини у зворотному напрямку. Оскільки волокна виготовляються із матеріалу, модуль пружності і твердість якого на порядки менші за такі параметри сталі, при деформації волокон виникають сили, що не перевищують граничну допустиму силу дії на зернину, яка призводить до її пошкодження. Тому значно знижується ймовірність пошкодження зернин у гвинтовому конвеєрі із ЕЩГРО, порівняно із звичайним гвинтовим конвеєром із суцільнометалевим гвинтовим робочим органом.

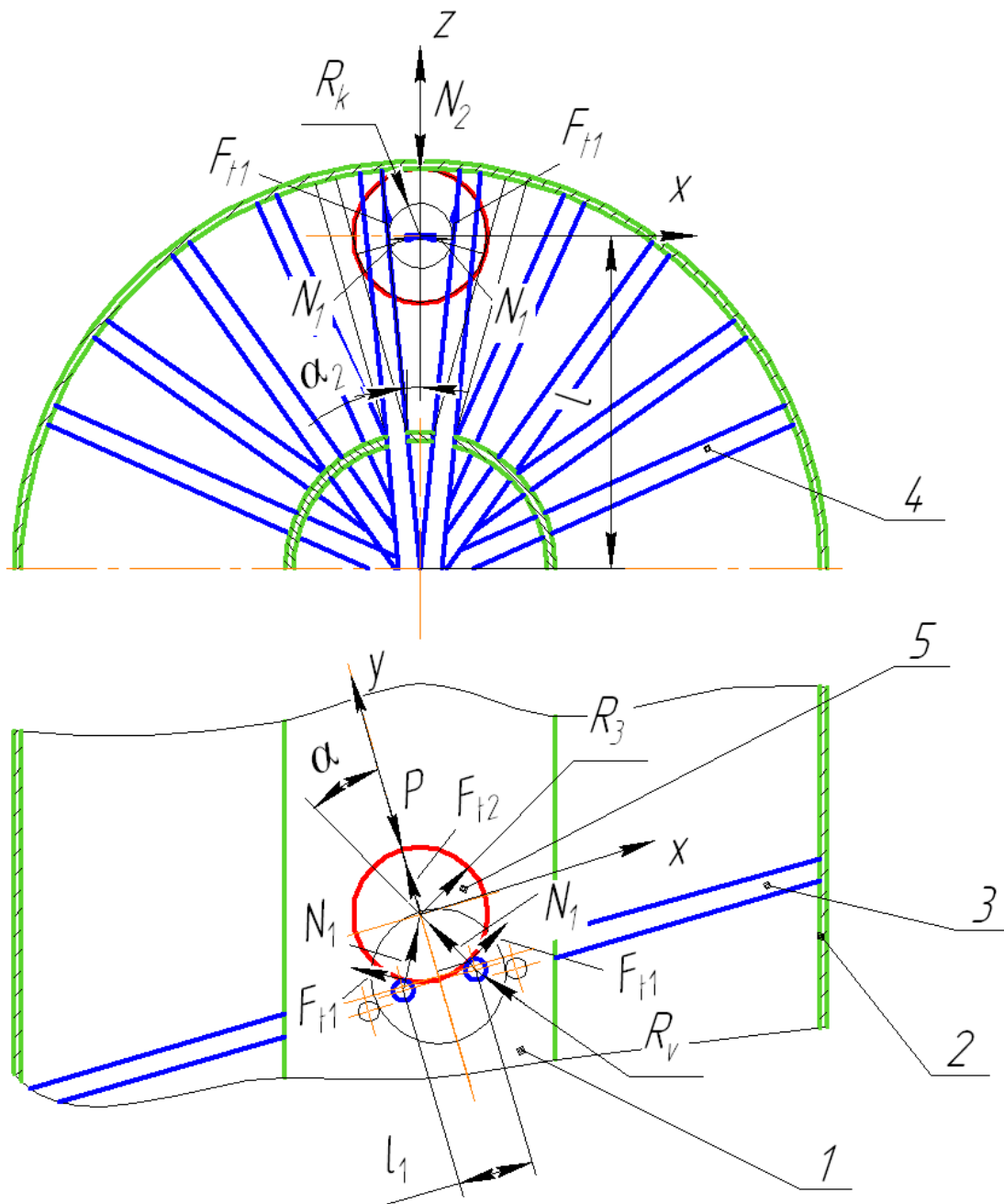


Рис. 2.8. Розрахункова схема для визначення параметрів транспортування зернини еластичним щіткоподібним гвинтовим робочим органом:

1 – еластичний щіткоподібний гвинтовий робочий орган; 2 – кожух; 3, 4 – волокна еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу; 5 - зернина

ЕЩГРО може встановлюватись у кожусі як із зазором, так і без зазору. Між волокнами, розміщеними на валі також, є зазор. При збільшенні радіуса ЕЩГРО зростає відстань між волокнами, а відповідно і зазор між ними.



При значному зазорі зменшується продуктивність конвеєра, проте збільшення густини волокон призводить до зростання спожитої потужності транспортування внаслідок зростання витрат потужності на тертя між волокнами та кожухом. Тому обґрунтування відстані між волокнами є одним із необхідних завдань проектування гвинтових конвеєрів з ЕЩГРО.

Із розрахункової схеми рис. 2.8 записуємо рівняння рівноваги зернини в початковий момент контакту із волокнами еластичного ЕЩГРО в проекції на вісь  $y$ :

$$2N_1 \cos \alpha + 2F_{t1} \sin \alpha + F_{t2} - P = 0, \quad (2.19)$$

де  $N_1$  – нормальна сила взаємодії поверхні зернини із волокном ЕЩГРО;  $F_{t1}$  – сила тертя між зерниною та волокном ЕЩГРО;  $F_{t2}$  – сила тертя між зерниною та кожухом;  $P$  – зовнішнє навантаження на зернину в напрямку перпендикулярному виткам ЕЩГРО при переміщенні у конвеєрі;  $\alpha$  – кут контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО (визначається як кут між нормаллю до поверхні зернини у точці контакту із волокном та віссю  $y$ ).

Рівняння рівноваги зернини в початковий момент контакту із волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу (ЕЩГРО) в проекції на вісі  $x$  та  $z$  відповідно:

$$N_1 \sin \alpha - N_1 \sin \alpha + F_{t1} \cos \alpha - F_{t1} \cos \alpha = 0; \quad (2.20)$$

$$2N_1 \sin \alpha_2 - N_2 + 2F_{t1} \cos \alpha_2 = 0, \quad (2.21)$$

де  $N_2$  – нормальна сила взаємодії поверхні зернини із внутрішньою поверхнею кожуха;  $\alpha_2$  – кут контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО у вертикальній площині. Визначається як кут між дотичною до поверхні зернини у точці контакту із волокном та віссю  $z$ .

Сили тертя між зерниною та волокном ЕЩГРО та між зерниною та кожухом визначаються залежностями:

$$F_{t1} = \mu_1 N_1; \quad (2.22)$$

$$F_{t2} = \mu_2 N_2, \quad (2.23)$$

де  $\mu_1$  – коефіцієнт тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЩГРО;  $\mu_2$  – коефіцієнт тертя між поверхнею зернини та внутрішньою поверхнею кожуха.

Кут контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО із розрахункової схеми рис. 2.8 визначено за залежністю:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{l_1}{2(R_3 + R_v)}\right), \quad (2.24)$$

де  $l_1$  – відстань між центрами волокон круглого поперечного перерізу, що взаємодіють із зерниною (знаходиться в межах:  $2R_v \leq l_1 \leq 2(R_3 + R_v)$ );  $R_3$  – радіус зернини;  $R_v$  – радіус круглого поперечного перерізу волокна.

Кут контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО у вертикальній площині із розрахункової схеми рис. 2.8:

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{R_k}{R_2 - R_3}\right), \quad (2.25)$$

де  $R_2$  – внутрішній радіус кожуха;  $R_k$  – радіус контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО визначається залежністю:

$$R_k = R_3 \sin \alpha. \quad (2.26)$$

Тоді:

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{R_3 \sin \alpha}{R_2 - R_3}\right); \quad (2.27)$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{R_3 l_1}{2(R_3 + R_v)(R_2 - R_3)}\right). \quad (2.28)$$

З рівняння (2.21) знаходимо:

$$N_2 = 2N_1(\sin \alpha_2 + \mu_1 \cos \alpha_2). \quad (2.29)$$

Підставляючи рівняння (2.29) у рівняння (2.19), одержано:

$$2N_1(\cos \alpha + \mu_1 \sin \alpha + \mu_2(\sin \alpha_2 + \mu_1 \cos \alpha_2)) = P; \quad (2.30)$$

$$P = 2N_1 \left( \sqrt{1 - \frac{l_1^2}{4(R_3 + R_v)^2}} + \mu_1 \frac{l_1}{2(R_3 + R_v)} + \mu_2 \left( \frac{R_3 l_1}{2(R_3 + R_v)(R_2 - R_3)} + \right. \right. \quad (2.31)$$

$$\left. \left. + \mu_1 \sqrt{1 - \frac{R_3^2 l_1^2}{4(R_3 + R_v)^2 (R_2 - R_3)^2}} \right) \right).$$

При одночасній взаємодії зернини із більше ніж двома волокнами рівняння (2.30) та (2.31) можна записати таким чином:

$$P = \sum_{i=1}^n N_{1i} (\cos \alpha_i + \mu_1 \sin \alpha_i + \mu_2 (\sin \alpha_{2i} + \mu_1 \cos \alpha_{2i})); \quad (2.32)$$

$$P = \sum_{i=1}^n N_{1i} \left( \sqrt{1 - \frac{l_{1i}^2}{4(R_3 + R_v)^2}} + \mu_1 \frac{l_{1i}}{2(R_3 + R_v)} + \mu_2 \left( \frac{R_3 l_{1i}}{2(R_3 + R_v)(R_2 - R_3)} + \right. \right. \quad (2.33)$$

$$\left. \left. + \mu_1 \sqrt{1 - \frac{R_3^2 l_{1i}^2}{4(R_3 + R_v)^2 (R_2 - R_3)^2}} \right) \right).$$

де  $i$  – кількість волокон, з якими взаємодіє зернина.

Величину нормальної сила  $N_1$  взаємодії поверхні зернини із волокном ЕЩГРО визначаємо за формулою [149]:

$$N_1 = \frac{3f_1 E \pi d_v^4}{64l^3} + F_{f3}, \quad (2.34)$$

де  $f_1$  – величина прогину волокна;  $E$  – модуль пружності матеріалу волокон;  $F_{f3}$  – сила тертя між волокном та кожухом конвеєра;  $d_v$  – діаметр волокна.

Величину  $f_1$  прогину волокна визначено на основі розв'язку диференціального рівняння, що описує криву середньої лінії волокна.

Приблизне значення величини прогину волокна з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначаємо таким чином.

При  $\mu_1 > \operatorname{tg} \alpha$ ,  $\mu_1 > \frac{l_1}{2(R_3 + R_v) \sqrt{1 - \frac{l_1^2}{4(R_3 + R_v)^2}}}$  відбувається прогин

волокон в протилежному напрямку осі  $y$ . При цьому:

$$f_1 = \sqrt{l^2 - (l - 2R_3)^2}; \quad (2.35)$$

$$N_1 = \frac{3E\pi d_v^4 \sqrt{l^2 - (l - 2R_3)^2}}{64l^3} + F_{i3}. \quad (2.36)$$

При  $\mu_1 < \operatorname{tg} \alpha$  відбувається прогин волокон в напрямку осі  $x$ . При цьому:

$$f_1 = R_3 + R_v - \frac{l_1}{2}. \quad (2.37)$$

$$N_1 = \frac{3E\pi d_v^4 \left( R_3 + R_v - \frac{l_1}{2} \right)}{64l^3} + F_{i3}. \quad (2.38)$$

При використанні ЕЩГРО із декількома рядами волокон (наприклад двома (рис. 2.9), що перекриваються для першого ряду волокон, переважно силу  $N_{11}$  взаємодії поверхні зернини із волокном визначають за формулою (2.38) із прогином  $f_{11}$ , а для волокна другого ряду  $N_{12}$  – за формулою (2.36) (рис. 2.9 а).

При подальшому прогині волокон (рис. 2.9 б) на величини  $f_{11}$  для першого ряду і  $f_{12}$  для другого ряду зернина переміщується у зазор між волокном першого та другого ряду і при досягненні умови  $\mu_1 < \operatorname{tg} \alpha$  із зростанням зазору між волокнами силу  $N_{12}$  для другого ряду теж визначають за формулою (2.38).

На основі рівнянь (2.30) та (2.31) побудовано графіки залежності (рис. 2.10 та рис. 2.11) допустимого зовнішнього навантаження  $P$  на зернину в напрямку перпендикулярному виткам ЕЩГРО від кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО та відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, що взаємодіють із зерниною при переміщенні у конвеєрі.

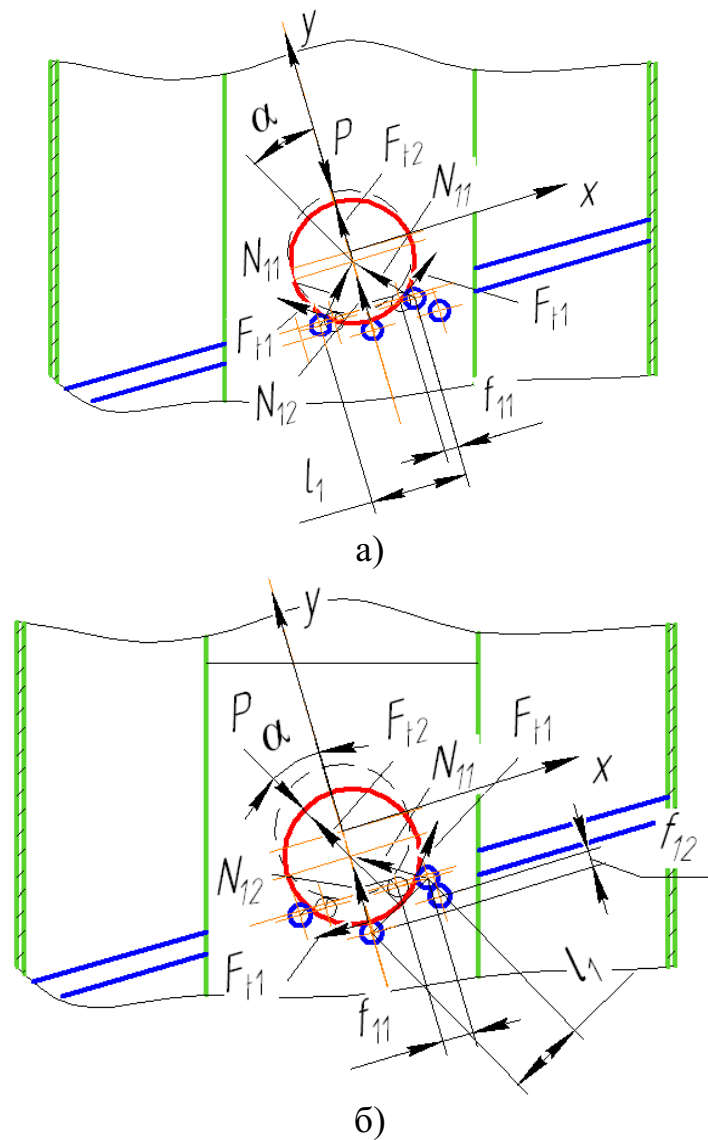


Рис. 2.9. Схема взаємодії зернини із двома рядами волокон: а) прогин першого ряду волокон до контакту зернини із волокном другого ряду; б) подальший прогин волокон першого та другого ряду

На основі даних графіка рис. 2.10 встановлено, що збільшення кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном призводить до зменшення значення зовнішнього навантаження  $P$ . Максимальні величини зовнішнього навантаження  $P$  на зернину досягаються при куті  $\alpha = \arctg(\mu_1)$ .

Точки початку найбільшого спаду функції  $P(\alpha)$  залежать від значення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$ . Збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$  зумовлює зростання навантаження  $P$ . Наприклад для  $\mu_1 = \mu_2 = 0,2$  точка перегину визначається кутом  $\alpha = 35$  град, а для  $\mu_1 = \mu_2 = 0,4$  – кутом  $\alpha = 50$  град. При куті  $\alpha = 90$  град на зернину діють тільки сили тертя.

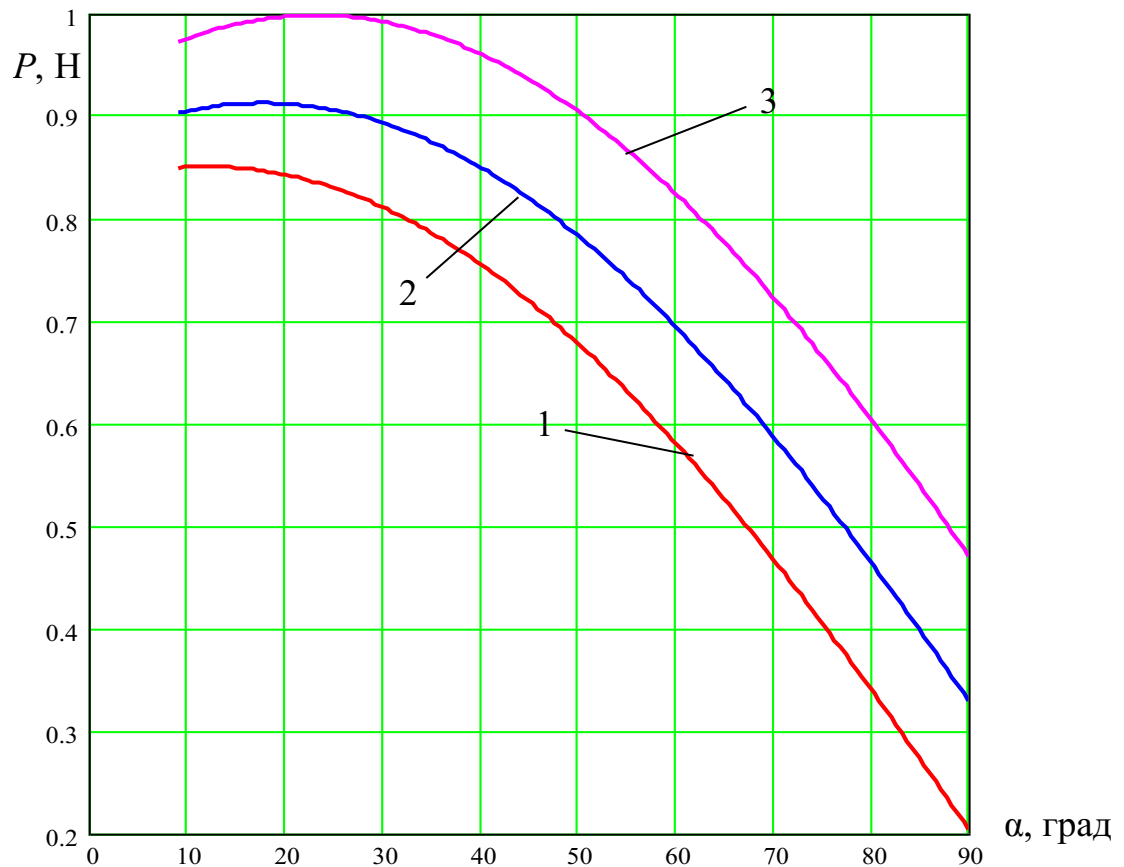


Рис. 2.10. Графіки залежності допустимого зовнішнього навантаження  $P$  на зернину в напрямку перпендикулярному виткам ЕЦГРО від кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном ЕЦГРО при переміщенні у конвеєрі при  $R_3=2$ мм:

1)  $\mu_1=0,2$ ;  $\mu_2=0,2$ ; 2)  $\mu_1=0,3$ ;  $\mu_2=0,3$ ; 3)  $\mu_1=0,4$ ;  $\mu_2=0,4$

Із аналізу графіків рис. 2.11 встановлено, що збільшення відстані  $l_1$  призводить до зменшення навантаження  $P$ , при чому збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$  призводить до зростання навантаження  $P$ . Суттєве зменшення навантаження  $P$  спостерігається при  $l_1 > 4$  мм, що дорівнює діаметру зернини. За допомогою представлених графіків рис. 2.11 та формули (2.33) можна підбирати відстань між волокнами ЕЦГРО з метою забезпечення переміщення зернин при встановленій величині зовнішнього навантаження.

Із рівняння (2.30) визначено умову защемлення зернини між волокнами ЕЦГРО та внутрішньою поверхнею кожука:

$$\mu_1 > \frac{\cos \alpha + \mu_2 \sin \alpha_2}{\sin \alpha + \mu_2 \cos \alpha_2}. \quad (2.39)$$

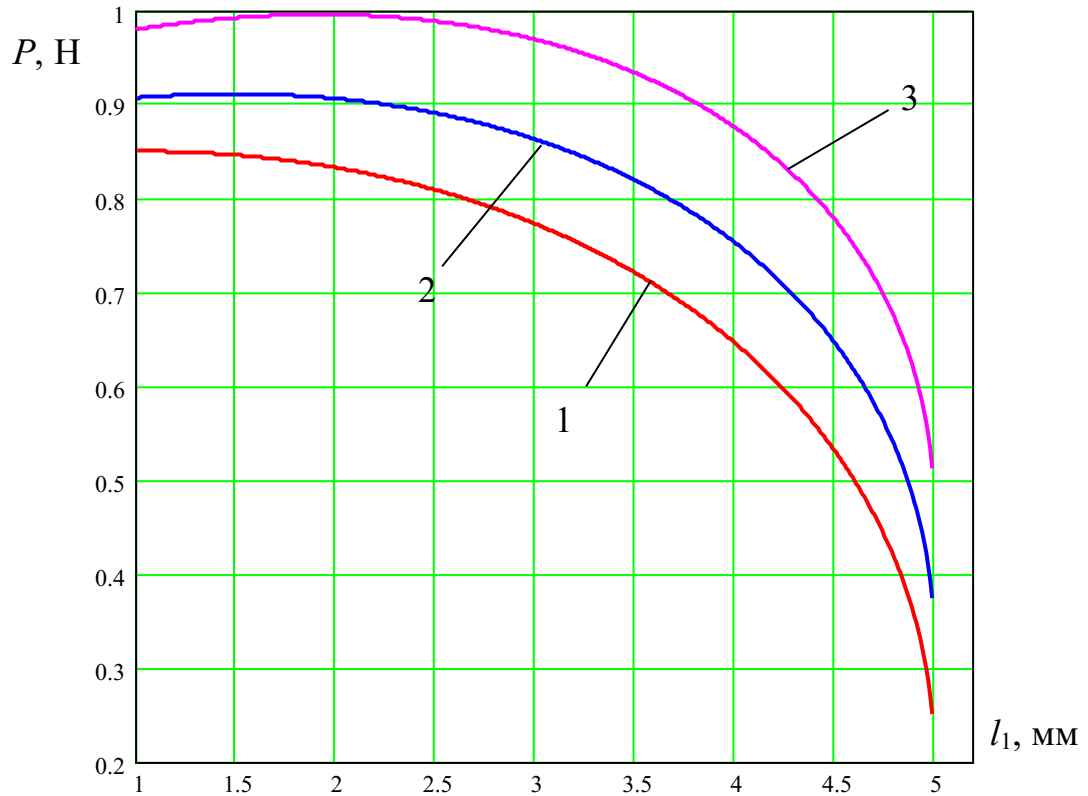


Рис. 2.11. Графіки залежності допустимого зовнішнього навантаження  $P$  на зернину в напрямку перпендикулярному виткам ЕЦГРО від відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, що взаємодіють із зерниною при переміщенні у конвеєрі при  $R_3=2\text{мм}$ ,  $R_v=0,5\text{ мм}$ : 1)  $\mu_1=0,2$ ;  $\mu_2=0,2$ ; 2)  $\mu_1=0,3$ ;  $\mu_2=0,3$ ; 3)  $\mu_1=0,4$ ;  $\mu_2=0,4$

Із рівняння (2.30) визначено умову защемлення зернини між волокнами ЕЦГРО та внутрішньою поверхнею кожуха:

$$\mu_1 > \frac{\cos \alpha + \mu_2 \sin \alpha_2}{\sin \alpha + \mu_2 \cos \alpha_2}. \quad (2.39)$$

Підставляючи рівняння (2.27) у не рівність (2.39), одержано:

$$\mu_1 > \frac{\cos \alpha + \frac{\mu_2 R_3 \sin \alpha}{R_2 - R_3}}{\sin \alpha + \mu_2 \sqrt{1 - \frac{R_3^2 \sin^2 \alpha}{(R_2 - R_3)^2}}}. \quad (2.40)$$

На основі формули (2.40) визначено умову защемлення зернини залежно від відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу:

$$\mu_1 > \frac{\sqrt{1 - \frac{l_1^2}{4(R_3 + R_v)^2} + \frac{\mu_2 R_3 l_1}{2(R_3 + R_v)(R_2 - R_3)}}}{\frac{l_1}{2(R_3 + R_v)} + \mu_2 \sqrt{1 - \frac{R_3^2 l_1^2}{4(R_3 + R_v)^2 (R_2 - R_3)^2}}}. \quad (2.41)$$

На основі рівнянь (2.40) та (2.41) побудовано графіки залежності коефіцієнта тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЩГРО, при якому відбувається защемлення зернини від кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО (рис. 2.12) та від відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, що взаємодіють із зерниною (рис. 2.13, рис. 2.14).

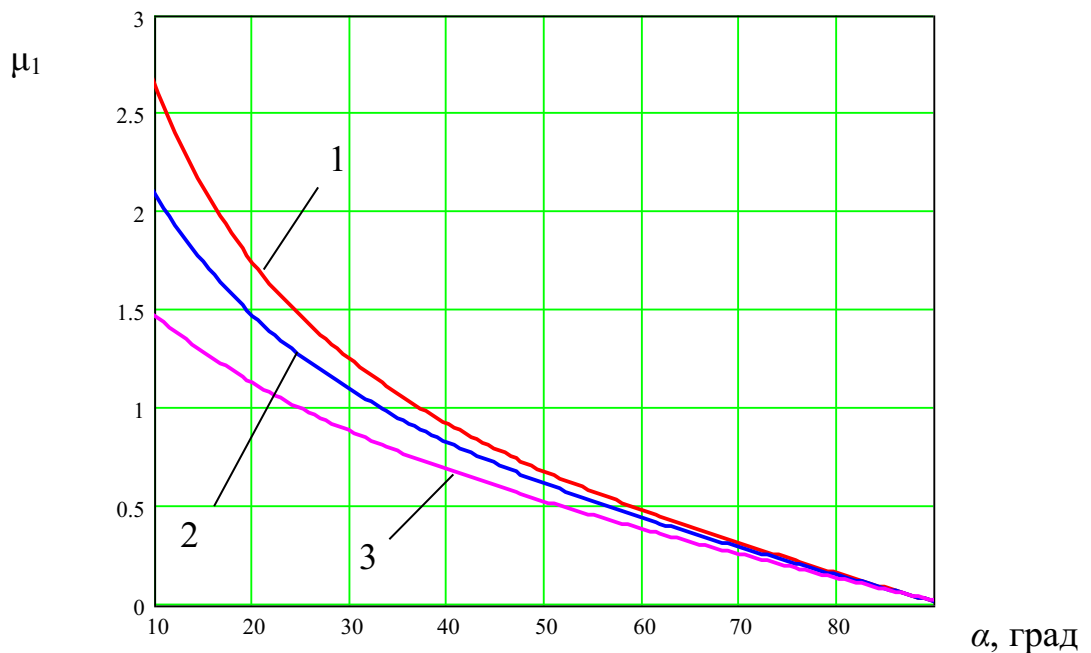


Рис. 2.12. Графіки залежності коефіцієнта тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЩГРО, при якому відбувається защемлення зернини від кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО при  $R_3=2\text{мм}$ ,  $R_v=0,5\text{ мм}$ : 1)  $\mu_2=0,2$ ; 2)  $\mu_2=0,3$ ; 3)  $\mu_2=0,5$

Із графіків рис. 2.12 та рис. 2.13 встановлено, що збільшення кута  $\alpha$  та відстані  $l_1$  призводить до збільшення ймовірності защемлення зернини між волокнами ЕЩГРО із коефіцієнтом тертя  $\mu_1 < 0,5$  для кута  $\alpha$  в межах від 50 град до 90 град та відстані  $l_1$  від 4 мм до 5 мм при радіусі зернини 2 мм.



Із графіка рис. 2.14 можна побачити, що для  $\mu_1 < 0,5$  найбільша ймовірність защемлення зернини відбувається при  $l_1 > 2R_3$ .

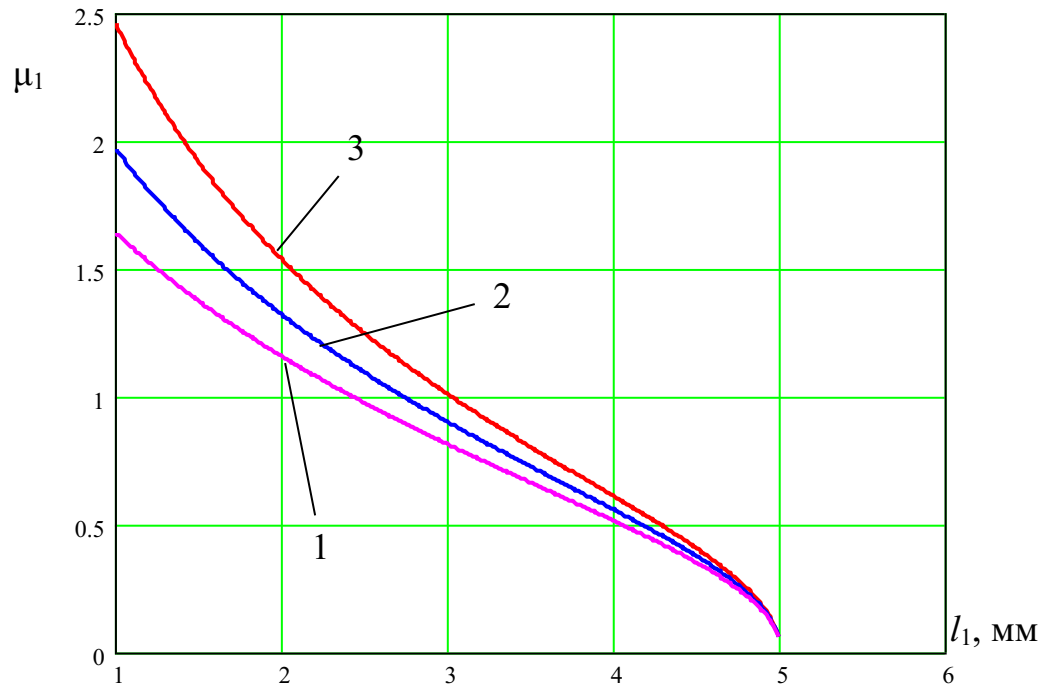


Рис. 2.13. Графіки залежності коефіцієнта тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЦГРО, при якому відбувається защемлення зернини від відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, що взаємодіють із зерниною при  $R_3=2$ мм,  $R_v=0,5$  мм: 1)  $\mu_2=0,2$ ; 2)  $\mu_2=0,3$ ; 3)  $\mu_2=0,5$

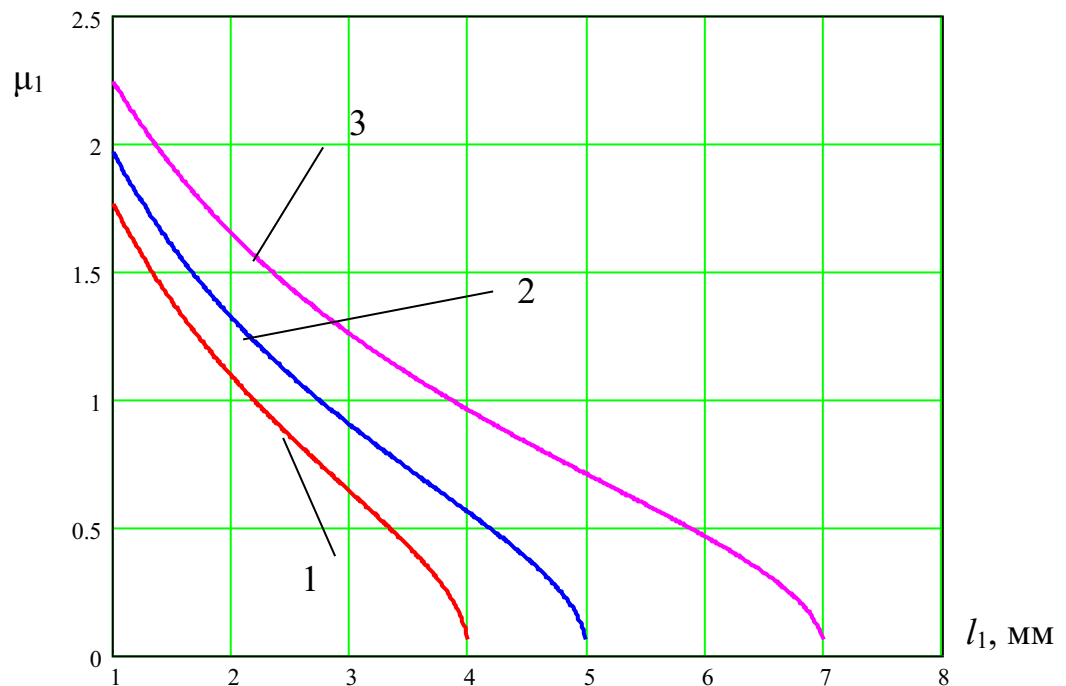


Рис. 2.14. Графіки залежності коефіцієнта тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЦГРО, при якому відбувається защемлення зернини від відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, що взаємодіють із зерниною при  $\mu_2=0,3$ ,  $R_v=0,5$  мм: 1)  $R_3=1,5$ мм; 2)  $R_3=2$ мм; 3)  $R_3=3$ мм

Із нерівності (2.40) визначено критичний кут  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО, при якому відбувається защемлення зернини, при цьому для малих значень кута  $\alpha_2$  прийнято  $\cos \alpha_2 \approx 1$ :

$$\alpha > \arcsin \left( \frac{R_3 \mu_1 \mu_2^2 - l \mu_1^2 \mu_2 + l \sqrt{(\mu_1 l - R_3 \mu_2)^2 + l^2 (1 - \mu_1^2 \mu_2^2)}}{(\mu_1 l - R_3 \mu_2)^2 + l^2} \right), \quad (2.42)$$

де  $l = R_2 - R_3$ .

Для випадку  $\mu_2=0$ , при відсутності контакту зернини із кожухом, нерівність (2.42) спрощується до вигляду:

$$\alpha > \arcsin \left( \frac{\sqrt{\mu_1^2 + 1}}{\mu_1^2 + 1} \right). \quad (2.43)$$

На основі нерівності (2.42) визначено критичну відстань  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, при якій відбувається защемлення зернини:

$$l_1 > 2(R_3 + R_v) \left( \frac{R_3 \mu_1 \mu_2^2 - l \mu_1^2 \mu_2 + l \sqrt{(\mu_1 l - R_3 \mu_2)^2 + l^2 (1 - \mu_1^2 \mu_2^2)}}{(\mu_1 l - R_3 \mu_2)^2 + l^2} \right). \quad (2.44)$$

Для випадку  $\mu_2=0$ :

$$l_1 > 2(R_3 + R_v) \frac{\sqrt{\mu_1^2 + 1}}{\mu_1^2 + 1}. \quad (2.45)$$

На основі нерівностей (2.43) та (2.44) побудовано графіки залежності кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО (рис. 2.15), зазору між волокнами ЕЩГРО (рис. 2.16), співвідношення зазору між волокнами ЕЩГРО та діаметра зернини (рис. 2.17), при яких відбувається защемлення зернини від коефіцієнта тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЩГРО.

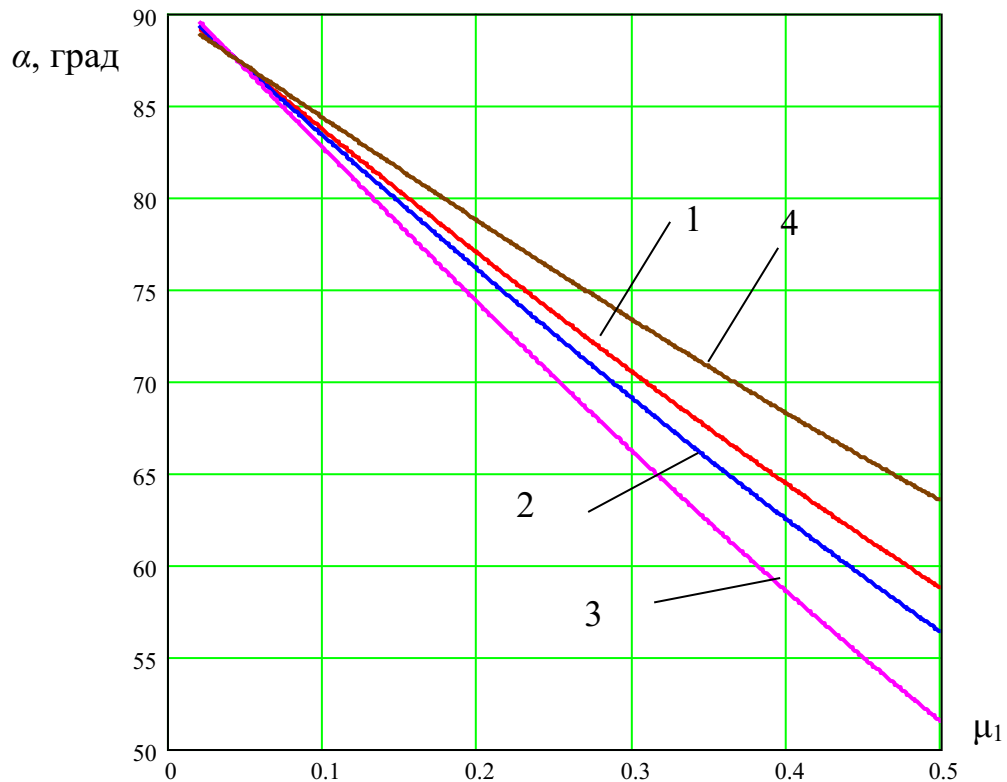


Рис. 2.15. Графіки залежності кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном ЕЩГРО, при якому відбувається защемлення зернини від коефіцієнт тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЩГРО при  $R_3=2\text{мм}$ ,  $R_v=0,5\text{ мм}$ :

1)  $\mu_2=0,2$ ; 2)  $\mu_2=0,3$ ; 3)  $\mu_2=0,5$ ; 4)  $\mu_2=0$

Із графіків рисунка 2.15 бачимо, що збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$  призводить до зменшення кута  $\alpha$ , при якому можливе защемлення зернини. При коефіцієнті тертя  $\mu_1=0,5$  кут  $\alpha$  знаходиться в межах від 52...64 градусів до 90 градусів для різних значень коефіцієнта тертя  $\mu_2$ . При відсутності тертя між зерниною та кожухом  $\mu_2=0$  також можливе защемлення зернини між волокнами.

Із графіків рисунків 2.16 та 2.17 встановлено співвідношення зазору між волокнами та діаметром зернини, при яких можливе защемлення зернини для значень коефіцієнта тертя  $\mu_1$  до 0,7. Чим більший коефіцієнт тертя  $\mu_1$ , тим менше таке співвідношення. Для коефіцієнта тертя  $\mu_1=0,5$  защемлення зернини можливе при співвідношення зазору до діаметра зернини від 0,75, а для  $\mu_1=0,3$  – від 0,89.

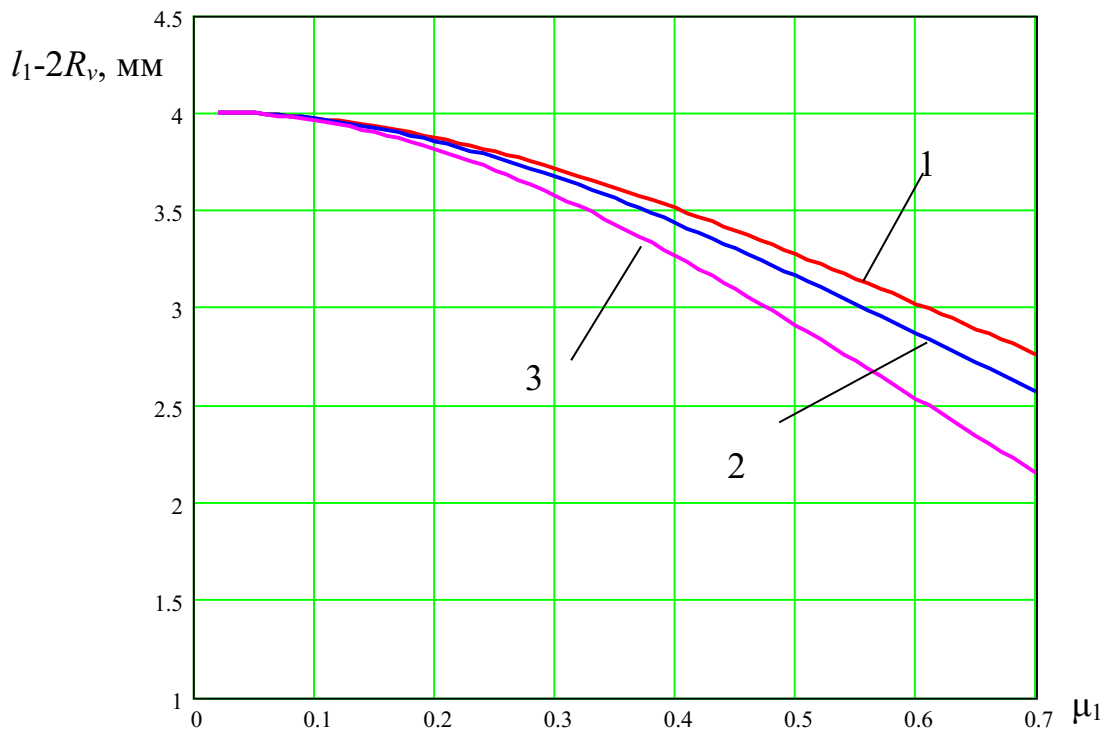


Рис. 2.16. Графіки залежності зазору між волокнами ЕЦГРО, при якому відбувається защемлення зернини від коефіцієнт тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЦГРО при  $R_3=2\text{мм}$ ,  $R_v=0,5\text{ мм}$ :  
1)  $\mu_2=0,2$ ; 2)  $\mu_2=0,3$ ; 3)  $\mu_2=0,5$

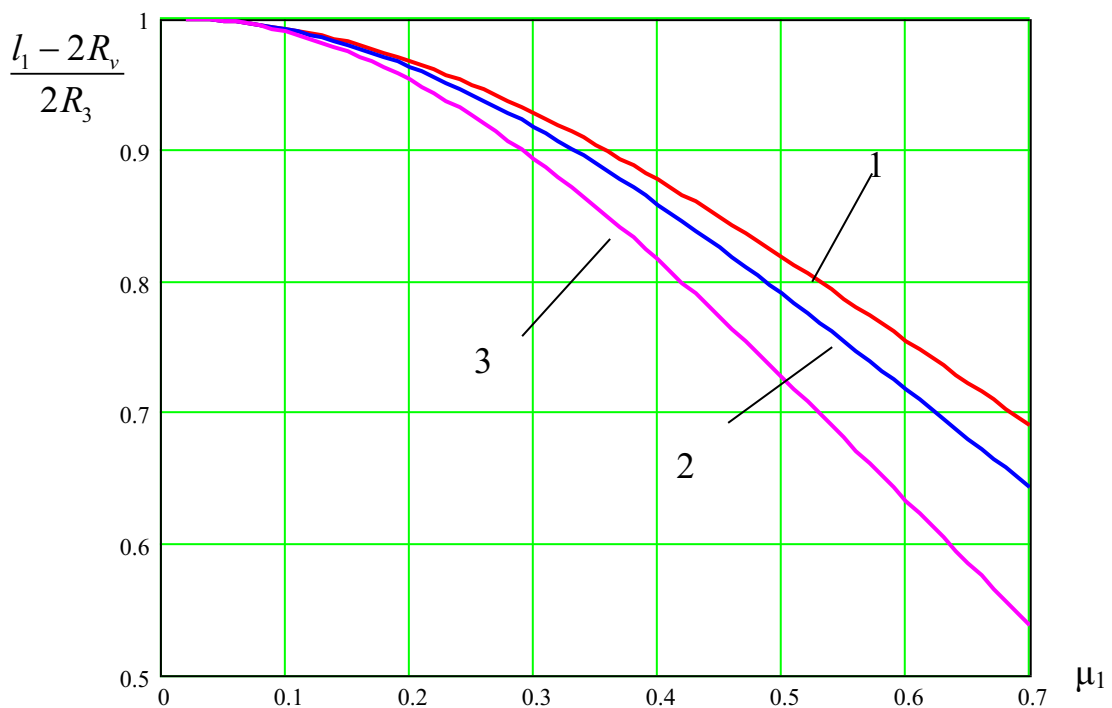


Рис. 2.17. Графіки залежності співвідношення зазору між волокнами ЕЦГРО та діаметра зернини, при якому відбувається защемлення зернини від коефіцієнт тертя між поверхнею зернини та поверхнею волокна ЕЦГРО при  $R_v=0,5\text{ мм}$ : 1)  $\mu_2=0,2$ ; 2)  $\mu_2=0,3$ ; 3)  $\mu_2=0,5$

## 2.4. Висновки

1. Проведено структурний синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями з метою зменшення пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами у порівнянні із традиційними жорсткими шнеками, використовуючи морфологічний аналіз з ієрархічним групуванням конструктивних ознак. Одержано декілька конструкцій гвинтових робочих органів, що відповідають меті синтезу, на які одержано патенти України на корисні моделі, зокрема з щіткоподібною гвинтовою частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, із суцільною камероподібною частиною.

2. Проведено теоретичні дослідження деформації волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів при транспортуванні зернового матеріалу. Виведено диференціальне рівняння для середньої лінії деформації декількох волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу горизонтального та полого нахиленого гвинтового конвеєра із тихохідним режимом роботи, які розміщені у перпендикулярній площині до розподіленого навантаження під час транспортування сипкого матеріалу при коефіцієнті завантаження до 0,45. Розв'язок диференціального рівняння виконано за допомогою чисельного методу і представлено у вигляді графіків.

3. Встановлено, що при зростанні зовнішнього навантаження  $q_{\min}$  та  $q_{\max}$  до 0,06 Н/мм та 0,1 Н/мм відповідно відбувається деформація волокон еластичного щіткоподібного на величину 5 мм. При зменшенні діаметра волокна від 2,3 мм до 1,7 мм для однакових зовнішніх навантажень відбувається деформація волокон на величину 5 мм. При збільшенні довжини частини волокна, що використовується для усунення зазору між гвинтовим робочим органом та кожухом, від 0,1 мм до 0,3 мм виникає збільшення попередньої деформації волокон від 0,7 мм до 3,5 мм, що забезпечує підвищення навантажувальної здатності еластичного щіткоподібного шнека. Проте це призводить до зростання потужності транспортування матеріалу через підвищення сили тертя між волокнами еластичного щіткоподібного шнека та

кожухом конвеєра. При збільшенні робочої частини волокон від 20 мм до 40 мм для однакових зовнішніх навантажень відбувається деформація волокон на величину 8,6 мм. Відтак використання волокон із більшою довжиною робочої частини знижує навантажувальну здатність еластичного щіткоподібного шнека, проте призводить до зменшення величини травмування транспортованого матеріалу.

4. Проведено теоретичні дослідження параметрів взаємодії волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу із зерновим матеріалом. Виведено рівняння рівноваги зернини в початковий момент контакту із волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу. Визначено кут контакту між зерниною та волокном гвинтового робочого органу. Виведено рівняння для знаходження допустимого зовнішнього навантаження  $P$  на зернину в напрямку перпендикулярному виткам гвинтового робочого органу, при якому величина прогину волокон не перевищує граничну величину, при якій забезпечується транспортування зернового матеріалу.

5. Встановлено, що збільшення кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном призводить до зменшення значення зовнішнього навантаження  $P$ . Точки початку найбільшого спаду функції  $P(\alpha)$  залежать від значення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  між зерниною та волокном та  $\mu_2$  між зерниною та кожухом. Збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$  зумовлює зростання навантаження  $P$ . Наприклад, для  $\mu_1 = \mu_2 = 0,2$  точка перегину визначається кутом  $\alpha = 35$  град, а для  $\mu_1 = \mu_2 = 0,4$  – кутом  $\alpha = 50$  град. При куті  $\alpha = 90$  град на зернину діють тільки сили тертя. Збільшення відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, що взаємодіють із зерниною, призводить до зменшення навантаження  $P$ , при чому збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$  призводить до зростання навантаження  $P$ . Суттєве зменшення навантаження  $P$  спостерігається при  $l_1$ , що дорівнює діаметру зернини.

6. Визначено умову защемлення зернини між волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу та внутрішньою поверхнею кожуха. Встановлено, що збільшення кута  $\alpha$  контакту між зерниною та

волоконном та відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу призводить до збільшення ймовірності защемлення зернини між волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу. Для коефіцієнта тертя між зерниною та волокном  $\mu_1 < 0,5$  кут  $\alpha$  знаходиться в межах від 50 град до 90 град, а відстань  $l_1$  від 4 мм до 5 мм при радіусі зернини 2 мм.

7. Визначено критичний кут  $\alpha$  контакту між зерниною і волокном та критичну відстань  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу, при яких відбувається защемлення зернини. Збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$  призводить до зменшення кута  $\alpha$ , при якому можливе защемлення зернини. При коефіцієнті тертя  $\mu_1 = 0,5$  кут  $\alpha$  знаходиться в межах від 52...64 градусів до 90 градусів для різних значень коефіцієнта тертя  $\mu_2$ . При відсутності тертя між зерниною та кожухом  $\mu_2 = 0$  також можливе защемлення зернини між волокнами. Встановлено співвідношення зазору між волокнами та діаметром зернини, при яких можливе защемлення зернини для значень коефіцієнта тертя  $\mu_1$  до 0,7. Чим більший коефіцієнт тертя  $\mu_1$ , тим менше таке співвідношення. Для коефіцієнта тертя  $\mu_1 = 0,5$  защемлення зернини можливе при співвідношенні зазору до діаметра зернини від 0,75, а для  $\mu_1 = 0,3$  – від 0,89.

## РОЗДІЛ 3

# ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ШНЕКОВИХ МЕХАНІЗМІВ З ЕЛАСТИЧНИМИ ЗМІННИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ НАСІННЄВИХ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

### 3.1. Програма експериментальних досліджень

В процесі виконання кваліфікаційної роботи для перевірки здатності ефективного транспортування зернових матеріалів гвинтовими конвеєрами із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями, конструкції яких одержані в результаті морфологічного синтезу (підрозділ 2.1), проведено ряд експериментальних досліджень. В процесі дослідного практичного використання здійснювалось коректування та вдосконалення запропонованих конструкцій гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями, визначення їх раціональних конструкційних та технологічних параметрів, а також вносились зміни у запропоновані теоретичні моделі.

У програму експериментальних досліджень внесено наступні етапи:

- проектування та виготовлення дослідних зразків гвинтових конвеєрів із різними діаметрами кожухів та трьома змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями: суцільною камероподібною частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, з щіткоподібною гвинтовою частиною;

- проведення лабораторних досліджень зі встановленням закономірностей взаємозв'язку продуктивності транспортування та ступеня пошкодження насіннєвих зернових матеріалів гвинтовими конвеєрами із еластичними змінними поверхнями робочих органів від зміни частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$  та кута нахилу  $\alpha_1$  гвинтового конвеєра під час переміщення ячменю та кукурудзи;

- проведення лабораторних досліджень із визначенням залежності величини максимальної деформації волокон еластичного щіткоподібного



гвинтового робочого органу від зміни діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$ , довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l$  та навантаження  $P$  від мірних вантажів;

- виведення рівнянь регресії у кодованих та натуральних величинах на основі статистичної обробки результатів експериментальних досліджень, а також перевірка їх адекватності за допомогою прикладного програмного забезпечення;

- перевірка працездатності запропонованих конструкцій гвинтових конвеєрів із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями в умовах реального виробництва.

Дослідження проводились в 2019 – 2023 роках в лабораторії піднімально-транспортних машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та частково на Селянському фермерському науково-виробничому господарстві «Коваль».

### **3.2. Параметри шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями для проведення експериментальних досліджень**

На основі проведеного патентного пошуку, аналізу наукових літературних джерел та проведеного структурного синтезу розроблено та отримано патенти України на корисні моделі [111-119], що включають декілька конструкцій гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями, для дослідження яких спроектовано і виготовлено експериментальну установку та відповідні гвинтові робочі органи з еластичними поверхнями.

Дослідний зразок гвинтового конвеєра із можливістю використання різних діаметрів кожуха та змінних гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями зображено на рисунках 3.1 та 3.2. Основним конструктивними елементами установки є базова рама 1, на котрій на пальці 2, з можливістю кутового зміщення відносно горизонту, розміщено зварну рухому раму 3. Фіксація рухомої рами 3 під визначеним програмою експериментальних досліджень кутом здійснюється за допомогою кронштейна 4 та пальців 5, що встановлюються у отвори кронштейна 4 та рухомої рами 3. На рухомій рамі 3

закріплено електродвигун 6 із шківом 7 та пасовою передачею 8. Також на рухомій рамі 3 за допомогою болтів 9 прикріплено циліндричний кожух 10. Таке виконання дозволяє швидко замінювати кожухи 10 різних діаметрів під час проведення експериментальних досліджень. У кожусі 10 з двох торцевих сторін закріплено корпуси 11 та 12, в яких на підшипниках кочення 13 та 14, розміщено ліву 15 і праву 16 піввісі. На лівій та правій півосях 15 та 16 за допомогою пальців 17 розміщено пустотілий вал 18. На валі 18 закріплено еластичні щіткоподібні гвинтові робочі поверхні 19 за допомогою трубок 20, що разом формує конструкцію гвинтового робочого органу 26 (на рис. 3.3 представлено різні конструкції гвинтового робочого органу 26 із еластичними поверхнями). На лівій півосі 15 розміщено шків 21, що приєднано до пасової передачі 8. На кожусі 10 розміщено завантажувальний бункер 22 та вивантажувальний патрубок 23. Електродвигун 6 за допомогою кабелів приєднано до перетворювача частоти змінного струму (Altivar 71), що розміщено у пункті 24 керування приводом і конвеєром загалом. Перетворювач частоти струму під'єднано до ПК 25 з програмним забезпеченням PowerSuite версії 2.3.0.

Під час проведення експериментальних досліджень зерновий матеріал подавали через бункер 22 у кожух 10, де за допомогою гвинтового робочого органу 26 з еластичними поверхнями відбувалось його транспортування вздовж кожуха 10 до вивантажувального парубка 23, звідки матеріал переміщувався у мірну тару. Обертний рух гвинтовому робочому органу 26 передавався від електродвигуна 6 через пасову передачу 8. Керування режимами роботи двигуна 6 та конвеєра здійснювалось за допомогою ПК 25 через перетворювач 24 частоти струму Altivar 71 за допомогою програмного забезпечення PowerSuite. Вказане програмне забезпечення дозволяє одержувати дані у вигляді числових таблиць та графіків в реальному часі про потужність, що витрачається для транспортування зернового матеріалу, та крутний момент на валі електродвигуна. Перетворювач частоти, також, дозволяє забезпечувати плавний режим пуску електродвигуна 6 та гвинтового робочого органу 26.

Продуктивність конвеєра визначалась зважуванням електронними вагами

зернового матеріалу, що піддавався транспортуванню за визначений проміжок часу.

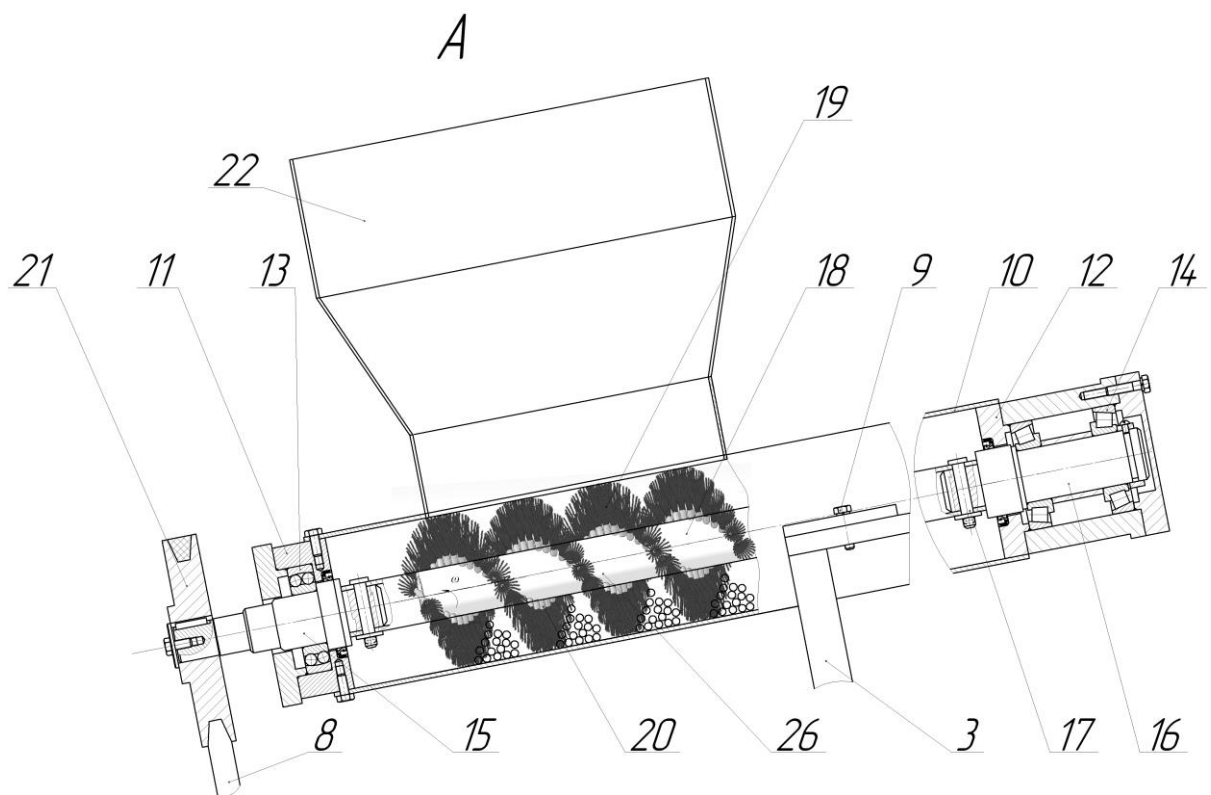
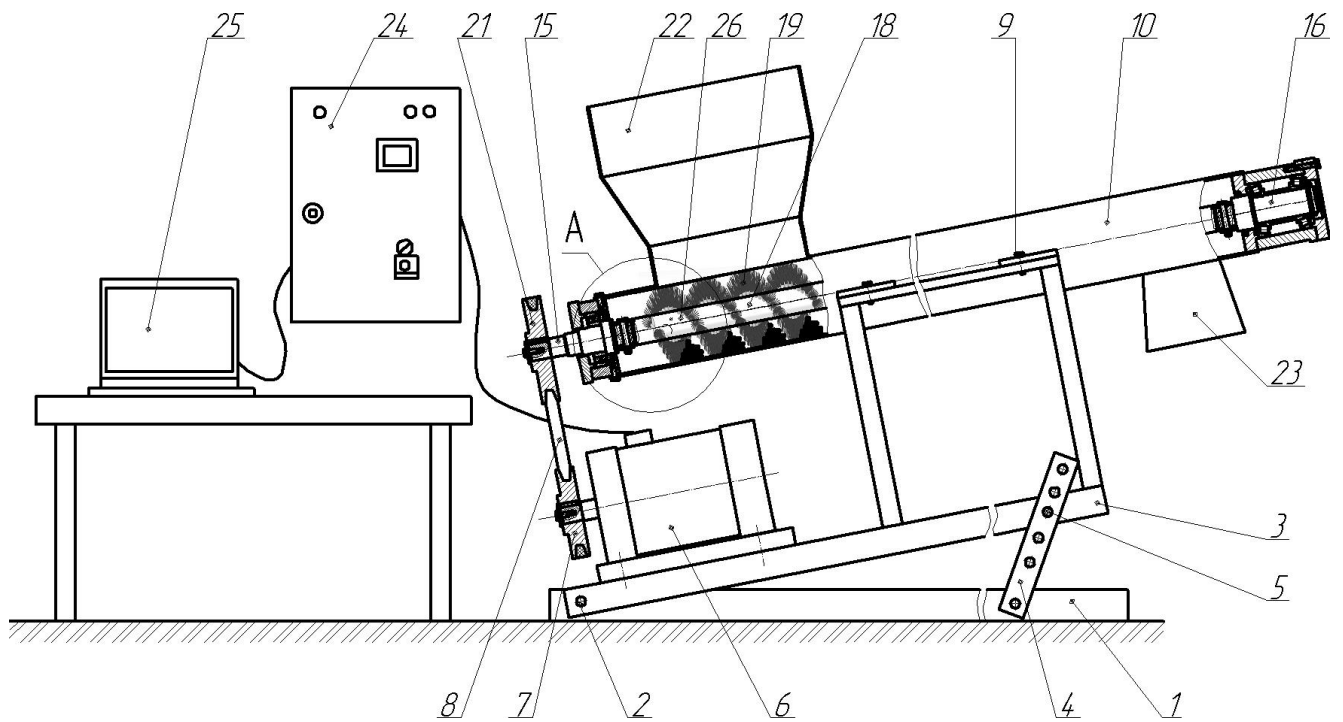


Рис. 3.1. Конструктивна схема дослідного зразка гвинтового конвеєра із змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями

Під час досліджень використовувались кожухи трьох різних діаметрів та з трьома змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями: суцільною камероподібною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, з щіткоподібною гвинтовою частиною.

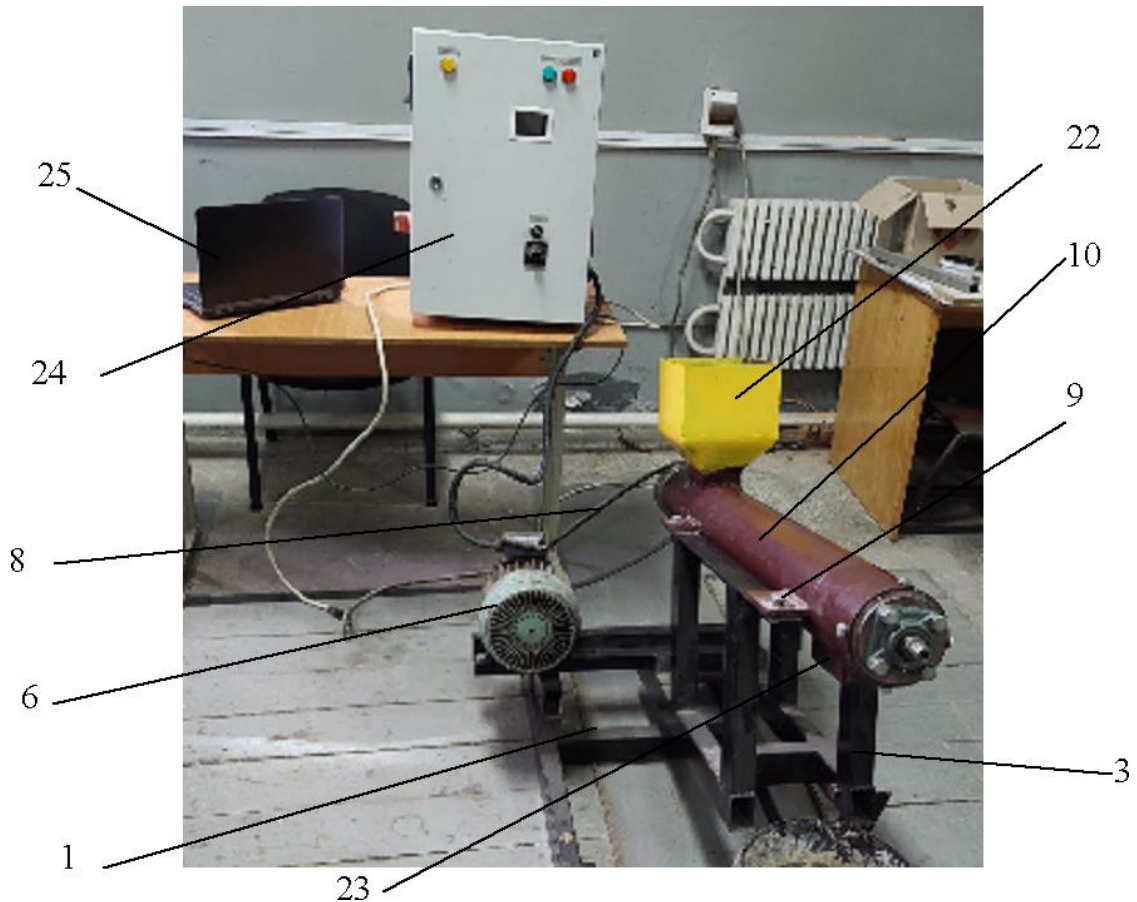


Рис. 3.2. Загальний вигляд дослідного зразка гвинтового конвеєра із змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями

На рис. 3.3 представлено загальні вигляди досліджуваних гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями. Представимо їх коротку характеристику.

Гвинтовий робочий орган, зображений на рис. 3.3 *a*, складається з пустотілого вала 1, в котрому, перпендикулярно до його центральної осі, по гвинтовій лінії виконані отвори, в яких закріплені пустотілі циліндричні трубки 2, що виступають над зовнішньою поверхнею пустотілого вала із закріпленими в них пучками 3 еластичних щіткоподібних елементів (еластичних щіток).

На рис. 3.3 б зображено гвинтовий робочий орган, який складається з пустотілого вала 1, на якому жорстко закріплено гвинтову спіраль 2 з отворами для кріплення еластичних щіткоподібних елементів 3 кріпильними елементами. Еластичний щіткоподібний елемент 3 виконано із пружної основи 4 і периферійної еластичної щіткоподібної частини 5.

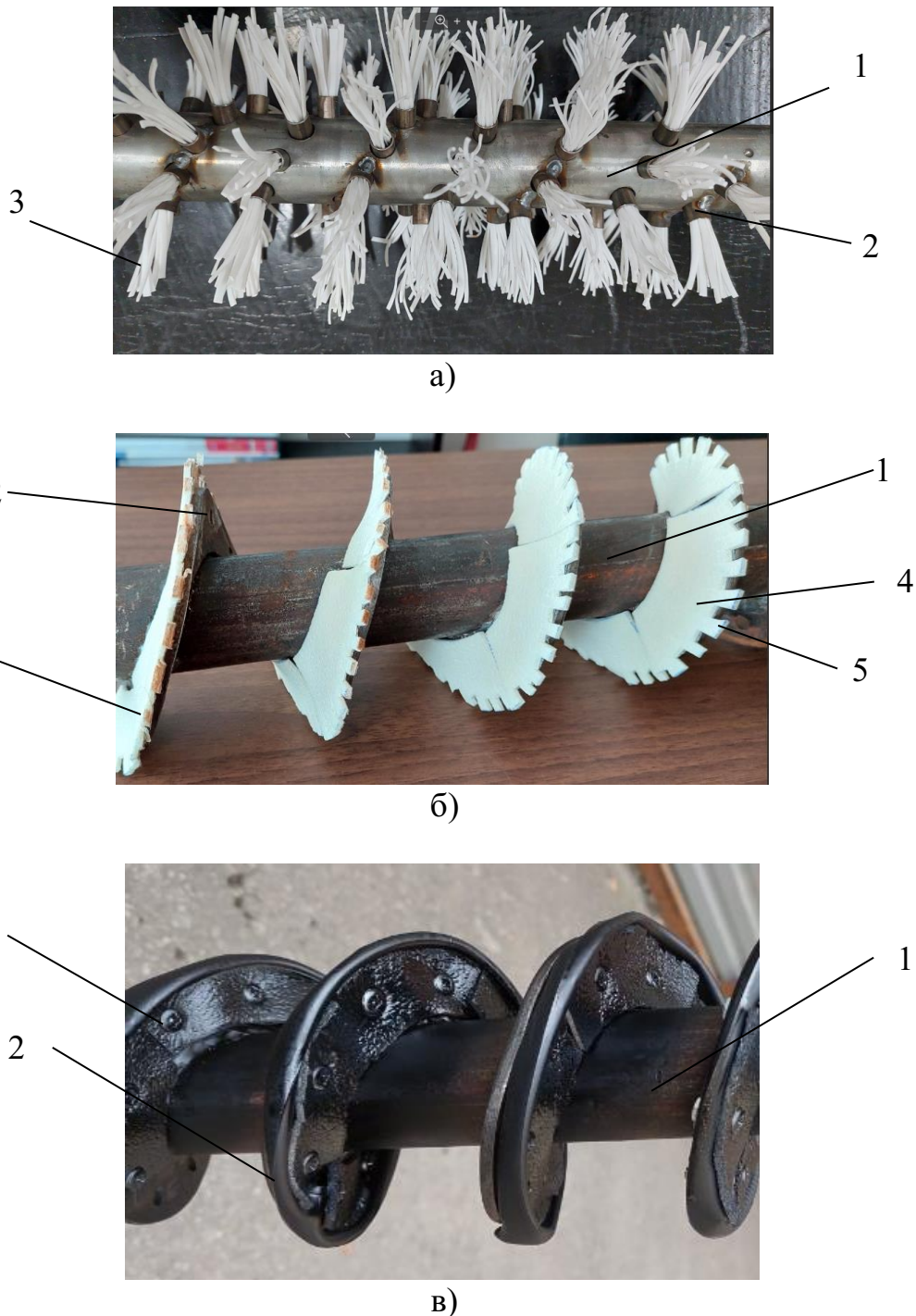
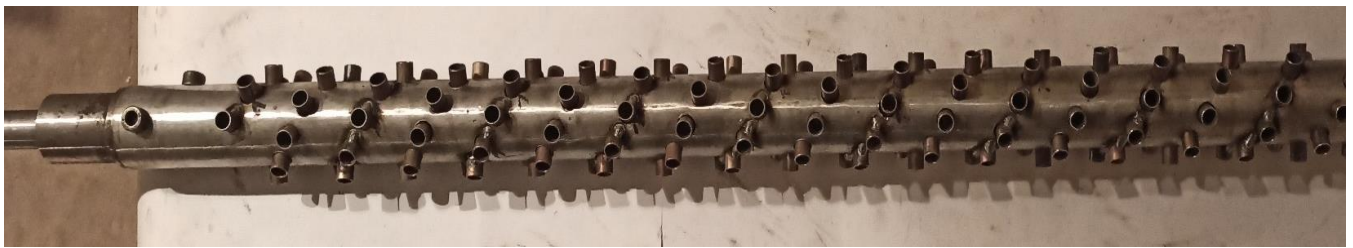


Рис. 3.3. Загальні вигляди гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями: а) з щіткоподібною гвинтовою частиною; б) з периферійною еластичною щіткоподібною частиною; в) із суцільною камероподібною частиною

Гвинтовий робочий орган, зображений на рис. 3.3 в, складається з пустотілого вала 1, на якому жорстко закріплено гвинтову спіраль з отворами для кріплення суцільного еластичного камероподібного елемента 2 кріпильними елементами 3.

Окремі елементи технологічних операцій виготовлення еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібним елементом представлені на рисунку 3.4. Зокрема на рис. 3.4 а представлено пустотілий вал із привареними циліндричними трубками, а на рис. 3.4 б пучки еластичних щіткоподібних елементів перед з'єднанням із валом.

При використанні даної технології можна одержати лише двозахідні еластичні гвинтові робочі органи (з подвійною спіраллю).



а)



б)

Рис. 3.4. Елементи технологічних операцій виготовлення еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібним елементом: а) пустотілий вал із привареними циліндричними трубками по гвинтовій лінії б) пучки еластичних щіткоподібних елементів перед з'єднанням із валом

На рис. 3.5 представлено загальні вигляди розташування у бункері досліджуваних гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями.

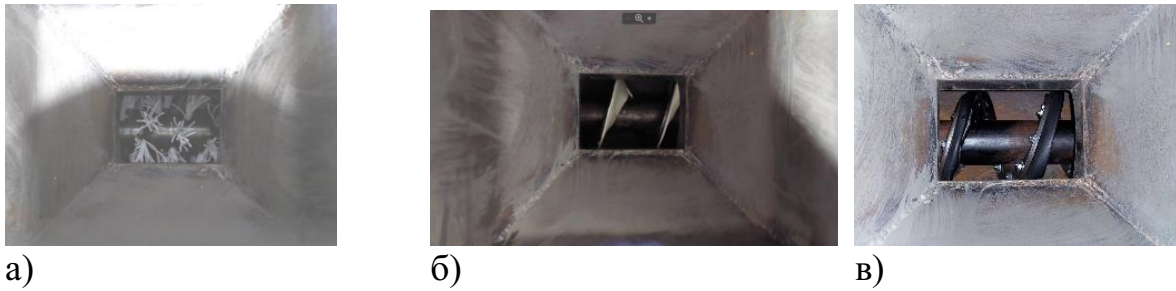


Рис. 3.5. Загальний вигляд у бункері гвинтового робочого органу із еластичними поверхнями: а) з щіткоподібною гвинтовою частиною; б) з периферійною еластичною щіткоподібною частиною; в) із суцільною камероподібною частиною

На рисунку 3.6 представлено загальний вигляд заміни кожухів різних діаметрів та гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями на одній установці відповідно до програми експериментальних досліджень. Усі решта елементи установки (рама з двигуном, підшипникові вузли, півосі, пасова передача) залишались незмінними, що знижувало вартість проведення експериментальних досліджень. Для різних розмірів кожухів та валів гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями використовувались перехідні втулки.



Рис. 3.6. Загальний вигляд заміни кожухів різних діаметрів та гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями на одній установці відповідно до програми експериментальних досліджень: 1 – кожухи; 2 – гвинтові робочі органи; 3 – елементи еластичних поверхонь

Вікно програмного забезпечення PowerSuite для керування частотним перетворювачем Altivar 71 з одержаними даними експерименту у вигляді графіків в реальному часі про потужність, що витрачається для транспортування зернового матеріалу та крутний момент на валі електродвигуна, представлено на рисунку 3.7.

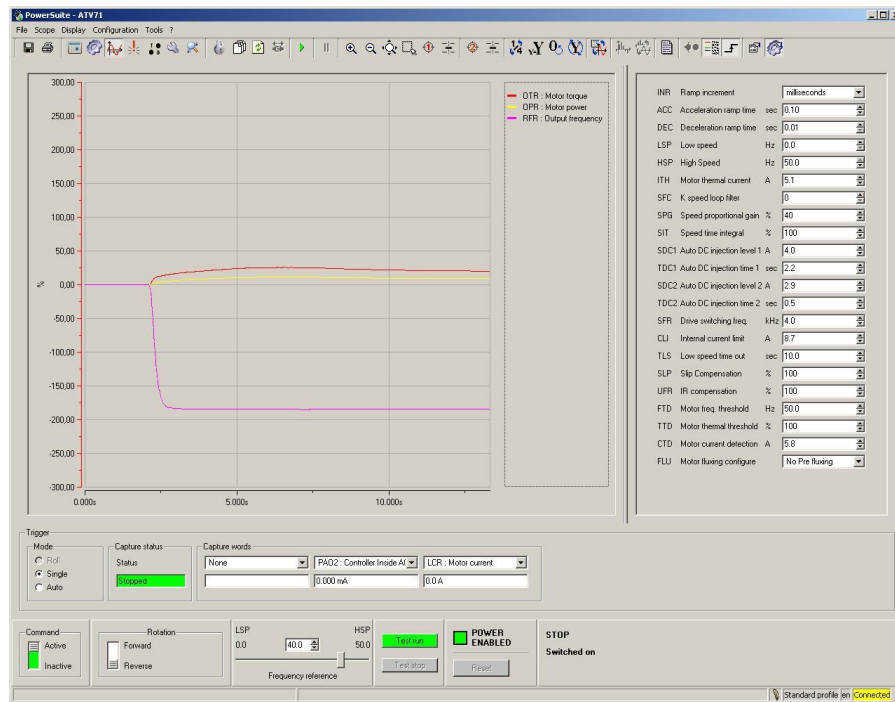


Рис. 3.7. Вікно програмного забезпечення з одержаними даними експерименту у вигляді графіків в реальному часі про потужність, що витрачається для транспортування зернового матеріалу та крутний момент на валі електродвигуна

### 3.3. Методика проведення експериментів з визначення продуктивності та ступеня пошкодження насіннєвого зернового матеріалу при їх транспортуванні шнековими механізмами з еластичними змінними поверхнями

Для досягнення поставлених завдань кваліфікаційної роботи і забезпечення достатньої точності одержаних даних для виробничого



використання розроблених установок перед початком проведення основних досліджень проведено аналіз і вибір змінних конструктивних та технологічних факторів процесу транспортування зернових матеріалів гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями на основі теоретичних даних та попередніх експериментальних досліджень.

В процесі практичних досліджень використано математичний метод планування експерименту із використанням відповідних формул та програмного забезпечення. Це дозволило проводити дослідження із одночасною зміною трьох основних конструктивних та технологічних факторів на трьох рівнях, при цьому визначено оптимальну кількість дослідів з найменшими витратами часу на експерименти.

Основні етапи трьохфакторного експерименту базувались [62, 125] на кодуванні основних змінних факторів, складання плану експерименту, випадковий вибір послідовності виконання досліджень, виконання рандомізованого плану експерименту, статистична обробка результатів експерименту, визначення рівнянь регресії з відкиданням незначущих коефіцієнтів, перевірка адекватності моделі.

Експериментальні дослідження проведено із використанням спроектованих та виготовлених елементів установки гвинтового конвеєра із різними діаметрами кожухів та трьома змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями: суцільною камероподібною, з периферійною еластичною щіткоподібною та з щіткоподібною гвинтовою частиною, що представлено у підрозділі 3.2.

Для визначення впливу параметрів (незалежних факторів  $x_i$ ) процесу транспортування зернового матеріалу гвинтовими конвеєрами оснащеними трьома різними типами гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями на продуктивність транспортування та ступінь пошкодження насіннєвих зернових матеріалів під час транспортування кукурудзи та ячменю (параметри оптимізації  $Q$ ,  $T$ ) проведено повнофакторні експерименти від зміни трьох основних факторів: частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ ,

внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha$ , тобто  $Q=f(n,D,\alpha_1)$ ,  $T=f(n,D, \alpha_1)$ .

Визначено межі варіювання основних змінних факторів, що впливають на досліджувані параметри роботи гвинтових конвеєрів із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями:

- частота обертання гвинтового робочого органу  $n = 284 - 511,2$  об/хв, що відповідало встановленій частоті струму на частотному перетворювачі 10 - 18 Гц;
- внутрішнього діаметра кожуха  $D = 96 - 108$  мм;
- кута нахилу конвеєра  $\alpha_1 = 0 - 30$  град.

Здійснили перехід від дійсних значень незалежних факторів експерименту до кодованих для усунення впливу їх неоднорідності з різними одиницями вимірювання та порядками для переходу до єдиної системи обрахунків.

Під час транспортування зернового матеріалу відбувалось вимірювання продуктивності при використанні трьох різних типів гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями. Для визначення ступеня пошкодження насінневого зернового матеріалу до і після транспортування гвинтовими конвеєрами з різними типами гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями відбирались проби матеріалу для подальших досліджень. Одержані результати заносились у таблиці план-матриць експерименту.

Результати експериментів у вигляді матриць піддавались статистичній обробці із застосуванням методик кореляційного й регресійного аналізу одержаних даних [62, 125] та відповідного програмного забезпечення. Після цього визначались коефіцієнти рівнянь регресії та емпіричні рівняння, що піддавались перевірці на адекватність.

Змінні незалежні фактори  $n$ ,  $D$  та  $\alpha$  є неоднорідними та мають різний вплив на продуктивність транспортування  $Q$  та ступінь пошкодження  $T$  насінневих зернових матеріалів під час транспортування кукурудзи та ячменю при використанні трьох різних типів гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями, тому їх приведено до єдиної системи розрахунків шляхом

кодування.

Зв'язок між кодованими  $x_i$  та натуральними  $X_i$  величинами факторів експерименту [62, 125]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (3.1)$$

де  $X_{0i}$  - натуральна величина  $i$ -го фактору нульового рівня;  $\Delta X_i$  - інтервал варіювання.

Натуральну величину  $i$ -го фактору нульового рівня визначено за формулою [62, 125]:

$$X_{0i} = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}, \quad (3.2)$$

де  $X_{i\max}$  - значення фактору верхнього рівня;  $X_{i\min}$  - значення фактору нижнього рівня.

Інтервал варіювання фактора [62, 125]:

$$\Delta X_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}. \quad (3.3)$$

Верхній, нижній та нульовий рівні зміни факторів позначались як +1, -1, 0 відповідно у план-матриці експерименту.

За формулою (3.2) визначено нульові рівні кожного із факторів:

- для частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ :

$$X_{01} = \frac{284 + 511,2}{2} = 397,6 \text{ (об/хв)}; \quad (3.4)$$

- для внутрішнього діаметра кожуха  $D$ :

$$X_{02} = \frac{96 + 108}{2} = 102 \text{ (мм)}; \quad (3.5)$$

- для кута нахилу конвеєра  $\alpha$ :

$$X_{03} = \frac{0 + 30}{2} = 15 \text{ (град)}. \quad (3.6)$$

Інтервали варіювання факторів та їх кодовані значення (3.3):

$$\Delta X_1 = \frac{511,2 - 284}{2} = 113,6 (\text{Н}); \quad x_1 = \frac{n - 397,6}{113,6}; \quad (3.7)$$

$$\Delta X_2 = \frac{108 - 96}{2} = 6 (\text{мм}); \quad x_2 = \frac{D - 102}{6}; \quad (3.8)$$

$$\Delta X_3 = \frac{30 - 0}{2} = 15 (\text{град}); \quad x_3 = \frac{\alpha_1 - 15}{15}. \quad (3.9)$$

Аналіз точкових діаграм, одержаних в результаті попередніх експериментальних досліджень, показав, що залежність досліджуваних параметрів транспортування зернового матеріалу гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями не можливо описати лінійними моделями із достатньою точністю, тому доцільно використовувати рівняння регресії другого порядку, що враховують ефекти взаємодії із варіюванням кожного параметру мінімум на трьох рівнях. Для виведення рівнянь регресії використано загально відому модель другого порядку [62, 125]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 \cdot x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (3.10)$$

де  $\hat{y}$  - досліджуваний параметр транспортування насінневого зернового матеріалу гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями;  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  - коефіцієнти рівняння регресії;  $x_1, x_2, x_3$  - незалежні фактори у кодованих величинах.

На основі проведеного кодування факторів та встановлених рівнів їх варіювання сформовано таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

Результати проведеного кодування факторів та встановлених рівнів їх варіювання при дослідженні параметрів транспортування насінневого зернового матеріалу гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Частота обертання гвинтового робочого органу	$n$ , об/хв	$x_1$	113,6	511,2 (+1)	397,6 (0)	284 (-1)
Внутрішній діаметр кожуха	$D$ , мм	$x_2$	6	108 (+1)	102 (0)	96 (-1)
Кут нахилу конвєєра	$\alpha_1$ ,град	$x_3$	15	30 (+1)	15 (0)	0 (-1)

Коефіцієнти рівняння регресії другого порядку визначались за відомими методиками на основі заповненої матриці проведення експериментів. При цьому використано центральні ротатабельні плани із зміною трьох факторів ( $k=3$ ) повного факторного експерименту  $3^3$  для визначення можливої екстремальної точки у факторному просторі з виведенням моделі, що описується рівнянням (3.10). Для усунення впливу випадкових неконтрольованих факторів (проковзування пасової передачі, зміна напруги та частоти живлення), проведено рандомізацію послідовності виконання дослідів за допомогою використання підпрограми генерування випадкових чисел.

План-матрицю проведення експериментів представлено у додатку А у вигляді таблиці [62, 125].

Коефіцієнти рівняння регресії (3.10) встановлено, використовуючи формули [62, 125]:

$$b_0 = a_1 \cdot \sum_{u=1}^N \bar{y}_u - a_2 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u ; \quad (3.11)$$

$$b_i = a_3 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot \bar{y}_u ; \quad i = 1, 2, 3; \quad (3.12)$$

$$b_{ij} = a_4 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \bar{y}_u ; \quad 1 \leq i < j \leq k ; \quad (3.13)$$

$$b_{ii} = a_5 \cdot \sum x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u - a_6 \cdot \sum \sum x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u - a_7 \cdot \sum \bar{y}_u. \quad (3.14)$$

де  $x_{iu}$  - значення змінної після кодування у стовпці план-матриці;  $\bar{y}_u$  - середній показник  $u$ -го дослід;  $u$  - номер проведеного експерименту;  $i$  - порядковий номер першого фактору;  $j, k$  - номери інших факторів;  $N$  - кількість проведених експериментів;  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  - допоміжні константи [62, 125].

Дисперсія похибки експерименту у рядку план-матриці [62, 125]:

$$S_u^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.15)$$

де  $n$  - кількість повторень у рядку експерименту.

Дисперсія відтворення експериментів [62, 125]:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2, \quad (3.16)$$

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії [62, 125]:

$$S_{b_0}^2 = a_8 \cdot S_y^2; \quad S_{b_i}^2 = a_9 \cdot S_y^2; \quad (3.17)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = a_{10} \cdot S_y^2; \quad S_{b_{ii}}^2 = a_{11} \cdot S_y^2, \quad (3.18)$$

де  $a_8, a_9, a_{10}, a_{11}$  - допоміжні константи [62, 125].

Надійні інтервали коефіцієнтів рівняння регресії [62, 125]:

$$\Delta b_0 = t_T \cdot S_{b_0}; \quad \Delta b_i = t_T \cdot S_{b_i}; \quad (3.19)$$

$$\Delta b_{ij} = t_T \cdot S_{b_{ij}}; \quad \Delta b_{ii} = t_T \cdot S_{b_{ii}}, \quad (3.20)$$

де  $t_T$  - величина  $t$ -критерію Стьюдента.

Якщо  $|b_i| \geq \Delta b_i$ , то коефіцієнт рівняння регресії є значущим і величина, що його визначає має більший вплив на вигляд функції відгуку ніж похибки експерименту.

Адекватність визначеного рівняння регресії перевіряли за F- критерієм Фішера [62, 125]:

$$F = \frac{S_H^2}{S_y^2}, \quad (3.21)$$

де  $S_H^2$  - дисперсія неадекватності.

Для визначення дисперсії неадекватності використали формулу [62, 125]:

$$S_H^2 = \frac{\sum_{u=1}^N n \cdot (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - k'}, \quad (3.22)$$

де  $\hat{y}_u$  - величина результату функції в  $u$ - му рядку, розрахована на основі одержаного рівняння регресії;  $k'$  - кількість коефіцієнтів математичної моделі.

Розрахований F- критерій Фішера порівнювали із табличним значенням критерію Фішера  $F_T$ , при цьому якщо виконувалась умова  $F \leq F_T$  при встановленому 5 % - му рівні значимості, то виведене рівняння регресії адекватно описує залежність досліджуваного параметра від змінних факторів експерименту.

На основі одержаних результатів експериментальних досліджень та виведених рівнянь регресії за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності продуктивності транспортування та ступеня пошкодження насінневого зернового матеріалу (кукурудзи та ячменю) при їх транспортуванні трьома різними типами гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями. Відповідні графіки представлено у розділі 4.

Ступінь пошкодження насінневого зернового матеріалу при його транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями визначали за показником макротравмування зернин. Перед проведення експериментів із переміщенням насінневого зернового матеріалу здійснювали

трьохкратну вибірку зерна у мірний посуд, розмір яких відповідав об'єму приблизно 100 зернин. Після цього відібрані проби піддавались візуальному обстеженню щодо наявності пошкоджених зернин із розрахунком відсотку з них травмованих. Після транспортування насінневого зернового матеріалу знову відбирали проби зерна та аналогічно визначали відсоток травмованих зернин. При цьому травмування зернин визначалось візуально, що відповідало їх макротравмуванню. До травмованих віднесено зерна із такими пошкодженнями [92]: пошкоджена оболонка зерна, пошкоджений ендосперм, подрібнене зерно, механічно стиснуте зерно.

Показник травмування зернового матеріалу визначався у відсотках за формулою [92]:

$$T_{зм} = \frac{m_1 - m_2}{m_n} \cdot 100, \quad (3.23)$$

де  $m_1$  - маса пошкодженого насінневого зернового матеріалу після транспортування конвеєром із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями;  $m_2$  - маса пошкодженого насінневого зернового матеріалу до транспортування конвеєром із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями;  $m_n$  - маса проби.

Частоту обертання гвинтового робочого органу визначали за формулою:

$$n = \frac{n_d f_c i_1}{50}, \quad (3.24)$$

де  $n_d$  – номінальна частота обертання ротора електродвигуна;  $f_c$  - частота струму, що подається на двигун від перетворювача частоти;  $i_1$  - передаточне відношення пасової передачі.



### 3.4. Методика проведення експериментів з визначення величини максимальної деформації волокон еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною

Для перевірки адекватності диференціального рівняння (2.16) та його розв'язку чисельним методом проведено експериментальні дослідження величини максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною за методикою, що описана у статті [190]. Навантаження на волокна гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною зі сторони, що дотикається до кожуха, здійснювалось за допомогою мірних вантажів у вигляді кульок, при цьому кут нахилу кожуха становив 90 градусів. Вимірювання деформації  $\Delta y$  здійснювалось за допомогою штангенциркуля. Під час проведення експериментів здійснювалось варіювання трьох основних факторів: діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$ , довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l$  та навантаження  $P$  від мірних вантажів.

Щоб знайти залежність  $\Delta y = f(d_1, l, P)$  використовували повний факторний експеримент. Враховуючи те, що дисперсії в кожній точці факторного простору однорідні, було вирішено скористатись схемою реалізації експерименту з дублюванням в одній точці (у центрі плану) чотири рази. Після оброблення результатів експериментальних досліджень вивели рівняння регресії для прогнозування величини деформації  $\Delta y$ .

Визначено межі варіювання основних змінних факторів, що впливають на величину максимальної деформації нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною:

- діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1 = 1,8 - 2,6$  мм;
- довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l = 28 - 36$  мм;
- навантаження від мірних вантажів  $P = 1,4 - 2,6$  Н.

Результати експериментів у вигляді матриць піддавались статистичній обробці із застосуванням методик кореляційного й регресійного аналізу

одержаних даних [62, 125] та відповідного програмного забезпечення. Після цього визначались коефіцієнти рівнянь регресії та емпіричні рівняння, що піддавались перевірці на адекватність, за методикою, поданою у підрозділі 3.3, використовуючи рівняння (3.1) – (3.3), (3.11) – (3.22).

Для виведення рівнянь регресії використано загально відому модель другого порядку (3.10).

На основі проведеного кодування факторів та встановлених рівнів їх варіювання сформовано таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

Результати проведеного кодування факторів та встановлених рівнів їх варіювання при дослідженні величини максимальної деформації нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Діаметр поперечного перерізу волокна	$d_1$ , мм	$x_1$	0,4	2,6 (+1)	2,2 (0)	1,8 (-1)
Довжина робочої частини волокон	$l$ , мм	$x_2$	4	36 (+1)	32 (0)	28 (-1)
Навантаження від мірних вантажів	$P$ , Н	$x_3$	0,6	2,6 (+1)	2 (0)	1,4 (-1)

План-матрицю проведення експериментів представлено у додатку А у вигляді таблиці [62, 125].

На основі одержаних результатів експериментальних досліджень та виведеного рівняння регресії за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності величини максимальної деформації нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від досліджуваних незалежних факторів. Відповідні графіки представлено у розділі 4.

### 3.5. Висновки

1. Представлено програму і методику проведення експериментальних досліджень гвинтових конвеєрів із гвинтовими робочими органами з еластичними робочими поверхнями для визначення їх раціональних конструкційних та технологічних параметрів.

2. Спроековано та виготовлено дослідний зразок гвинтового конвеєра із можливістю використання різних діаметрів кожуха та змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями (суцільною камероподібною частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, з щіткоподібною гвинтовою частиною), та з можливістю керування режимами роботи конвеєра за допомогою ПК через перетворювач частоти струму Altivar 71 з автоматичною візуалізацією та фіксацією отриманих результатів при дослідженні продуктивності транспортування та ступеня пошкодження насінневого зернового матеріалу після його переміщення в діапазонах частоти обертання гвинтового робочого органу від 0 до 511,2 об/хв, внутрішнього діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм та кута нахилу конвеєра від 0° до 30°.

3. Представлено методику проведення повнофакторних експериментів із визначенням величини продуктивності транспортування та ступеня пошкодження насінневого зернового матеріалу при їх транспортуванні трьома різними типами гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями від зміни трьох основних факторів: частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$ , тобто  $Q=f(n,D, \alpha_1)$ ,  $T=f(n,D, \alpha_1)$ .

4. Представлено методику проведення експериментального дослідження величини максимальної деформації нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від зміни трьох основних факторів: діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$  в межах від 1,8 мм до 2,6 мм, довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l$  від 28 мм до 36 мм та навантаження  $P$  від мірних вантажів від 1,4 Н до 2,6 Н, тобто  $\Delta y=f(d_1,l,P)$ .

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 4.1. Результати експериментальних досліджень продуктивності шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями

Використовуючи методику проведення експериментів, представлену в підрозділі 3.3, здійснено експериментальні дослідження із використанням спроектованої та виготовленої установки гвинтового конвеєра із різними діаметрами кожухів та трьома змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями: суцільною камероподібною частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, з щіткоподібною гвинтовою частиною, під час яких визначали залежність продуктивності гвинтових конвеєрів із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями залежно від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  для транспортування ячменю та кукурудзи.

Результати експериментів з визначення продуктивності записувались у план-матрицю із зміною трьох факторів ( $k=3$ ) повного факторного експерименту  $3^3$  для статистичної обробки та визначення можливої екстремальної точки у факторному просторі з виведенням моделі, які описуються рівнянням (3.10) регресії другого порядку, що враховують ефекти взаємодії із варіюванням кожного параметру мінімум на трьох рівнях.

Визначено коефіцієнти рівняння регресії (3.10), використовуючи формули (3.11) – (3.14), які представлено у таблицях 4.1 - 4.3.

Загальний вигляд рівнянь регресії продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною, залежно від зміни частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$ , тобто  $Q_{1(x_1, x_2, x_3)} = f(n, D, \alpha_1)$ , за

результатами проведених повних факторних експериментів  $3^3$  у кодованих величинах дорівнює:

- для транспортування ячменю:

$$Q_{1я(x_1, x_2, x_3)} = 5,132 + 0,529x_1 + 0,341x_2 - 0,329x_3 + 0,097x_1x_2 - \\ -0,094x_1x_3 - 1,19 \cdot 10^{-4}x_2x_3 - 0,146x_1^2 + 7,49 \cdot 10^{-4}x_2^2 + 7,49 \cdot 10^{-4}x_3^2; \quad (4.1)$$

- для транспортування кукурудзи:

$$Q_{1к(x_1, x_2, x_3)} = 5,39 + 0,555x_1 + 0,358x_2 - 0,346x_3 + 0,102x_1x_2 - \\ -0,099x_1x_3 - 1,25 \cdot 10^{-5}x_2x_3 - 0,154x_1^2 + 7,87 \cdot 10^{-4}x_2^2 + 7,87 \cdot 10^{-4}x_3^2, \quad (4.2)$$

де  $x_1$  - кодоване значення частоти обертання гвинтового робочого органу;  
 $x_2$  - кодоване значення діаметра кожуха;  $x_3$  - кодоване значення кута нахилу конвеєра.

Таблиця 4.1

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною

Коефіц.	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
ячмінь	5,132	0,529	0,341	-0,329	0,097	-0,094	$-1,19 \cdot 10^{-4}$	-0,146	$-7,49 \cdot 10^{-4}$	$-7,49 \cdot 10^{-4}$
кукурудза	5,39	0,555	0,358	-0,346	0,102	-0,099	$-1,25 \cdot 10^{-5}$	-0,154	$-7,87 \cdot 10^{-4}$	$-7,87 \cdot 10^{-4}$

Коефіцієнти  $b_{23}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{33}$  рівнянь регресій (4.1) та (4.2) є незначущими відповідно до формул (3.19) та (3.20).

Рівняння регресії (4.1) та (4.2) у натуральних величинах мають такі вигляди:

- для транспортування ячменю:

$$Q_{1я(n, D, \alpha)} = 1,466 - 3,52 \cdot 10^{-5}n + 2,5 \cdot 10^{-4}D + 1,42 \cdot 10^{-4}nD - \\ -5,516 \cdot 10^{-5}n\alpha_1 - 1,129 \cdot 10^{-5}n^2; \quad (4.3)$$

- для транспортування кукурудзи:

$$Q_{1к(n, D, \alpha)} = 1,54 - 1,76 \cdot 10^{-5}n + 1,66 \cdot 10^{-4}D + 3,33 \cdot 10^{-5}\alpha_1 + 1,49 \cdot 10^{-4}nD - \\ -5,8 \cdot 10^{-5}n\alpha_1 - 1,19 \cdot 10^{-5}n^2. \quad (4.4)$$

На основі одержаних результатів експериментальних досліджень та виведених рівнянь регресії (4.3) і (4.4) за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною, що представлено на рис. 4.1 – рис. 4.4.

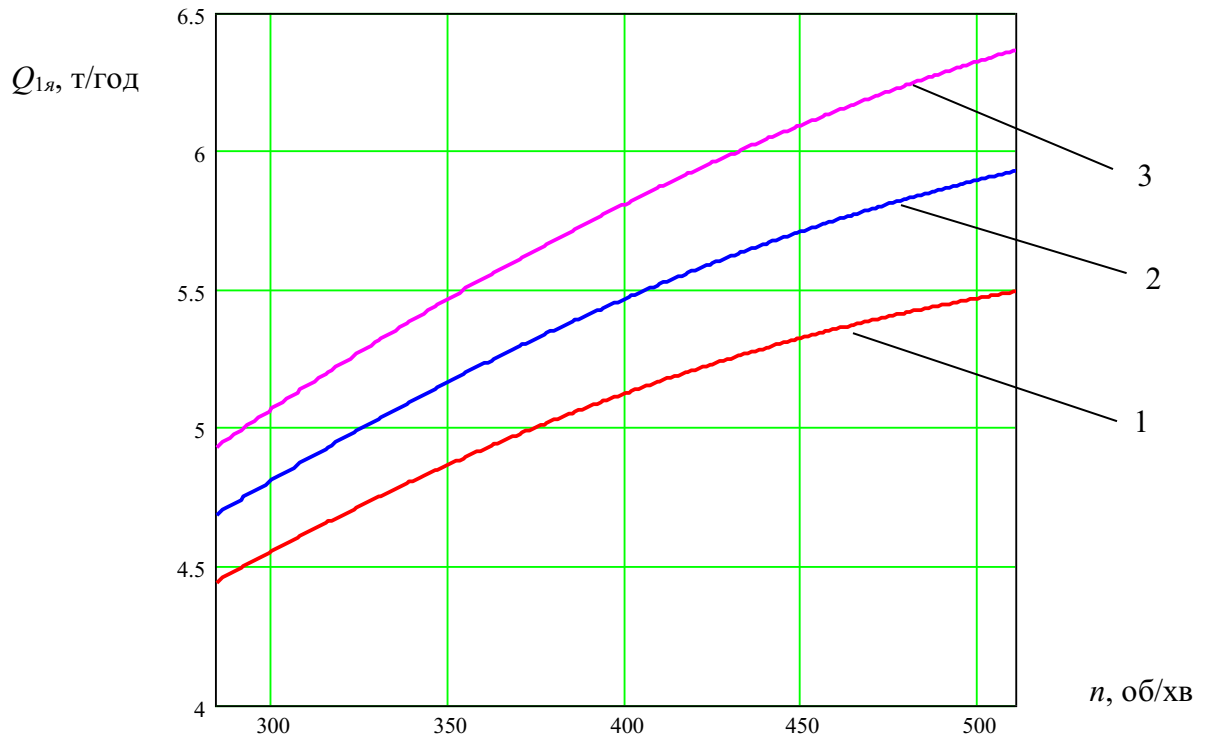


Рис. 4.1. Графіки залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною від частоти обертання робочого органу  $n$  при транспортуванні ячменю при  $\alpha_1=0$  град: 1)  $D=96\text{мм}$ ; 2)  $D=102\text{мм}$ ; 3)  $D=108\text{мм}$

Аналіз рівнянь регресії (4.1), (4.2) вказує на те, що основним фактором, який впливає на зміну продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною, є фактор  $x_1(n)$ . При цьому фактори  $x_2$  та  $x_3$  ( $D$  та  $\alpha_1$ ) мають приблизно однаковий вплив, зростання першого із них призводить до підвищення продуктивності, а зростання другого – до зменшення

продуктивності.

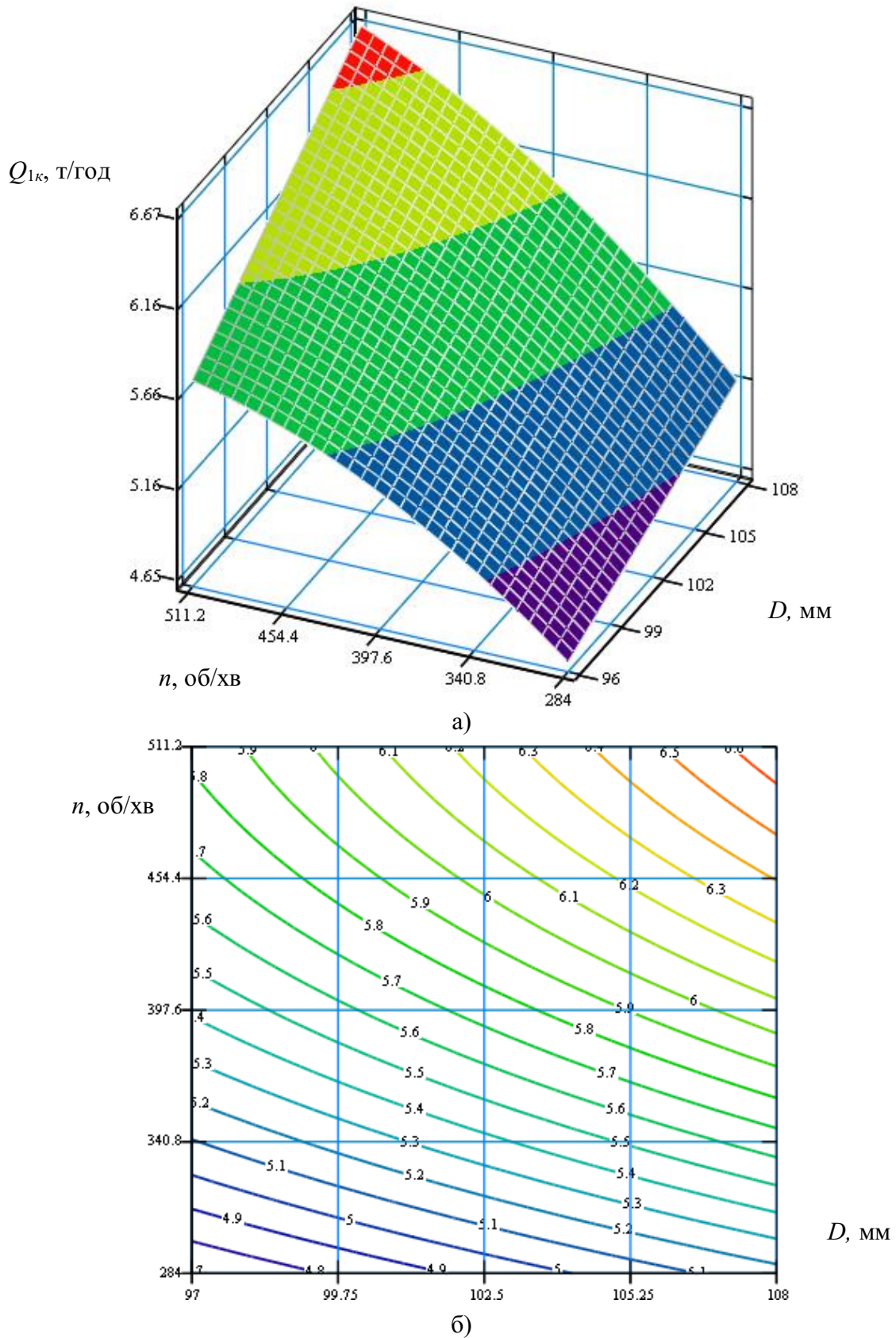


Рис. 4.2. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною при транспортуванні кукурудзи від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та діаметра кожуха  $D$  ( $\alpha_1=0$  град)

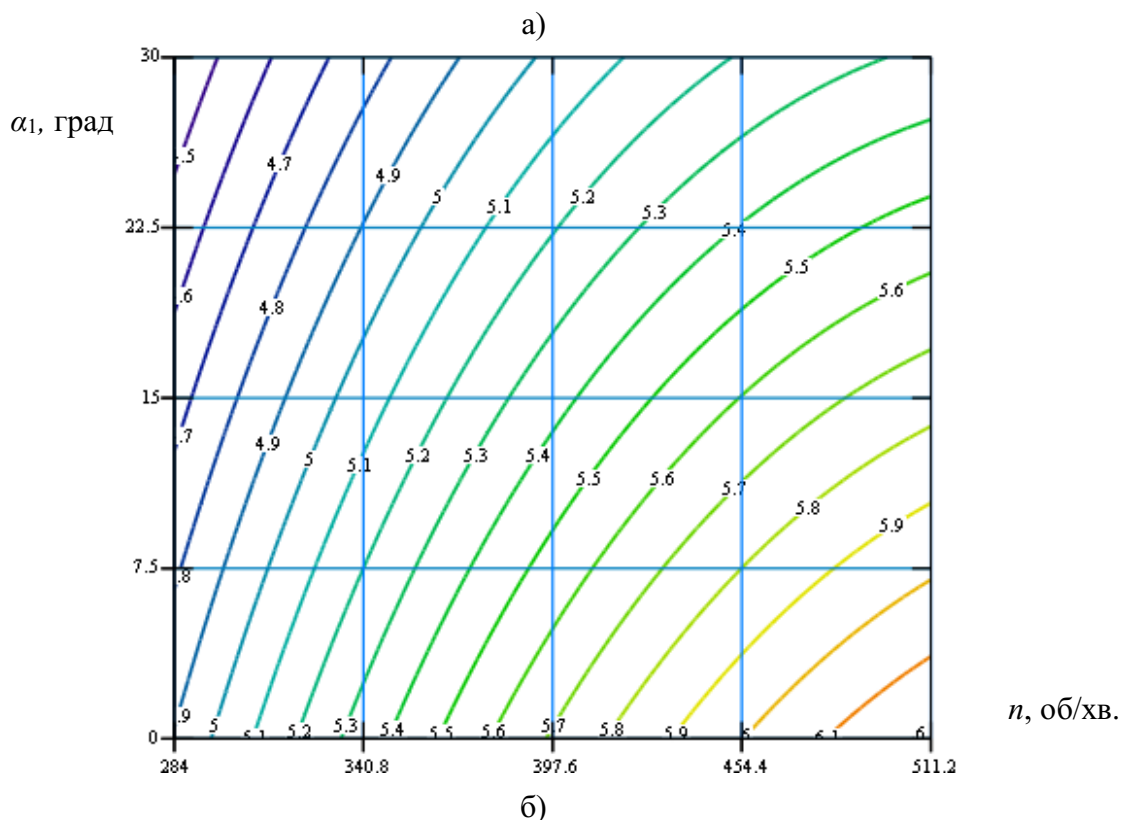
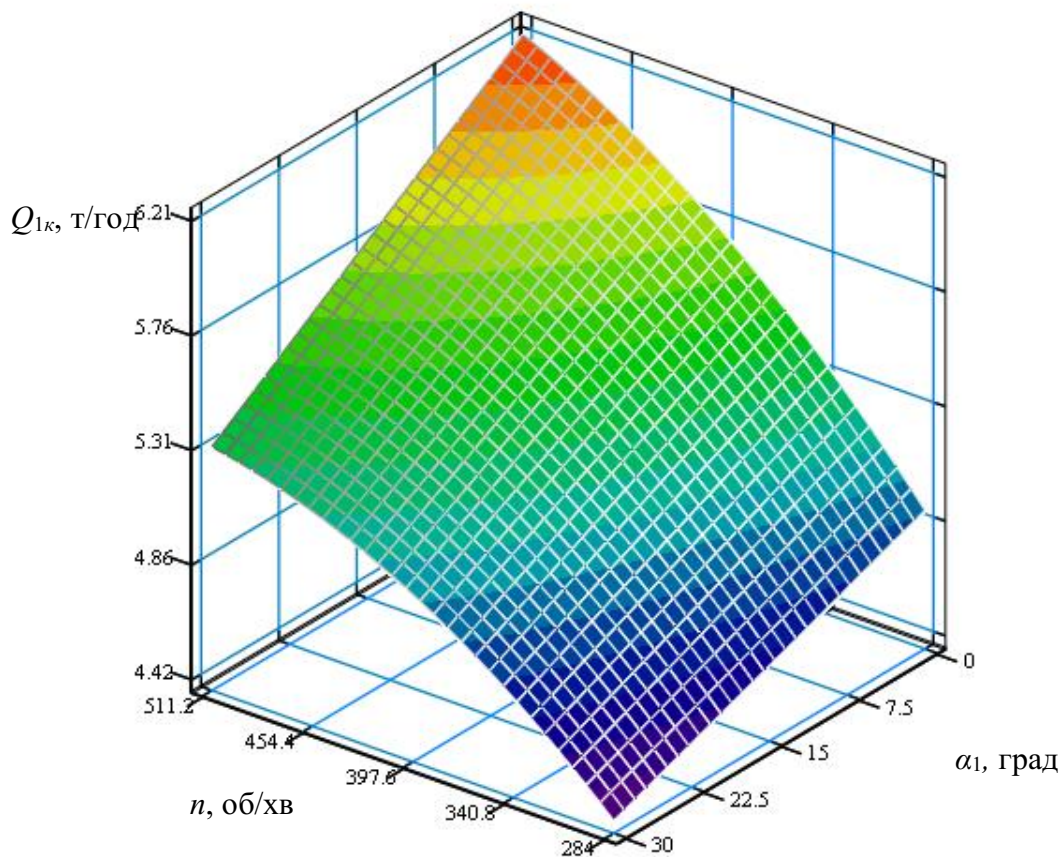


Рис. 4.3. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною при транспортуванні кукурудзи від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  ( $D=102\text{мм}$ )



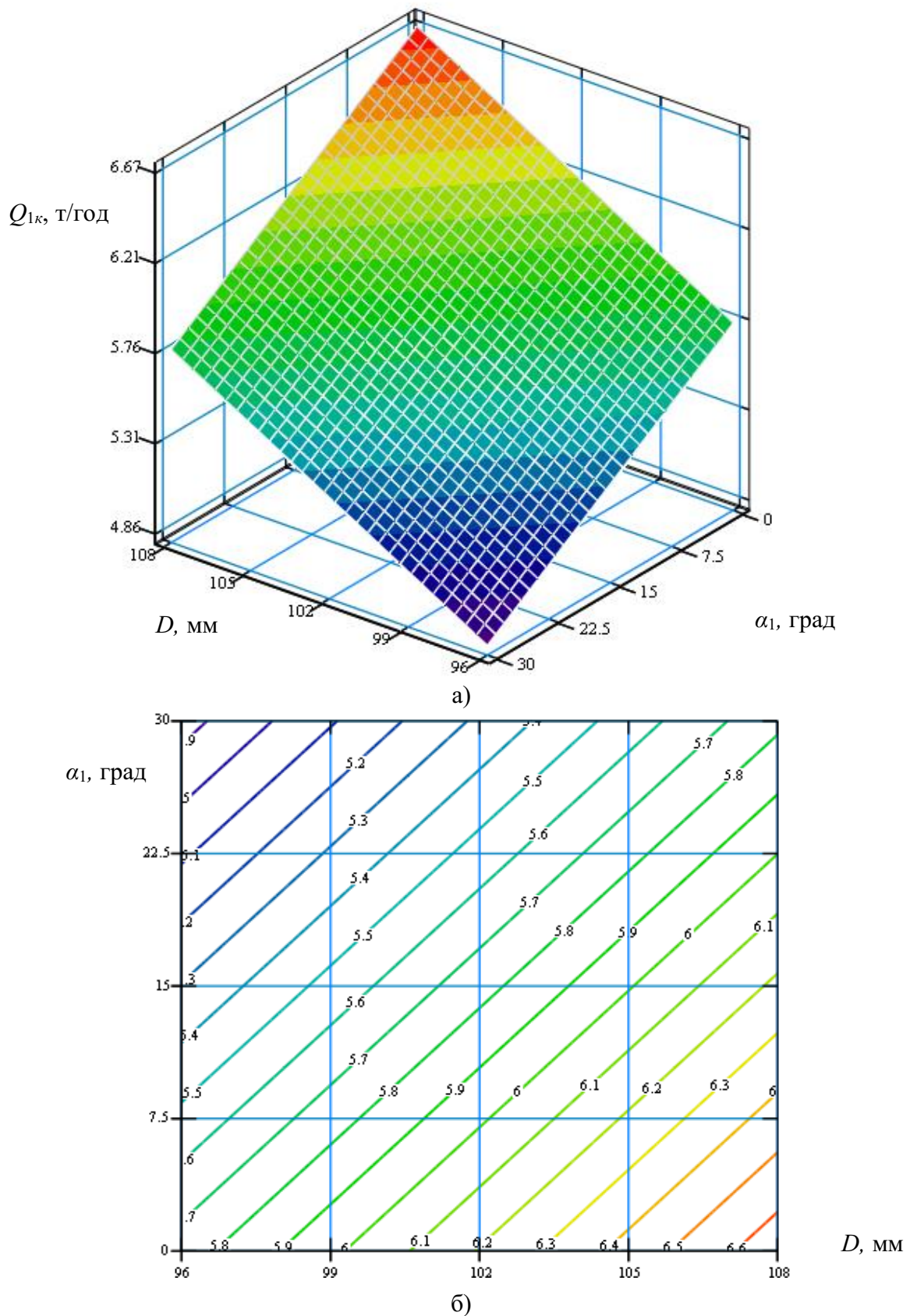


Рис. 4.4. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною при транспортуванні кукурудзи від діаметра кожуха  $D$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  ( $n=511,2$  об/хв)

З рисунків 4.1 - 4.4 та рівнянь регресії (4.3), (4.4) можна зробити висновки, що при збільшенні діаметра кожуха, частоти обертання гвинтового робочого органа з еластичною суцільною камероподібною частиною та зменшенні кута нахилу гвинтового конвеєра продуктивність транспортування насінневого зернового матеріалу зростає. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування ячменю складала 6,37 т/год., а мінімальна – 3,98 т/год. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування кукурудзи складала 6,67 т/год., а мінімальна – 4,18 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до 511,2 об/хв. призводить до зростання продуктивності в 1,29 рази. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,11 рази, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град. до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,12 рази.

Загальний вигляд рівнянь регресії продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, залежно від зміни частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$ , тобто  $Q_{2(x_1, x_2, x_3)} = f(n, D, \alpha_1)$ , за результатами проведених повних факторних експериментів  $3^3$  у кодованих величинах дорівнює:

- для транспортування ячменю:

$$Q_{2я(x_1, x_2, x_3)} = 6,097 + 0,557x_1 + 0,502x_2 - 0,495x_3 - 0,812x_1^2 + 0,015x_2^2 - 0,247x_3^2; \quad (4.5)$$

- для транспортування кукурудзи:

$$Q_{2к(x_1, x_2, x_3)} = 5,959 + 0,649x_1 + 0,501x_2 - 0,391x_3 + 0,143x_1x_2 - 0,529x_1^2 + 7,62 \cdot 10^{-4}x_2^2 - 0,195x_3^2. \quad (4.6)$$

Коефіцієнти  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  рівняння регресії (4.5) та коефіцієнти  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{22}$  рівняння регресії (4.6) є незначущими відповідно до формул (3.19) та (3.20).

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні продуктивності переміщення насіннєвого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною

Коефіц.	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
ячмінь	6,097	0,557	0,502	-0,495	0	0	0	-0,812	0,015	-0,247
кукурудза	5,959	0,649	0,501	-0,391	0,143	0	0	-0,529	$7,62 \cdot 10^{-4}$	-0,195

Рівняння регресії (4.5) та (4.6) у натуральних величинах мають такі вигляди:

- для транспортування ячменю:

$$Q_{2я(n,D,\alpha)} = -9,75 + 0,0549n - 1,33 \cdot 10^{-3} D - 6,66 \cdot 10^{-5} \alpha_1 - 6,29 \cdot 10^{-5} n^2 + 4,17 \cdot 10^{-4} D^2 - 1,097 \cdot 10^{-3} \alpha_1^2; \quad (4.7)$$

- для транспортування кукурудзи:

$$Q_{2к(n,D,\alpha)} = -2,6 + 0,0169n + 8,33 \cdot 10^{-5} D - 6,66 \cdot 10^{-5} \alpha_1 + 2,098 \cdot 10^{-4} nD - 4,099 \cdot 10^{-5} n^2 - 8,66 \cdot 10^{-4} \alpha_1^2. \quad (4.8)$$

На основі одержаних результатів експериментальних досліджень та виведених рівнянь регресії (4.7) та (4.8) за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності продуктивності переміщення насіннєвого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, що представлено на рис. 4.5 - 4.8.

Аналіз рівнянь регресії (4.5) і (4.6) вказує на те, що основним фактором, який впливає на зміну продуктивності транспортування гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, є фактор  $x_1(n)$ . Менший вплив має фактор  $x_2(D)$  і найменший - фактор  $x_3(\alpha_1)$ , зростання перших двох факторів призводить до підвищення продуктивності, а зростання третього – до зменшення продуктивності.

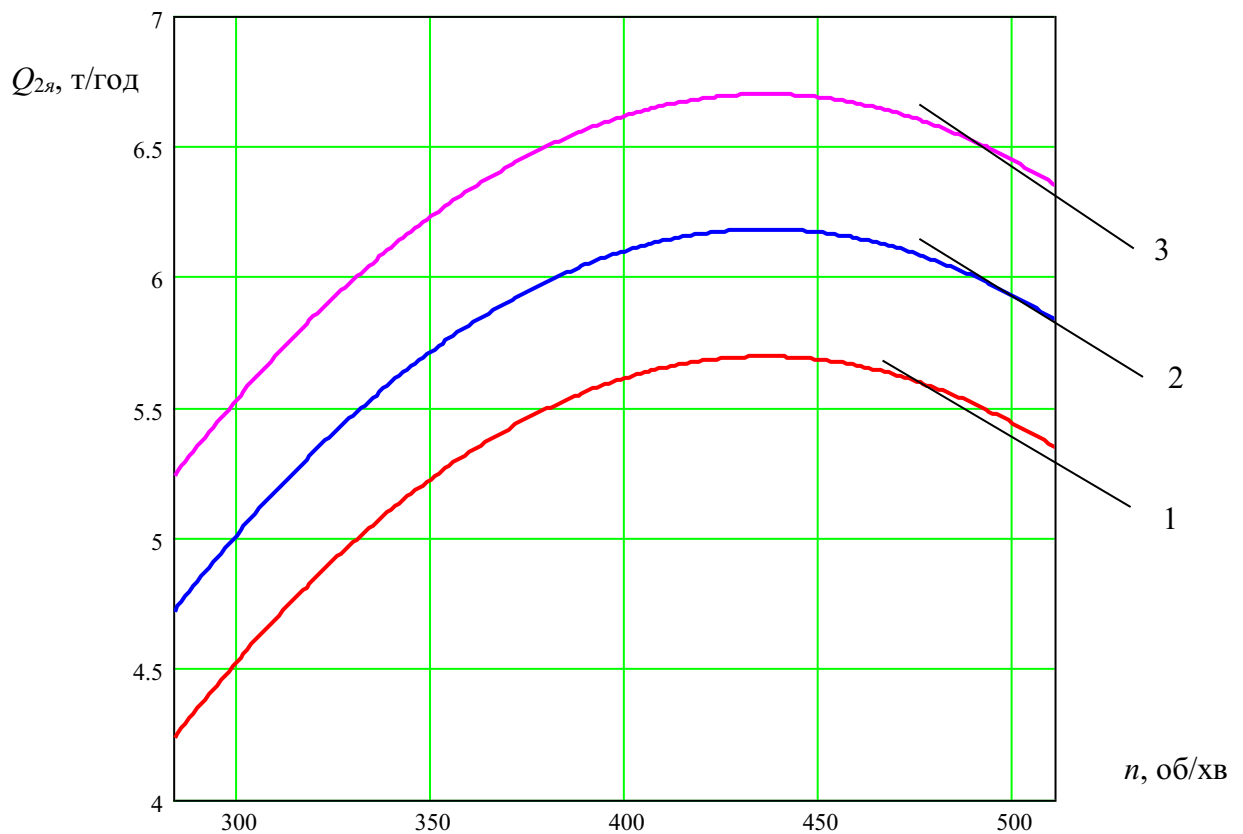
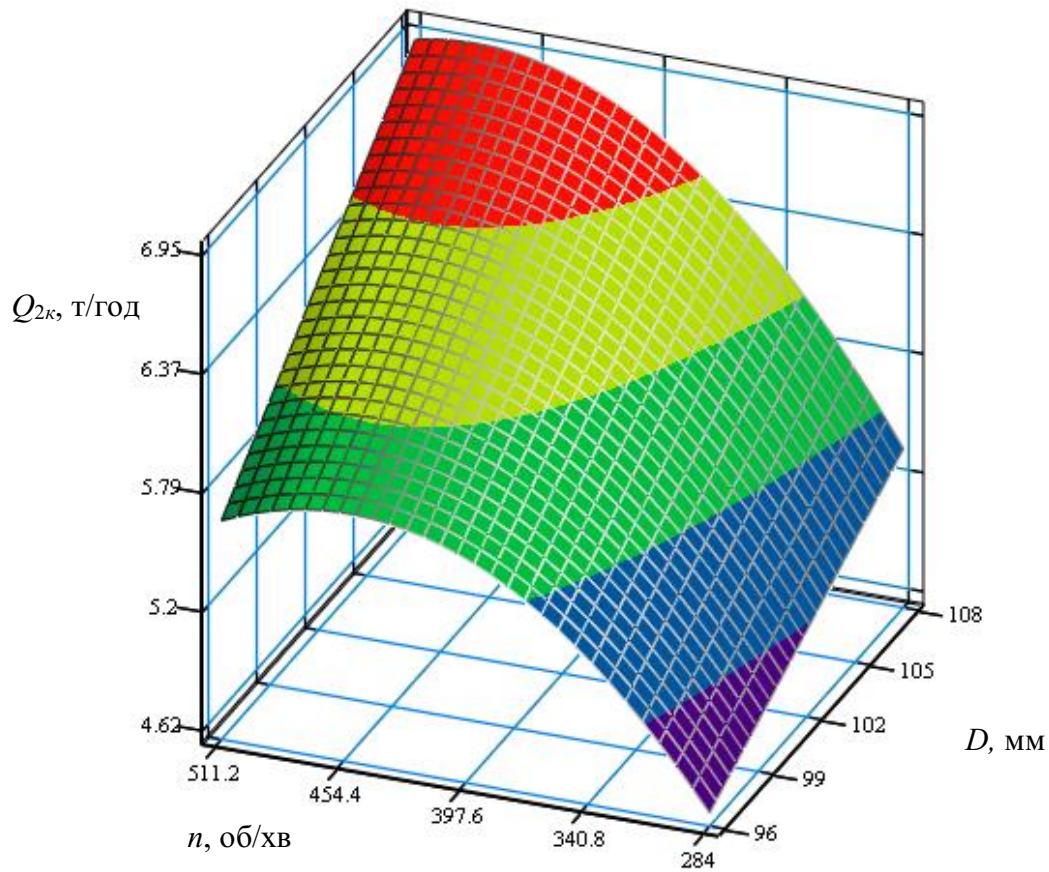
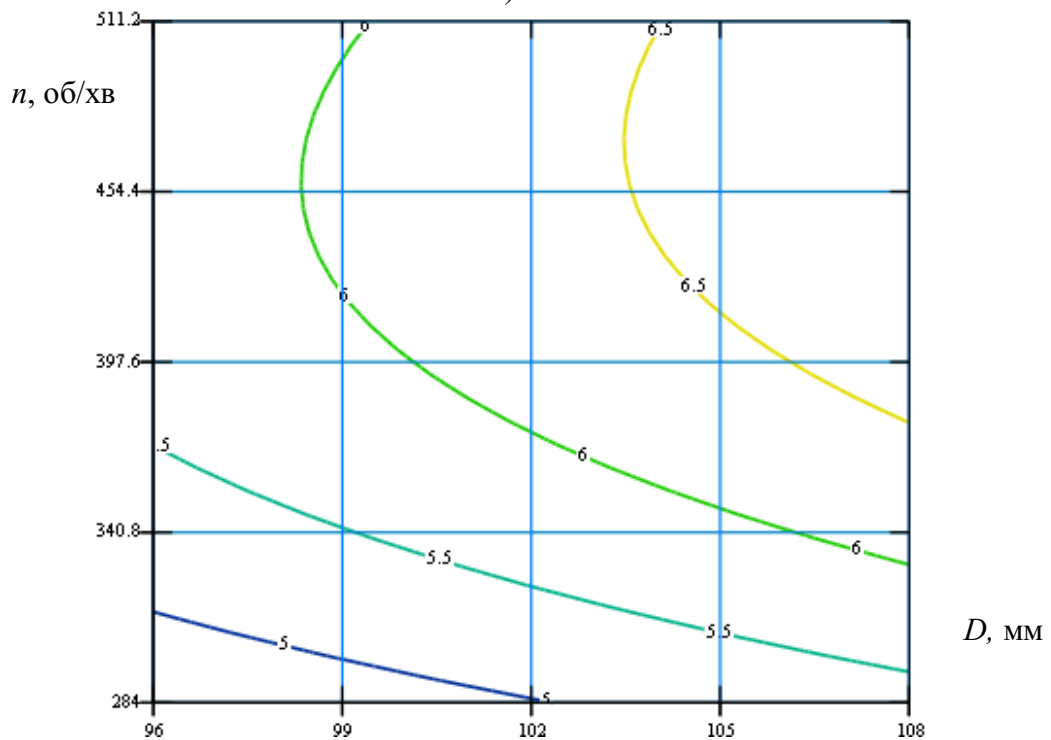


Рис. 4.5. Графіки залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною від частоти обертання робочого органу  $n$  при транспортуванні ячменю,  $\alpha_1=0$  град: 1)  $D=96$ мм; 2)  $D=102$ мм; 3)  $D=108$ мм

З рисунків 4.5 - 4.8 та рівнянь регресії (4.7) і (4.8) можна зробити висновки, що при збільшенні діаметра кожуха, частоти обертання гвинтового робочого органу з периферійною еластичною щіткоподібною частиною та зменшенні кута нахилу гвинтового конвеєра продуктивність транспортування зернового матеріалу зростає. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування ячменю складала 6,61 т/год., а мінімальна – 3,49 т/год. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування кукурудзи складала 6,92 т/год., а мінімальна – 3,84 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  від 284 об/хв. до оптимальної частоти обертання призводить до зростання продуктивності в 1,25 рази для ячменю та в 1,22 рази для кукурудзи. Оптимальною частою обертання гвинтового робочого органу при транспортуванні ячменю є величина від 430 до 440 об/хв., а для транспортування кукурудзи – від 450 до 480 об/хв.



а)



б)

Рис. 4.6. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною при транспортуванні кукурудзи від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та діаметра кожуха  $D$  ( $\alpha_1=0$  град.)

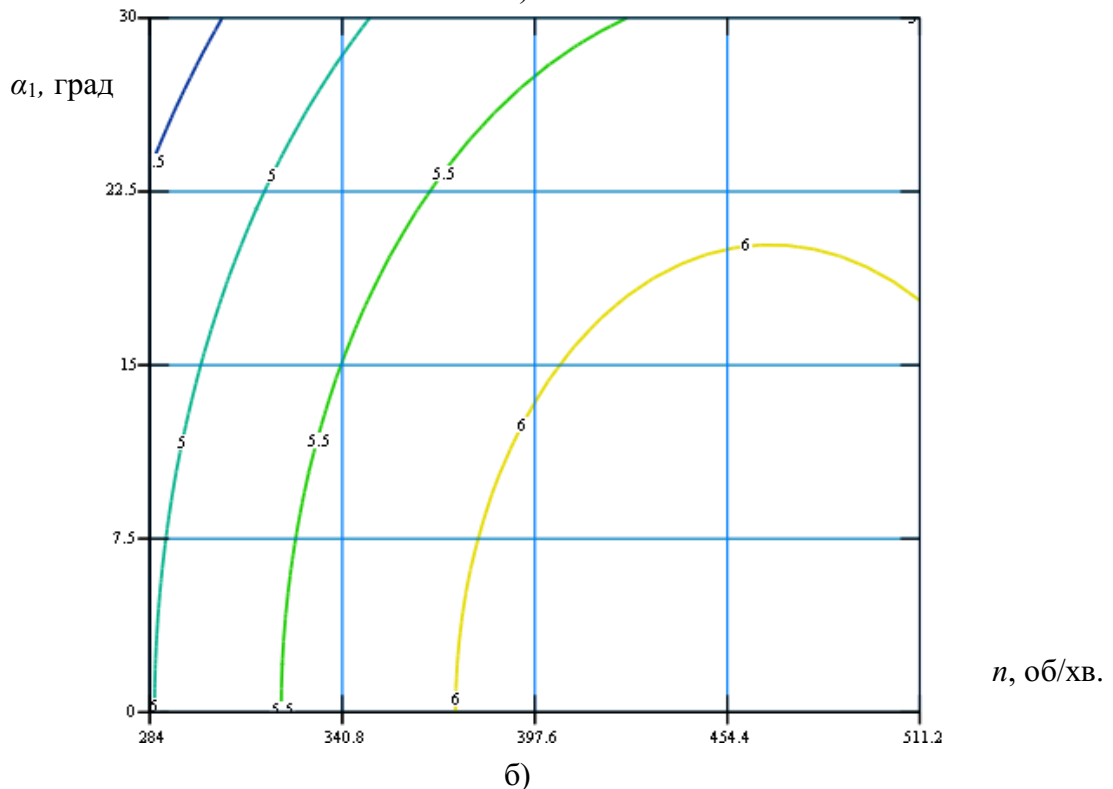
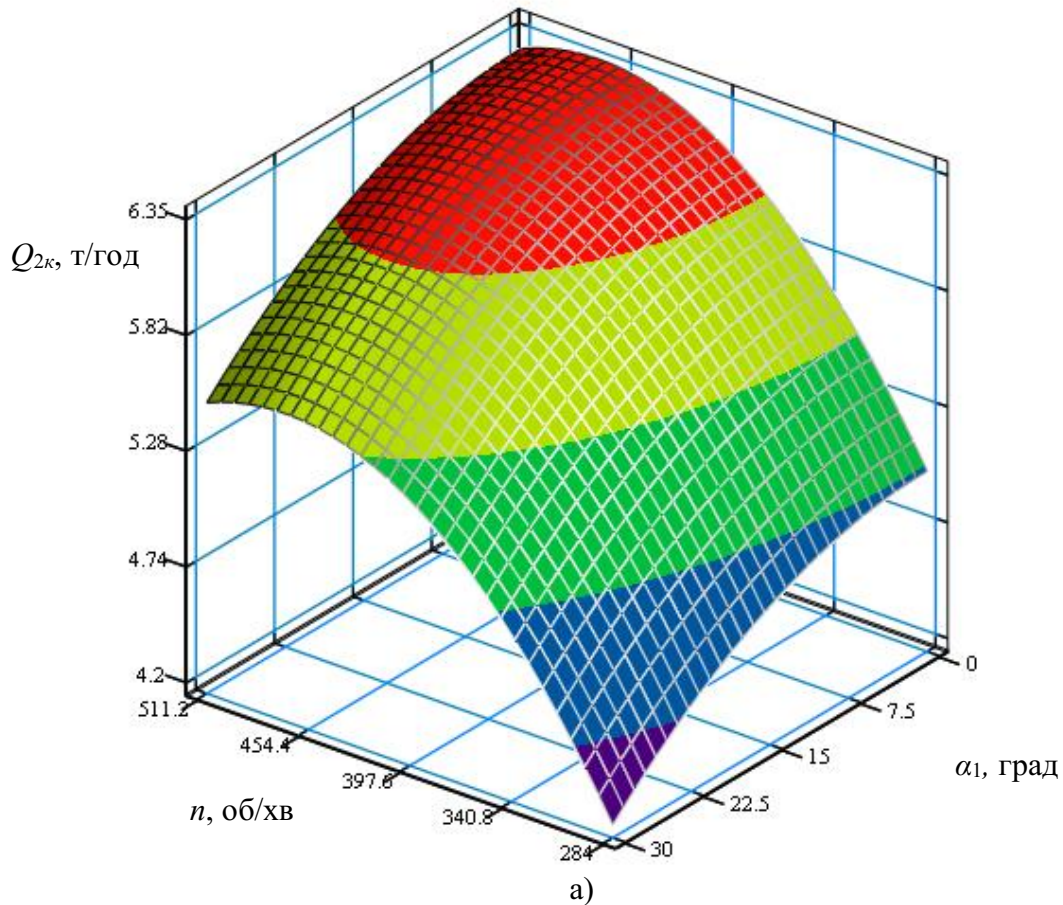


Рис. 4.7. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною при транспортуванні кукурудзи від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  ( $D=102\text{мм}$ )

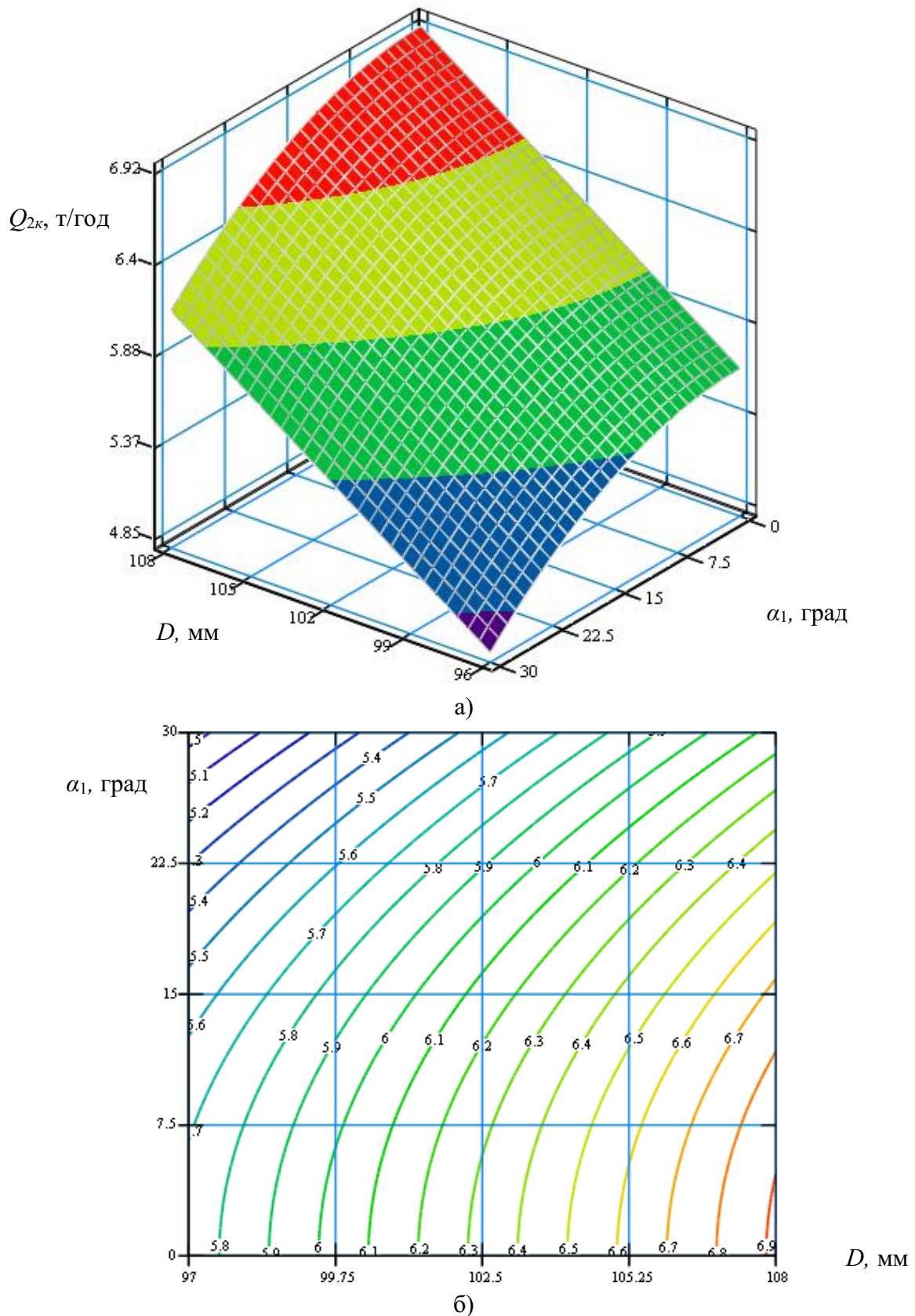


Рис. 4.8. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насіннєвого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною при транспортуванні кукурудзи від діаметра кожуха  $D$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  ( $n=511,2$  об/хв.)

Вказані проміжки оптимальних частот обертання залежать від діаметра кожуха та кута нахилу конвеєра. Підвищення частоти обертання гвинтового робочого органу понад вказані межі призводить до зменшення продуктивності транспортування, що можна пояснити зменшенням коефіцієнта завантаження гвинтового конвеєра під дією відцентрових сил при подачі матеріалу із бункера на гвинтовий робочий орган. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,22 рази для ячменю та в 1,16 рази для кукурудзи, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град. до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,28 рази для ячменю та в 1,2 рази для кукурудзи.

Загальний вигляд рівнянь регресії продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною залежно від зміни частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$ , тобто  $Q_{3(x_1, x_2, x_3)} = f(n, D, \alpha_1)$ , за результатами проведених повних факторних експериментів  $3^3$  у кодованих величинах дорівнює:

- для транспортування ячменю:

$$Q_{3я(x_1, x_2, x_3)} = 3,455 + 0,328x_1 + 0,498x_2 - 0,474x_3 - 0,245x_1^2 + 6,36 \cdot 10^{-4}x_2^2 - 0,139x_3^2; \quad (4.9)$$

- для транспортування кукурудзи:

$$Q_{3к(x_1, x_2, x_3)} = 4,464 + 0,394x_1 + 0,498x_2 - 0,455x_3 - 0,027x_1x_3 - 0,296x_1^2 + 6,61 \cdot 10^{-4}x_2^2 - 0,292x_3^2. \quad (4.10)$$

Коефіцієнти  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{22}$  рівняння регресії (4.9) та коефіцієнти  $b_{12}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{22}$  рівняння регресії (4.10) є незначущими відповідно до формул (3.19) та (3.20).

Рівняння регресії (4.9) та (4.10) у натуральних величинах мають такі вигляди:



- для транспортування ячменю:

$$Q_{3я(n,D,\alpha)} = -8,825 + 0,018n + 0,083D - 0,013\alpha - 1,9 \cdot 10^{-5}n^2 - 6,2 \cdot 10^{-4}\alpha^2; \quad (4.11)$$

- для транспортування кукурудзи:

$$Q_{3к(n,D,\alpha)} = -8,938 + 0,0219n + 0,083D + 0,0149\alpha - 1,58 \cdot 10^{-5}n\alpha - \\ -2,29 \cdot 10^{-5}n^2 - 1,297 \cdot 10^{-3}\alpha^2. \quad (4.12)$$

Таблиця 4.3

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною

Коефіц.	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
ячмінь	3,455	0,328	0,498	-0,474	0	0	0	-0,245	$6,36 \cdot 10^{-4}$	-0,139
кукурудза	4,464	0,394	0,498	-0,455	0	-0,027	0	-0,296	$6,61 \cdot 10^{-4}$	-0,292

На основі одержаних результатів експериментальних досліджень та виведених рівнянь регресії (4.11) і (4.12) за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною, що представлено на рис. 4.9 - рис. 4.12.

Аналіз рівнянь регресії (4.9), (4.10) вказує на те, що основними факторами, які впливають на зміну продуктивності транспортування даним гвинтовим конвеєром, є фактори  $x_2$  та  $x_3$  ( $D$  та  $\alpha_1$ ), які мають приблизно однаковий вплив. Зростання першого із них призводить до підвищення продуктивності, а зростання другого – до зменшення продуктивності, при цьому фактор  $x_1(n)$  має дещо менший вплив на підвищення продуктивності. Це пояснюється збільшеною довжиною волокон гвинтового робочого органу, їх значним прогинанням і нерівномірним заповненням простору гвинтової лінії при збільшенні частоти обертання робочого органу та кута нахилу конвеєра. З рис. 4.9 – рис. 4.12 та рівнянь регресії (4.11) і (4.12) можна зробити висновки, що при збільшенні діаметра кожуха, частоти обертання робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною та зменшенні кута нахилу гвинтового конвеєра продуктивність транспортування зернового матеріалу зростає.

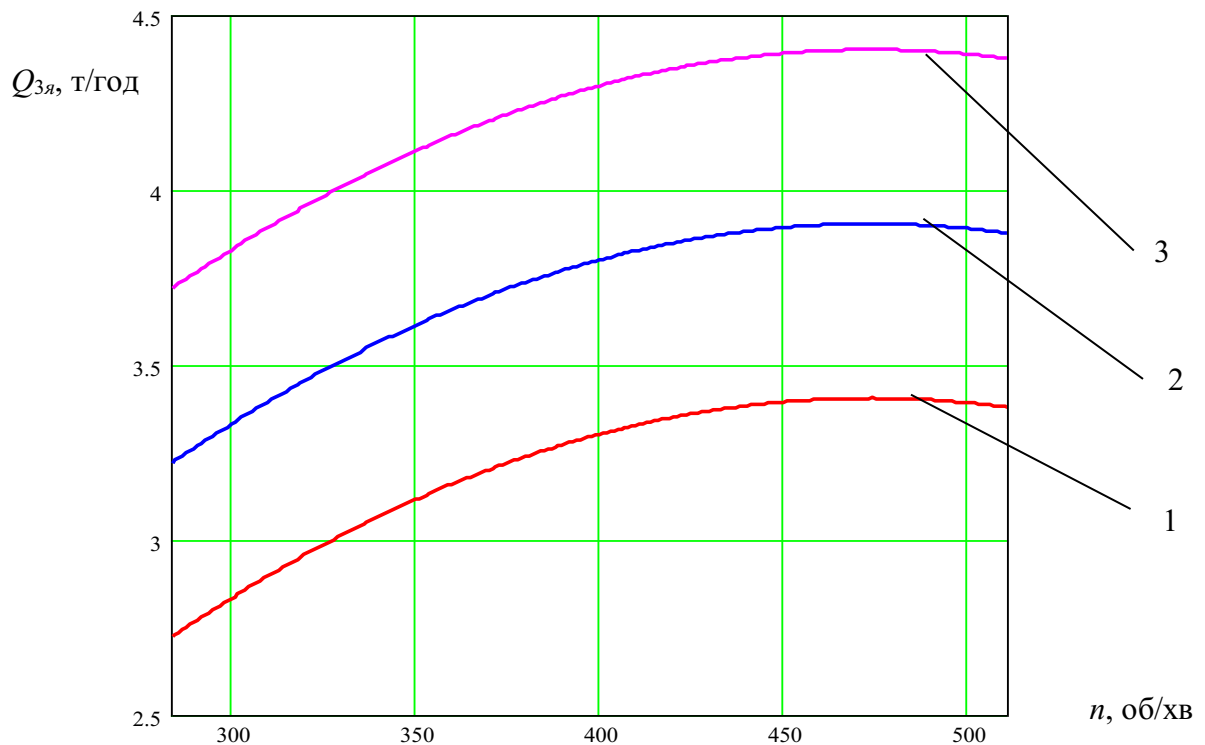


Рис. 4.9. Графіки залежності продуктивності переміщення насіннєвого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  при транспортуванні ячменю при  $\alpha_1=0$  град: 1)  $D=96\text{мм}$ ; 2)  $D=102\text{мм}$ ; 3)  $D=108\text{мм}$

Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування ячменю складала 4,37 т/год, а мінімальна – 1,77 т/год. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування кукурудзи складала 5,25 т/год, а мінімальна – 2,56 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  від 284 об/хв до оптимальної частоти обертання призводить до зростання продуктивності в 1,25 рази. Оптимальною частою обертання гвинтового робочого органу при транспортуванні ячменю та кукурудзи є величина від 470 до 480 об/хв. Вказані проміжки оптимальних частот обертання залежать від діаметра кожуха та кута нахилу конвеєра. Підвищення частоти обертання гвинтового робочого органу понад вказані межі призводить до зменшення продуктивності транспортування, що можна пояснити зменшенням коефіцієнта завантаження гвинтового конвеєра під дією відцентрових сил при подачі матеріалу із бункера на гвинтовий робочий орган та прогинанням

волокон гвинтового робочого органу.

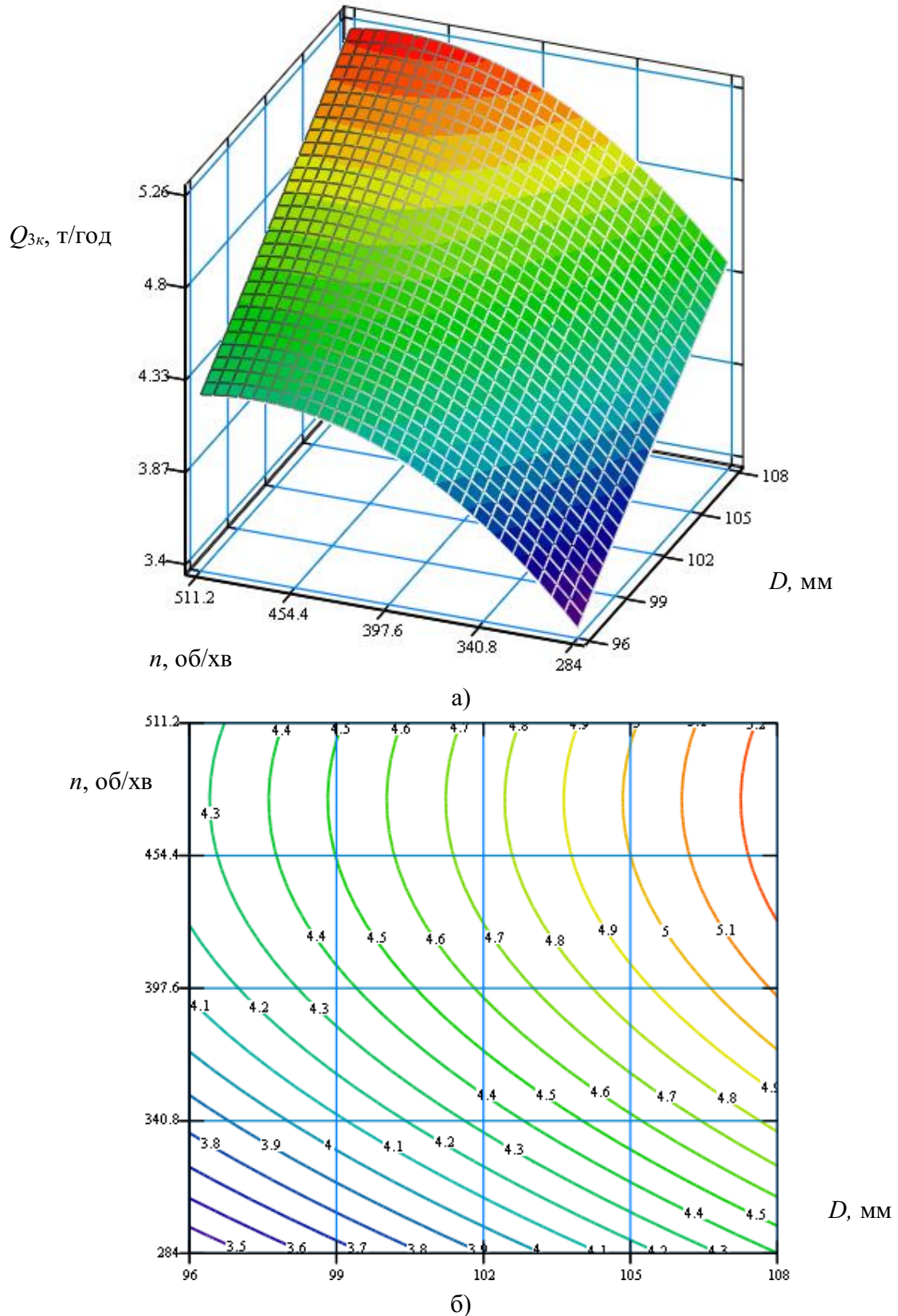


Рис. 4.10. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною при транспортуванні кукурудзи від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та діаметра кожуха  $D$  ( $\alpha_1=0$  град.)

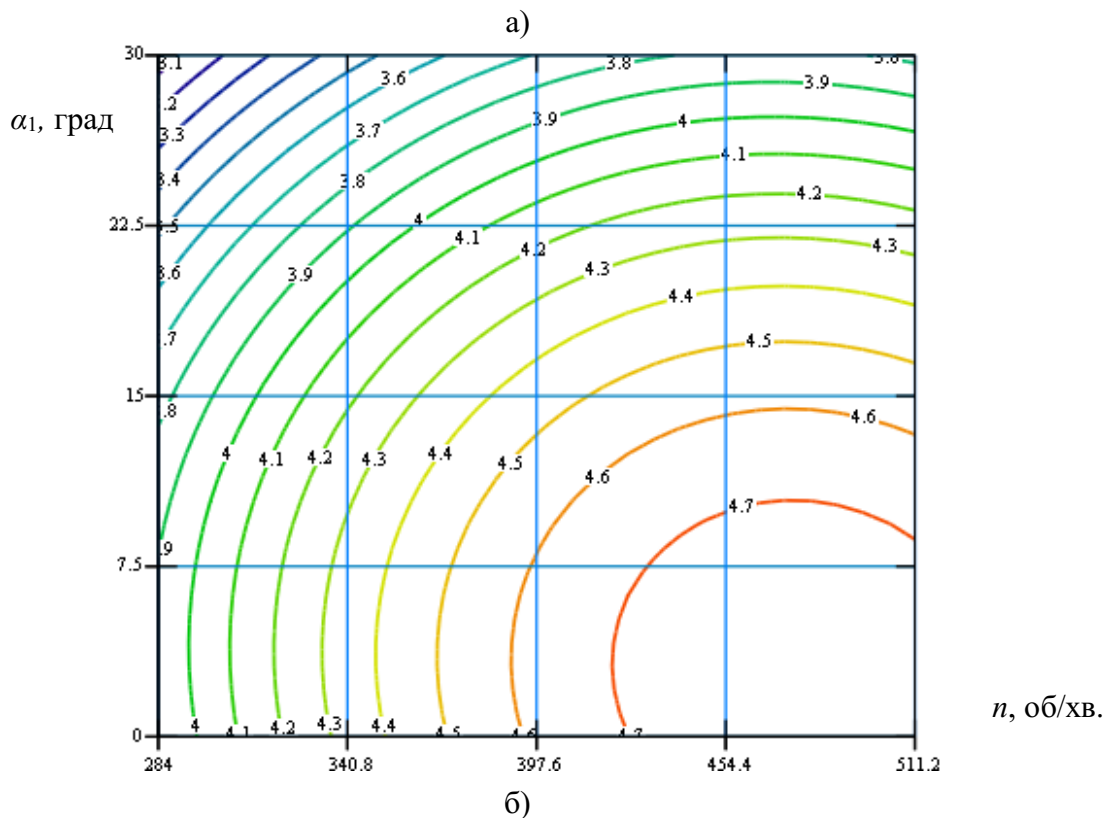
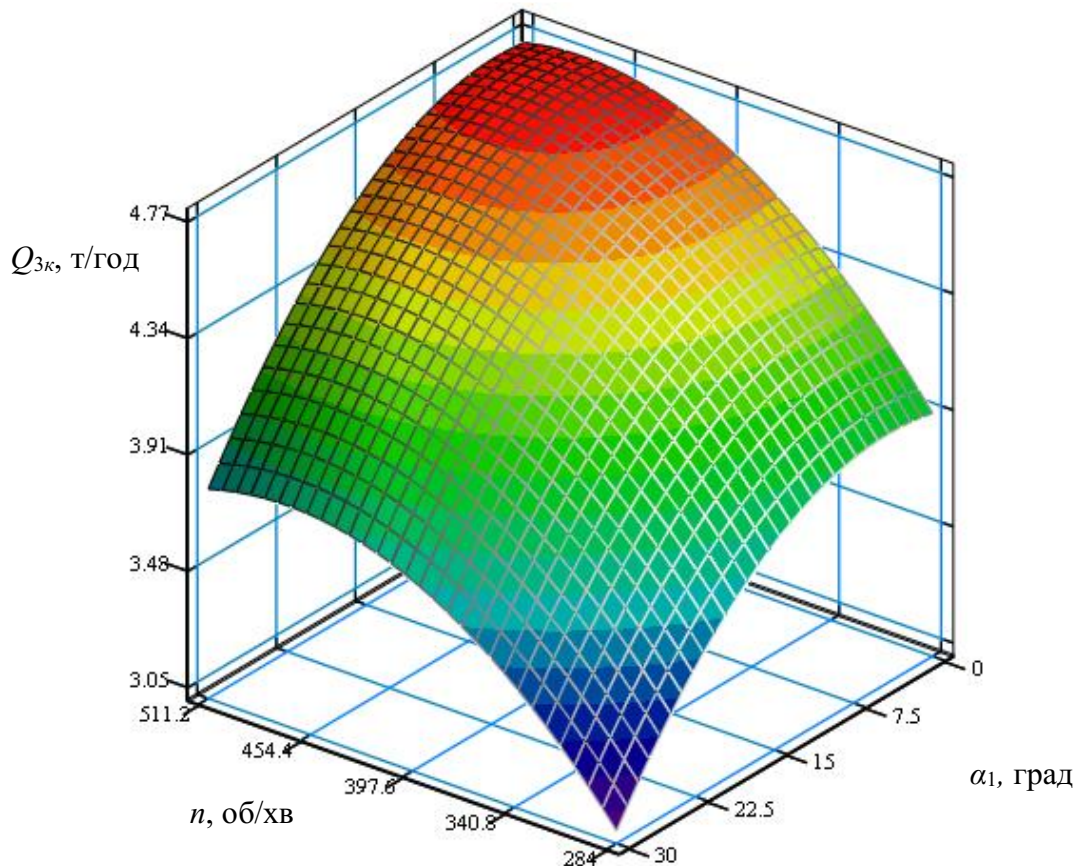


Рис. 4.11. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насінневого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною при транспортуванні кукурудзи від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  ( $D=102\text{мм}$ )

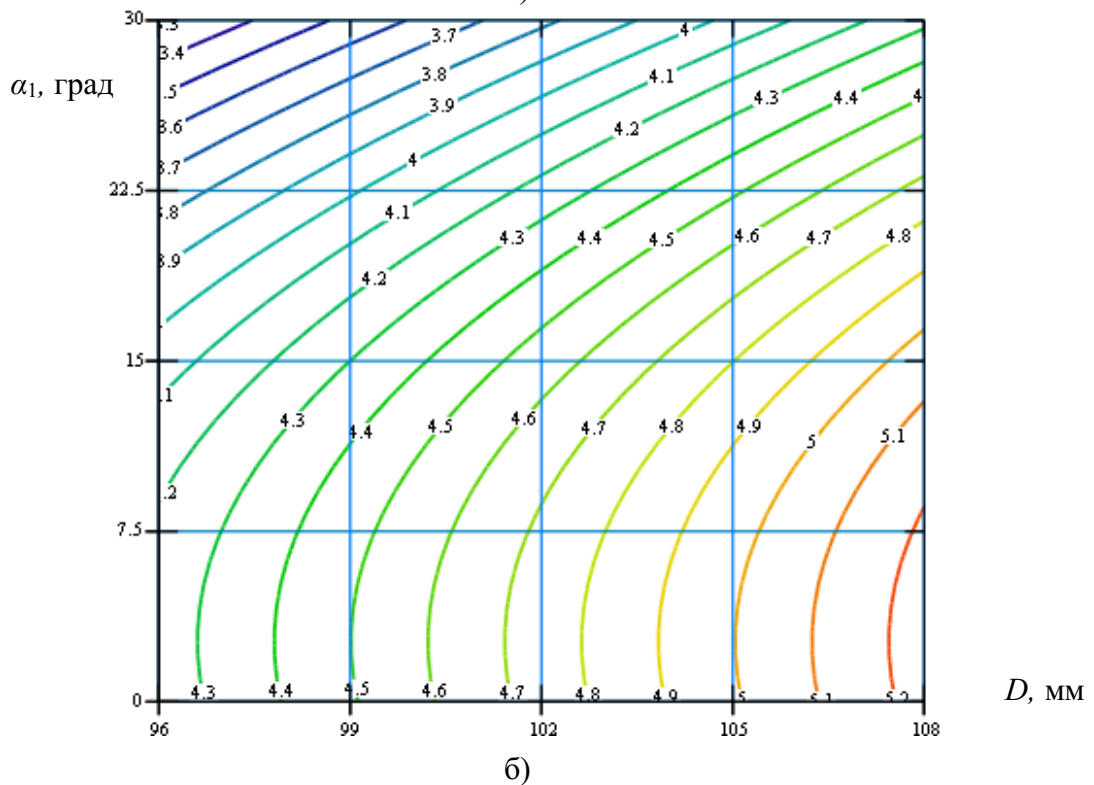
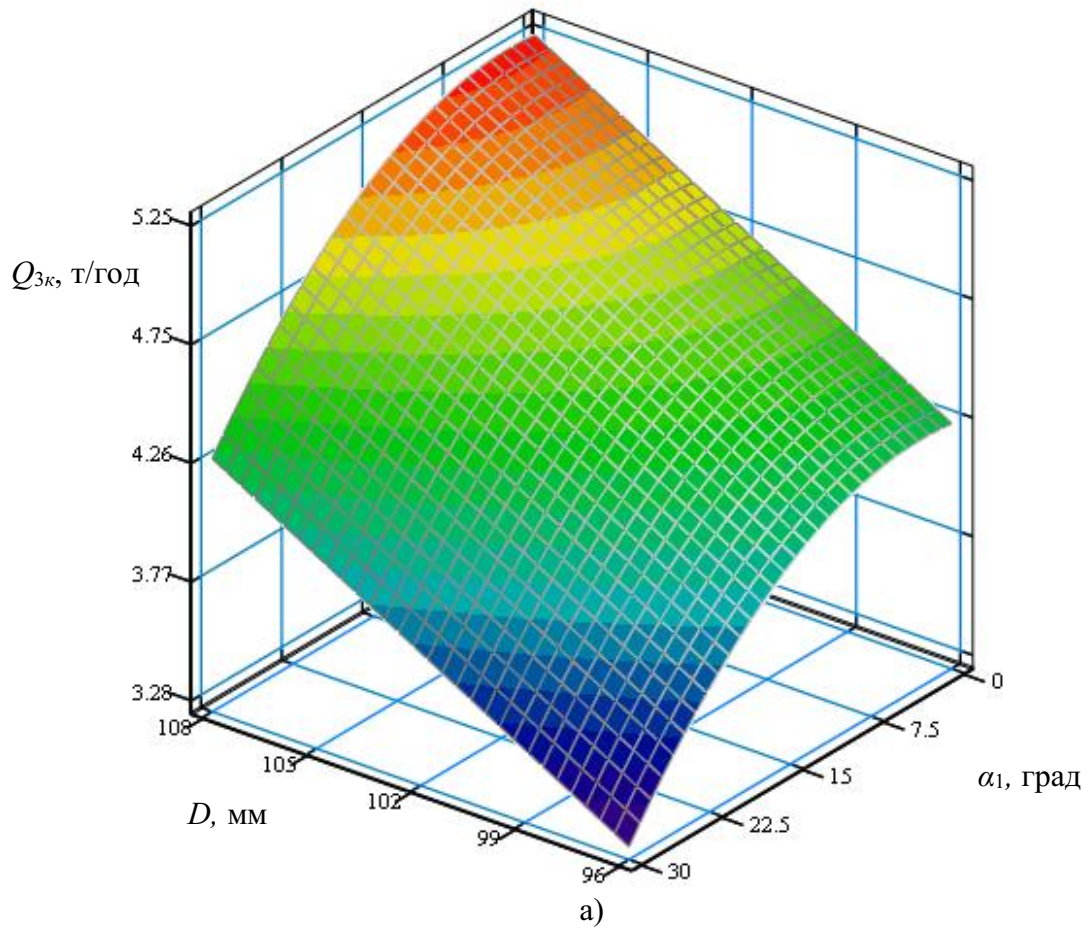


Рис. 4.12. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності переміщення насіннєвого зернового матеріалу гвинтовим конвеєром із гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною при транспортуванні кукурудзи від діаметра кожуха  $D$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  ( $n=511,2$  об/хв.)

При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,36 рази для ячменю та в 1,29 рази для кукурудзи, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град. до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,54 рази для ячменю та в 1,36 рази для кукурудзи.

Отримані рівняння регресії (4.1 - 4.12) можуть бути використані для прогнозування продуктивності  $Q$  гвинтових конвеєрів із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями залежно від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha$  для транспортування ячменю та кукурудзи у таких межах зміни факторів:

$$284 \leq n \leq 511,2 \text{ (об/хв)}; 96 \leq D \leq 108 \text{ (мм)}; 0 \leq \alpha_1 \leq 30 \text{ (град)}.$$

Найбільша продуктивність при транспортуванні зернових матеріалів досягається при використанні гвинтових робочих органів з периферійною еластичною щіткоподібною частиною. Відтак можна констатувати, що при транспортуванні насінневого зернового матеріалу такі гвинтові робочі органи забезпечують значно вищу продуктивність порівняно з гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною (в 1,51 рази). Також слід відмітити, що продуктивність транспортування зернових матеріалів гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами та з периферійною еластичною щіткоподібною частиною відрізняються тільки на 3,5%. Якщо порівнювати з відомими результатами [70] продуктивності переміщення зернового матеріалу жорстким шнеком, то продуктивність переміщення таких матеріалів гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями є нижчою.

#### **4.2. Результати експериментальних досліджень ступеня пошкодження насінневого зернового матеріалу після транспортування гвинтовими конвеєрами із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями**

Використовуючи методику проведення експериментів, представлену в підрозділі 3.3, здійснено експериментальні дослідження із використанням

спроєктованої та виготовленої установки гвинтового конвеєра (рис. 3.1 і рис. 3.2) із різними діаметрами кожухів та трьома змінними гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями (рис. 3.3): суцільною камероподібною частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, з щіткоподібною гвинтовою частиною, під час яких визначали залежність ступеня пошкодження зерна кукурудзи після транспортування залежно від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$ .

Результати експериментів з визначення ступеня пошкодження насінневого зерна кукурудзи після транспортування визначались за формулою (3.23) і записувались у план-матрицю із зміною трьох факторів ( $k=3$ ) повного факторного експерименту  $3^3$  для статистичної обробки з виведенням моделі, які описуються рівнянням (3.10) регресії другого порядку, що враховують ефекти взаємодії із варіюванням кожного параметру мінімум на трьох рівнях.

Використовуючи формули (3.11) – (3.14) визначено коефіцієнти рівняння регресії (3.10) і представлено в таблиці 4.4.

Загальний вигляд рівнянь регресії ступеня пошкодження зерна кукурудзи після транспортування гвинтовими конвеєрами залежно від зміни частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$ , тобто  $T_{i(x_1, x_2, x_3)} = f(n, D, \alpha_1)$  за результатами проведених повних факторних експериментів  $3^3$  у кодованих величинах дорівнює:

- для транспортування гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами:

$$T_{i(x_1, x_2, x_3)} = 0,195 + 0,039x_1 - 0,0025x_2 + 0,021x_3 + \\ + 0,001x_1x_3 + 1,47 \cdot 10^{-4}x_1^2 + 1,47 \cdot 10^{-4}x_2^2 + 0,0016x_3^2; \quad (4.13)$$

- для транспортування гвинтовими робочими органами з периферійною еластичною щіткоподібною частиною:

$$T_{2(x_1, x_2, x_3)} = 0,185 + 0,037x_1 - 0,0025x_2 + 0,021x_3 + \quad (4.14)$$

$$+ 7,5 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 + 8,12 \cdot 10^{-4} x_1^2 - 1,88 \cdot 10^{-4} x_2^2 + 0,0023x_3^2;$$

- для транспортування гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною:

$$T_{3(x_1, x_2, x_3)} = 0,179 + 0,038x_1 - 0,0024x_2 + 0,021x_3 + \quad (4.15)$$

$$+ 7,5 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 + 9,3 \cdot 10^{-4} x_1^2 - 6,99 \cdot 10^{-5} x_2^2 + 0,0024x_3^2,$$

де  $x_1$  - кодоване значення частоти обертання гвинтового робочого органу;  $x_2$  - кодоване значення діаметра кожуха;  $x_3$  - кодоване значення кута нахилу конвєсера.

Таблиця 4.4

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні ступеня пошкодження зерна кукурудзи після транспортування гвинтовими конвєсерами із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями

Коефіц.	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
Камероподібний	0,195	0,039	-0,0025	0,021	0	0,001	0	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	0,0016
Периферійний щіткоподібний	0,185	0,037	-0,0025	0,021	0	$7,5 \cdot 10^{-4}$	0	$8,12 \cdot 10^{-4}$	$-1,88 \cdot 10^{-4}$	0,0023
Гвинтовий щіткоподібний	0,179	0,038	-0,0024	0,021	0	$7,5 \cdot 10^{-4}$	0	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$-6,99 \cdot 10^{-5}$	0,0024

Коефіцієнти  $b_{12}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{22}$  рівняння регресії (4.13) та коефіцієнти  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{22}$  рівнянь регресії (4.14), (4.15) є незначущими відповідно до формул (3.19) та (3.20).

Рівняння регресії (4.13), (4.14) та (4.15) у натуральних величинах мають такі вигляди:

- для транспортування гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами:

$$T_{1(n, D, \alpha)} = 0,0851 + 3,34 \cdot 10^{-4} n - 4,166 \cdot 10^{-4} D + 9,47 \cdot 10^{-4} \alpha_1 + \quad (4.16)$$

$$+ 5,86 \cdot 10^{-7} n \alpha_1 + 7,32 \cdot 10^{-6} \alpha_1^2;$$

- для транспортування гвинтовими робочими органами з периферійною еластичною щіткоподібною частиною:



$$T_{2(n,D,\alpha)} = 0,0793 + 3,257 \cdot 10^{-4} n - 4,16 \cdot 10^{-4} D + 1,09 \cdot 10^{-3} \alpha_1 + 1,026 \cdot 10^{-5} \alpha_1^2; \quad (4.17)$$

- для транспортування гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною:

$$T_{3(n,D,\alpha)} = 0,0682 + 3,345 \cdot 10^{-4} n - 4 \cdot 10^{-4} D + 1,07 \cdot 10^{-3} \alpha_1 + 1,08 \cdot 10^{-5} \alpha_1^2. \quad (4.18)$$

На основі одержаних результатів експериментальних досліджень та виведених рівнянь регресії (4.16), (4.17) та (4.18) за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності ступеня пошкодження зерна кукурудзи після транспортування гвинтовими конвеєрами із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями, що представлено на рис. 4.13 – рис. 4.16.

Аналіз рівнянь регресії (4.16), (4.17) та (4.18) вказує на те, що основним фактором, який впливає на зміну ступеня пошкодження зерна кукурудзи при транспортуванні гвинтовим конвеєром із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями трьох видів, є фактор  $x_1(n)$ . Менший вплив має фактор  $x_3(\alpha_1)$  і найменший - фактор  $x_2(D)$ . Зростання першого і третього факторів призводить до підвищення ступеня пошкодження зерна кукурудзи, а зростання другого – до зменшення.

З рисунків 4.13 - 4.16 та рівнянь регресії (4.16), (4.17) та (4.18) можна зробити висновки, що при збільшенні частоти обертання трьох різних гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями, кута нахилу гвинтового конвеєра та зменшенні діаметра кожуха ступень пошкодження зерна кукурудзи зростає.

Максимальна величина ступеня пошкодження зерна кукурудзи при транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами складала 0,26%, а мінімальна – 0,14%; при транспортуванні гвинтовими робочими органами з периферійною еластичною щіткоподібною частиною максимальна величина ступеня пошкодження зерна кукурудзи 0,25%, а мінімальна – 0,13%; при транспортуванні гвинтовими робочими органами з гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною максимальна величина ступеня пошкодження зерна

кукурудзи 0,24%, а мінімальна – 0,12%.

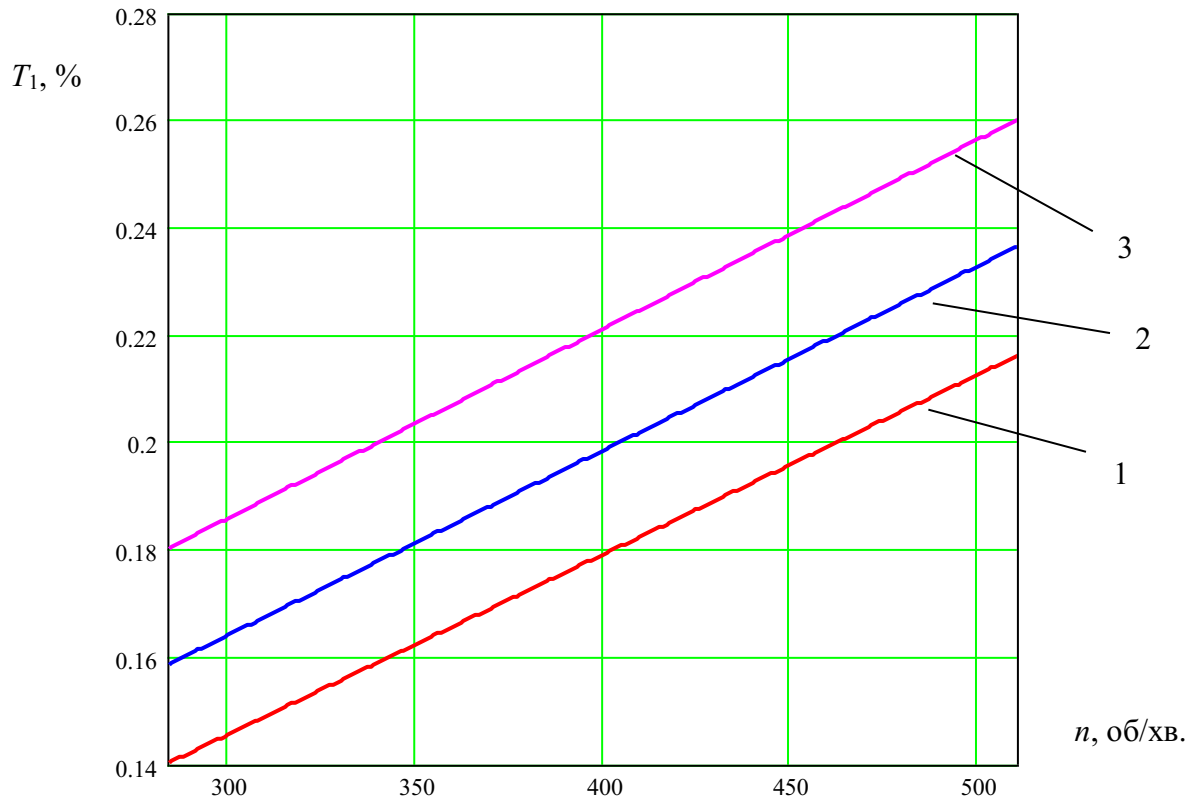


Рис. 4.13. Графіки залежності ступеня пошкодження зерна кукурудзи при транспортуванні гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ ,  $D=96\text{мм}$ : 1)  $\alpha_1=0$  град; 2)  $\alpha_1=15$  град; 3)  $\alpha_1=30$  град

Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  від 284 об/хв. до 511,2 об/хв. призводить до зростання ступеня пошкодження зерна кукурудзи в 1,53 рази при транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами; в 1,55 рази для транспортування гвинтовими робочими органами з периферійною еластичною щіткоподібною частиною; в 1,58 рази для транспортування гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною.

При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм призводить до зменшення ступеня пошкодження зерна кукурудзи в 1,04 рази для транспортування трьома розглянутими гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями.

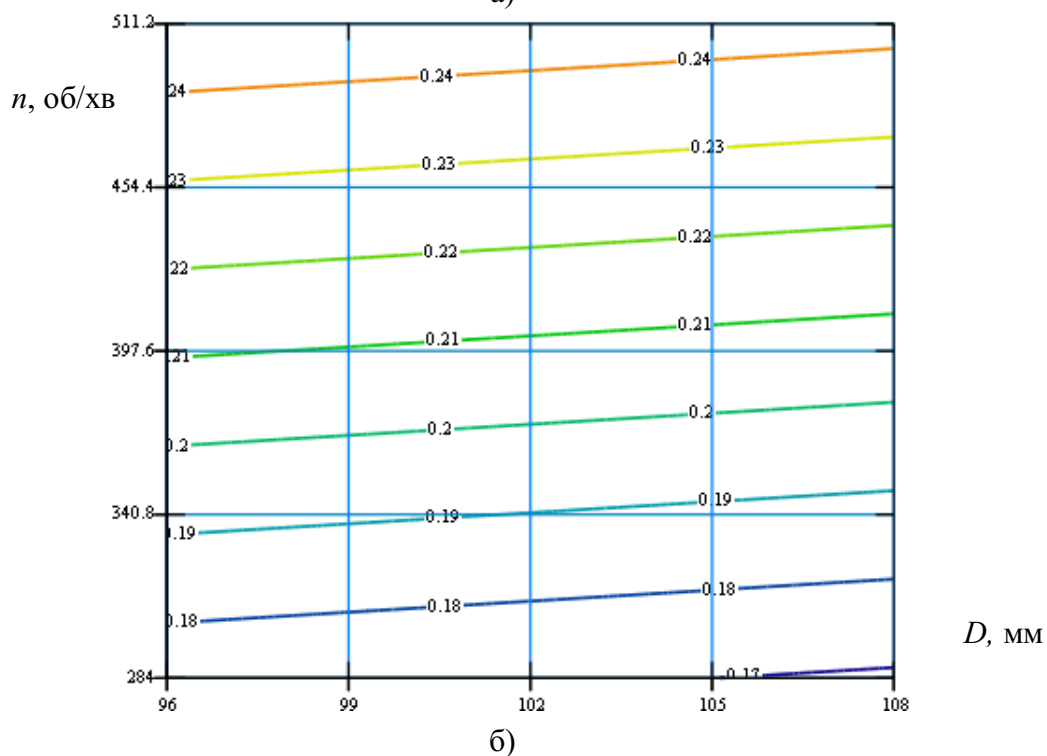
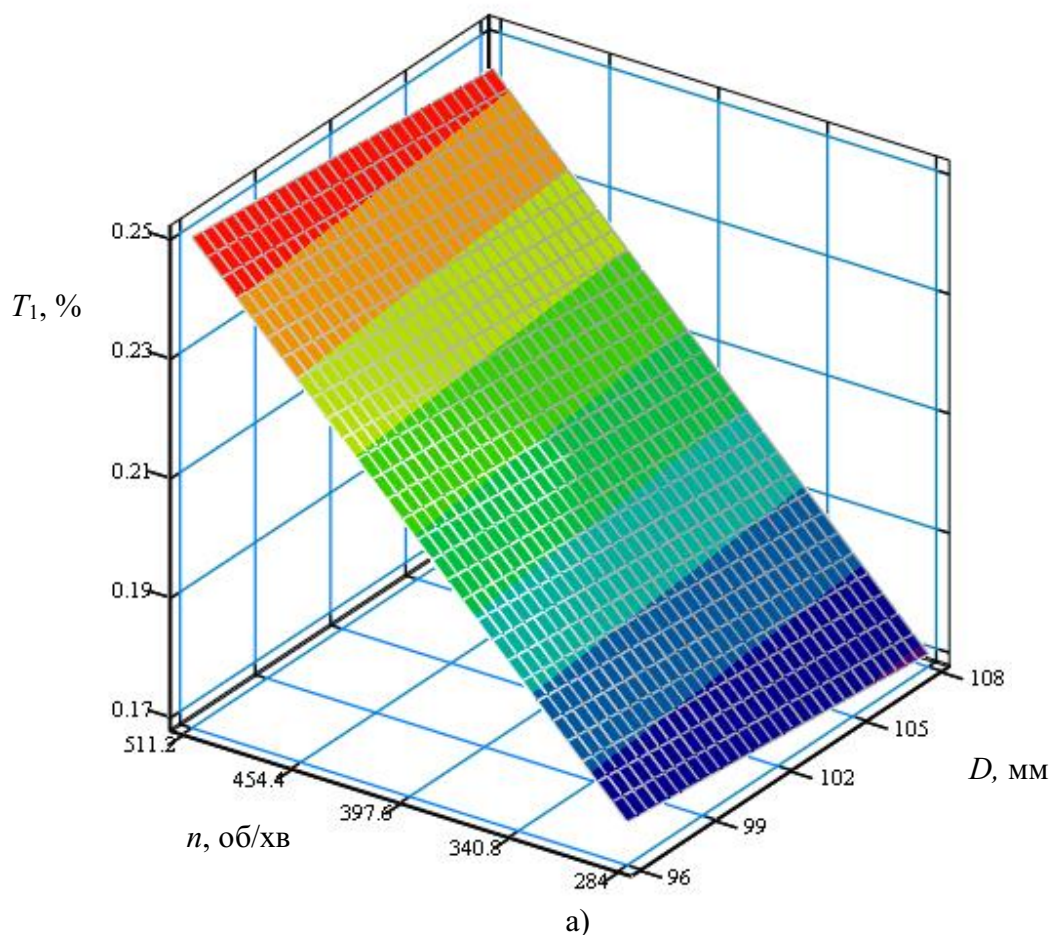


Рис. 4.14. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності ступеня пошкодження зерна кукурудзи при транспортуванні гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та діаметра кожуха  $D$  ( $\alpha_1=30$  град)

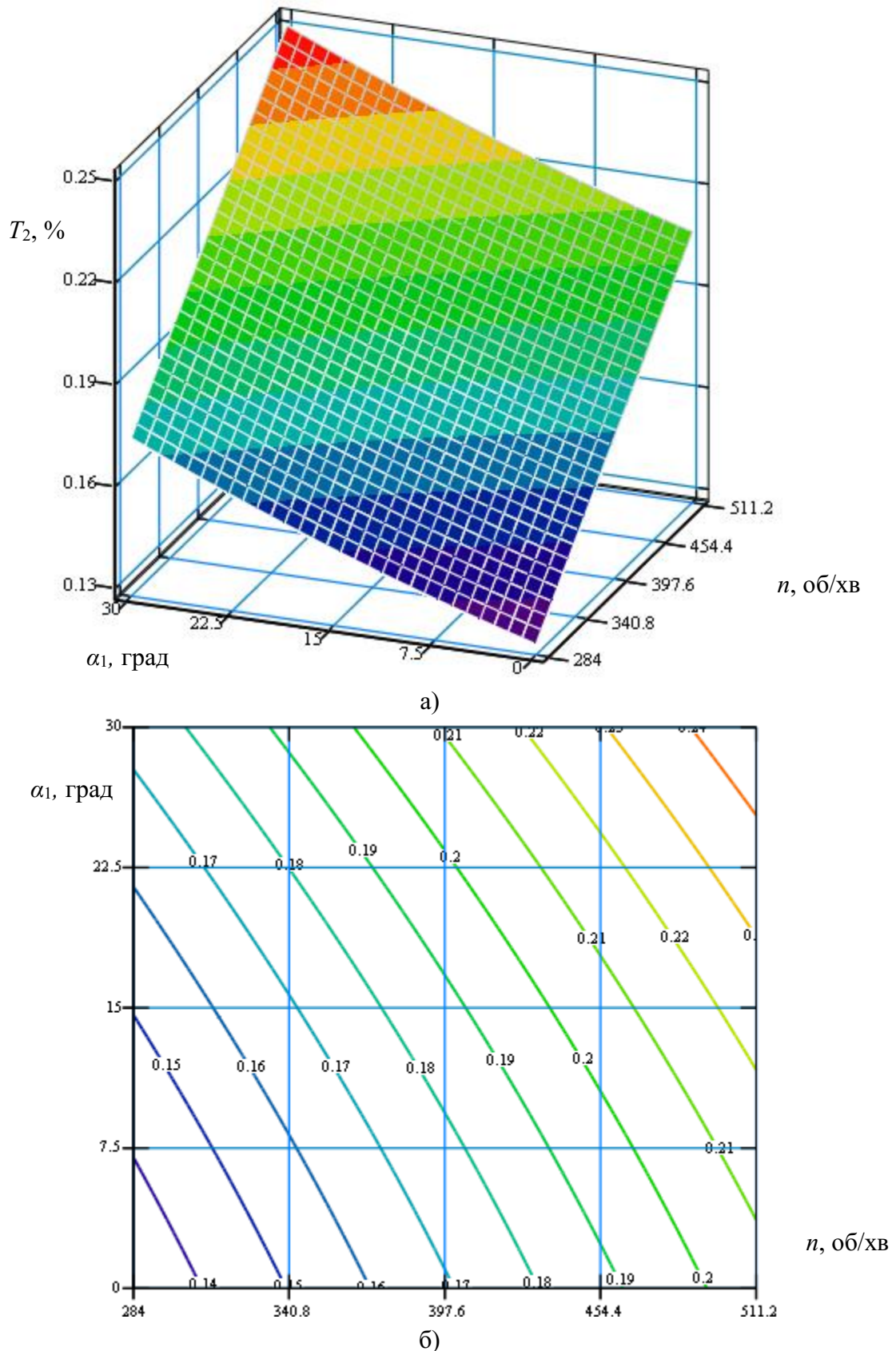


Рис. 4.15. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності ступеня пошкодження зерна кукурудзи при транспортуванні гвинтовими робочими органами з периферійною еластичною щіткоподібною частиною від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  ( $D=96\text{мм}$ )

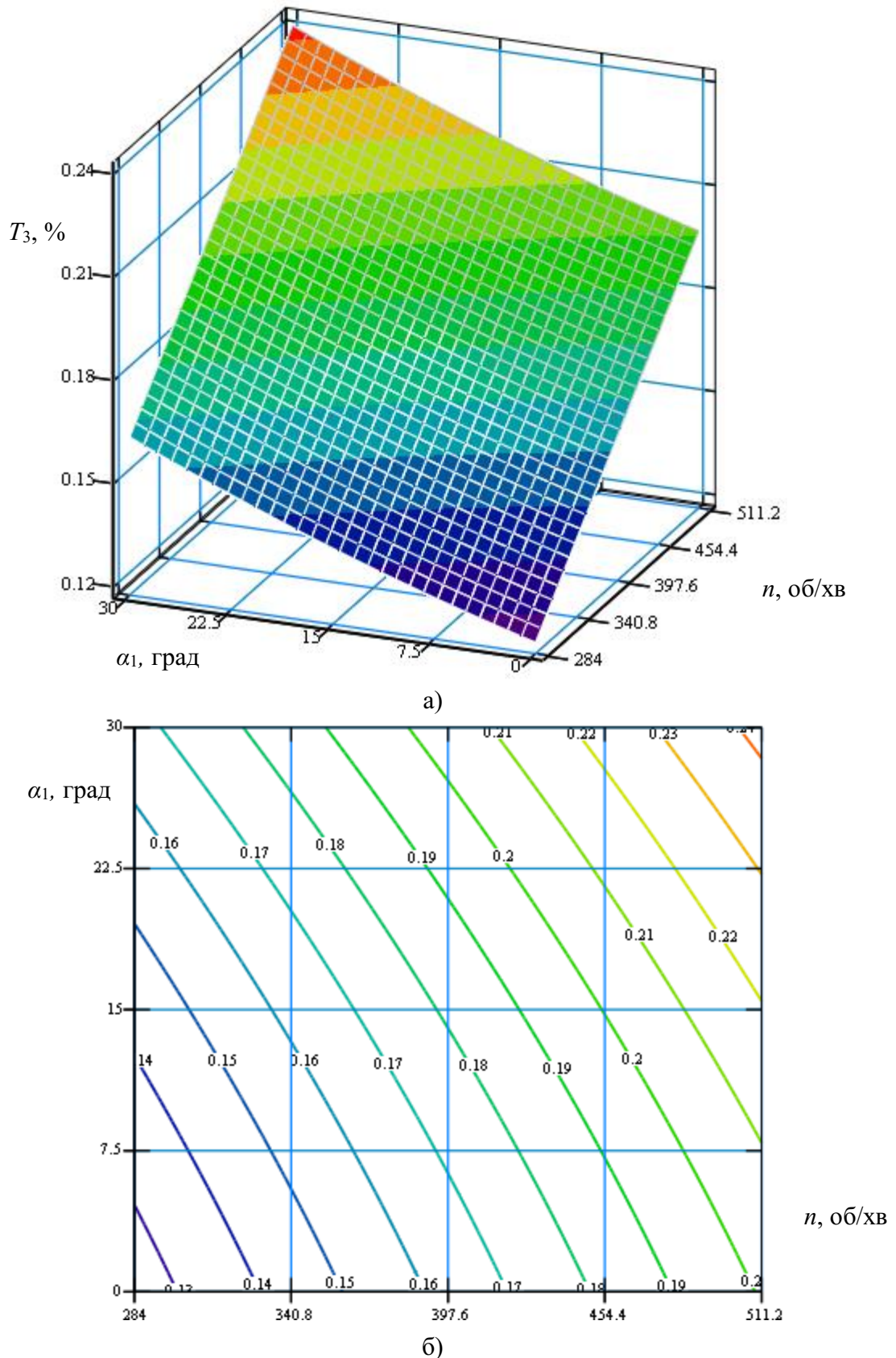


Рис. 4.16. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності ступеня пошкодження зерна кукурудзи при транспортуванні гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  ( $D=96\text{мм}$ )

Зміна кута нахилу конвеєра від 0 град. до 30 град. призводить до зростання ступеня пошкодження зерна кукурудзи в 1,3 рази для транспортування трьома розглянутими гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями.

Отримані рівняння регресії (4.16), (4.17) та (4.18) можуть бути використані для прогнозування ступеня пошкодження зерна кукурудзи  $T$  при транспортуванні гвинтовими конвеєрами із гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями залежно від частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  для транспортування ячменю та кукурудзи у таких межах зміни факторів:

$$284 \leq n \leq 511,2 \text{ (об/хв)}; 96 \leq D \leq 108 \text{ (мм)}; 0 \leq \alpha_1 \leq 30 \text{ (град)}.$$

Найбільший ступень пошкодження зерна кукурудзи визначено при транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами, а найменший – при транспортуванні гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною. Відтак можна констатувати, що при транспортуванні гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною та з периферійною еластичною щіткоподібною частиною ступень пошкодження зерна кукурудзи на 4% та 8% нижчий, ніж при транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами.

Якщо порівнювати з результатами [70] травмування переміщення зернового матеріалу жорстким шнеком, то травмування кукурудзи при її переміщенні шнеками з суцільним камероподібним елементом та периферійною еластичною щіткоподібною частиною є нижчою в 4,06... 4,32 рази, а при використанні шнека з щіткоподібним елементом є нижчою більше ніж в 4,5 рази, що пояснюється вищою еластичністю даного шнека. Також травмування матеріалу є дещо нижчим, у порівнянні з використанням дослідженого шнека з секційною еластичною робочою поверхнею [70].

### 4.3. Результати експериментальних досліджень з визначення величини максимальної деформації волокон еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною

Використовуючи методику проведення експериментів, представлену в підрозділі 3.4, для перевірки адекватності диференціального рівняння (2.16) та його розв'язку чисельним методом здійснено експериментальні дослідження величини максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$ , довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l$  та навантаження  $P$  від мірних вантажів.

Результати експериментів з визначення максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон записувались у план-матрицю із зміною трьох факторів ( $k=3$ ) повного факторного експерименту  $3^3$  для статистичної обробки та визначення можливої екстремальної точки у факторному просторі з виведенням моделі, що описується рівнянням (3.10) регресії другого порядку, що враховують ефекти взаємодії із варіюванням кожного параметру мінімум на трьох рівнях.

Визначено коефіцієнти рівняння регресії (3.10), використовуючи формули (3.11) – (3.14), та представлено у таблиці 4.5.

Загальний вигляд рівняння регресії величини максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною залежно від зміни діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$ , довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l$  та навантаження  $P$  від мірних вантажів, тобто  $\Delta y=f(d_1, l, P)$ , за результатами проведених повних факторних експериментів  $3^3$  у кодованих величинах дорівнює:

$$\begin{aligned} \Delta y_{(x_1, x_2, x_3)} = & 2,022 - 1,98x_1 + 1,52x_2 + 1,28x_3 - 1,038x_1x_2 - \\ & - 0,863x_1x_3 + 0,712x_2x_3 + 0,808x_1^2 + 0,308x_2^2 + 0,0075x_3^2, \end{aligned} \quad (4.19)$$

де  $x_1$  - кодоване значення діаметра поперечного перерізу волокна;  $x_2$  - кодоване значення довжини робочої частини волокон;  $x_3$  - кодоване значення навантаження від мірних вантажів.

Таблиця 4.5

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною

Коефіц.	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
Нейлон	2,022	-1,98	1,52	1,28	-1,038	-0,863	0,712	0,808	0,308	0,0075

Усі коефіцієнти рівняння регресії (4.19) є значущими відповідно до формул (3.19) та (3.20).

Рівняння регресії (4.19) у натуральних величинах:

$$\begin{aligned} \Delta y = & 3,397 - 9,34d_1 + 0,425l + 3,04P - 0,432d_1l - \\ & - 2,696d_1P + 0,148lP + 5,05d_1^2 + 0,0086l^2 + 0,012P^2. \end{aligned} \quad (4.20)$$

На основі одержаних результатів експериментальних досліджень та виведеного рівняння регресії (4.20) за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від досліджуваних змінних факторів, що представлено на рис. 4.17 – рис. 4.20.

Аналіз рівняння регресії (4.19) вказує на те, що основним фактором, який впливає на зміну максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною, є фактор  $x_1(d_1)$ . Менший вплив має фактор  $x_2(l)$  і найменший - фактор  $x_3(P)$ , зростання другого і третього факторів призводить до збільшення максимальної деформації нейлонових волокон, а зростання першого – до зменшення.

На основі аналізу рівняння регресії (4.20) та побудованих графіків рис. 4.17 – рис. 4.20 встановлено, що із зменшенням діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$ , збільшенням довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l$  та навантаження  $P$  величина деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон еластичного щіткоподібного шнека зростає.



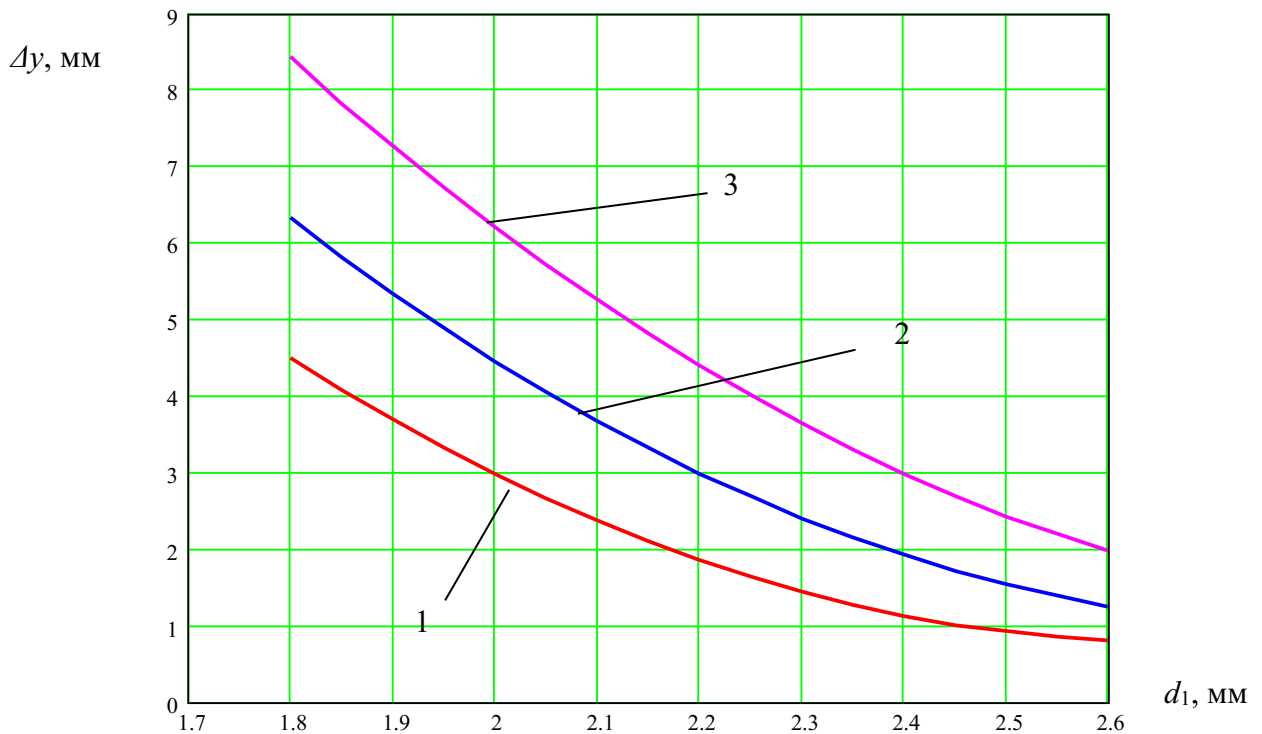


Рис. 4.17. Графіки залежності максимальної деформації  $\Delta u$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$ ,  $P=2H$ : 1)  $l=28$ мм; 2)  $l=32$ мм; 3)  $l=36$ мм

Максимальне значення деформації  $\Delta u$  становить 10,5 мм, а мінімальне – 0,7 мм. Збільшення діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$  від 1,8 мм до 2,6 мм призводить до зменшення деформації  $\Delta u$  у 4,4 рази. Збільшення довжини робочої частини волокон  $l$  від 28 мм до 36 мм призводить до збільшення деформації  $\Delta u$  у 2,4 рази, при цьому збільшення навантаження  $P$  від 1,4 Н до 2,6 Н призводить до збільшення деформації  $\Delta u$  у 2,36 рази. Відхилення теоретичних результатів досліджень від експериментальних становить до 17%.

Отримане рівняння регресії (4.20) може бути використане для прогнозування максимальної деформації  $\Delta u$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною залежно від діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$ , довжини робочої частини волокон  $l$  та навантаження  $P$  від мірних вантажів у таких межах зміни факторів:

$$1,8 \text{ мм} < d_1 < 2,6 \text{ мм}, 28 \text{ мм} < l < 36 \text{ мм}, 1,4 \text{ Н} < P < 2,6 \text{ Н}.$$

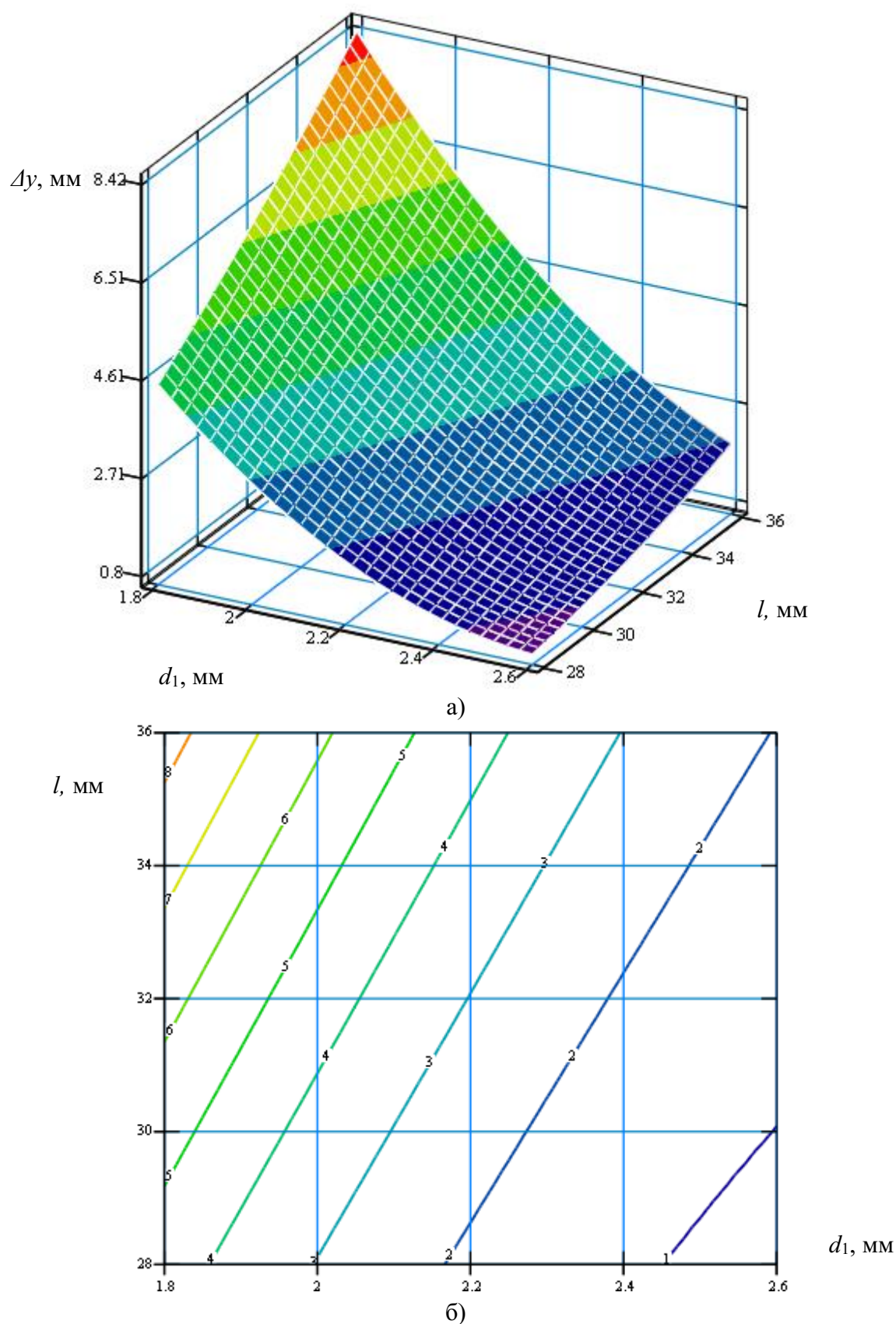


Рис. 4.18. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$  та довжини робочої частини волокон  $l$  ( $P=2$  Н)

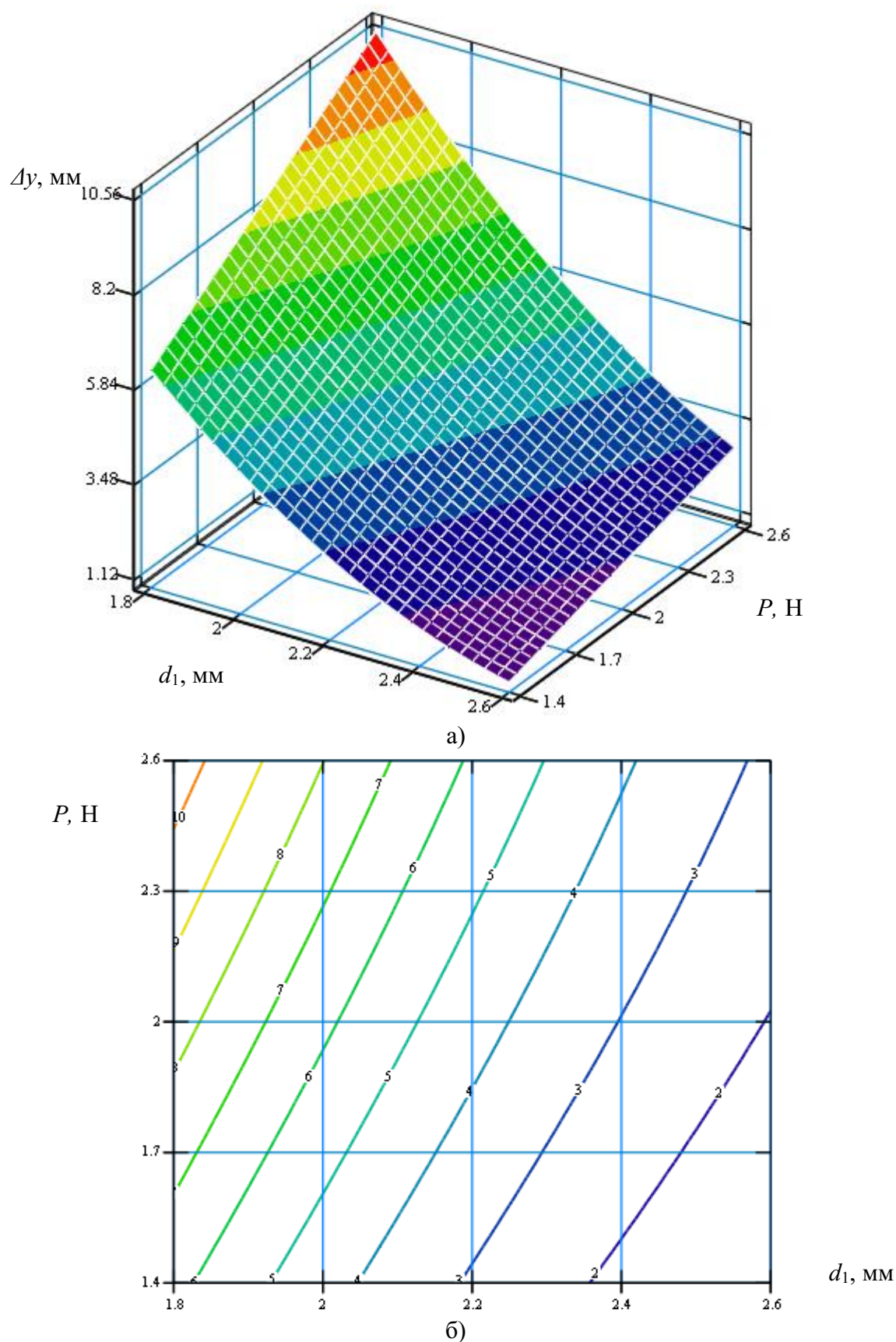


Рис. 4.19. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$  та навантаження  $P$  від мірних вантажів ( $l=36$  мм)

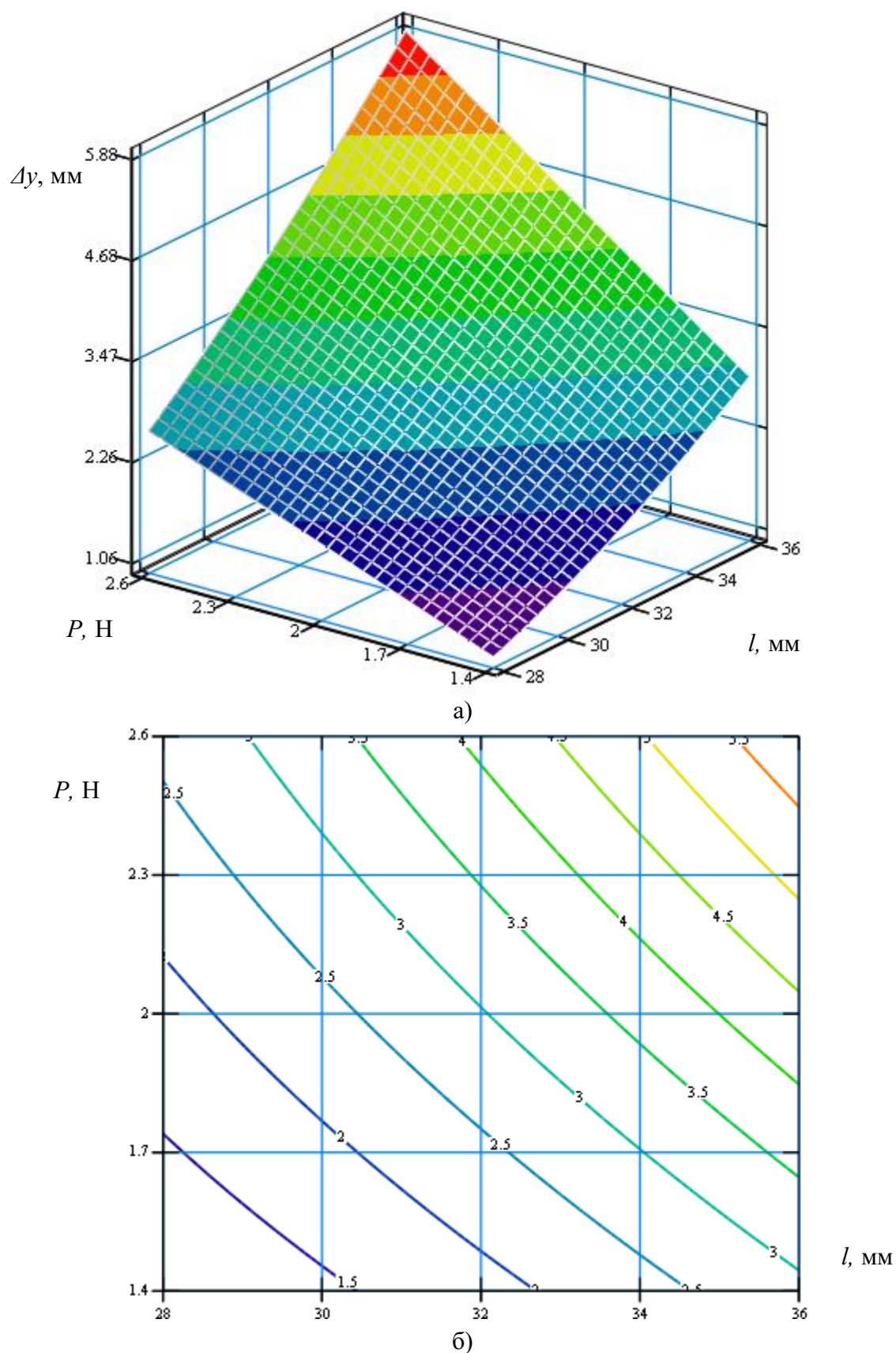


Рис. 4.20. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності максимальної деформації  $\Delta y$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від довжини робочої частини волокон  $l$  та навантаження  $P$  від мірних вантажів ( $d_1=2,2$  мм)

#### 4.4. Висновки

1. Представлено результати експериментальних досліджень трьох різних типів гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями: суцільною камероподібною частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, з щіткоподібною гвинтовою частиною з визначенням продуктивності гвинтових конвеєрів із вказаними гвинтовими робочими органами та ступеня пошкодження насінневого зернового матеріалу після транспортування гвинтовими конвеєрами кукурудзи та ячменю від зміни трьох основних факторів: частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$ , внутрішнього діаметра кожуха  $D$ , та кута нахилу конвеєра  $\alpha_1$  у таких межах зміни вхідних факторів:  $284 \leq n \leq 511,2$  (об/хв);  $96 \leq D \leq 108$  (мм);  $0 \leq \alpha_1 \leq 30$  (град).

2. Проведено статистичне оброблення результатів експериментальних досліджень та виведенням емпіричних рівнянь регресії, що дають можливість адекватно прогнозувати продуктивність гвинтових конвеєрів із еластичними гвинтовими робочими органами та ступінь пошкодження зернового матеріалу кукурудзи та ячменю після транспортування шнековими механізмами з еластичними змінними поверхнями.

3. Встановлено, що при збільшенні діаметра кожуха, частоти обертання гвинтового робочого органу з еластичною суцільною камероподібною частиною та зменшенні кута нахилу гвинтового конвеєра продуктивність транспортування зернового матеріалу зростає. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування ячменю складала 6,37 т/год., а мінімальна – 3,98 т/год. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування кукурудзи складала 6,67 т/год., а мінімальна – 4,18 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  від 284 об/хв. до 511,2 об/хв. призводить до зростання продуктивності в 1,29 рази. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,11 рази, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,12 рази.

4. За результатами досліджень встановлено, що при збільшенні діаметра кожуха, частоти обертання гвинтового робочого органа з периферійною еластичною щіткоподібною частиною та зменшенні кута нахилу гвинтового конвеєра продуктивність транспортування зернового матеріалу зростає. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування ячменю складала 6,61 т/год, а мінімальна – 3,49 т/год. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування кукурудзи складала 6,92 т/год, а мінімальна – 3,84 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до оптимальної частоти обертання призводить до зростання продуктивності в 1,25 рази для ячменю та в 1,22 рази для кукурудзи. Оптимальною частою обертання гвинтового робочого органу при транспортуванні ячменю є величина від 430 до 440 об/хв., а для транспортування кукурудзи – від 450 до 480 об/хв. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,22 рази для ячменю та в 1,16 рази для кукурудзи, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,28 рази для ячменю та в 1,2 рази для кукурудзи.

5. Визначено, що при збільшенні діаметра кожуха, частоти обертання гвинтового робочого органа з щіткоподібною гвинтовою частиною та зменшенні кута нахилу гвинтового конвеєра продуктивність транспортування зернового матеріалу зростає. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування ячменю складала 4,37 т/год, а мінімальна – 1,77 т/год. Максимальна досягнена продуктивність під час транспортування кукурудзи складала 5,25 т/год, а мінімальна – 2,56 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до оптимальної частоти обертання призводить до зростання продуктивності в 1,25 рази. Оптимальною частою обертання гвинтового робочого органу при транспортуванні ячменю та кукурудзи є величина від 470 до 480 об/хв. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,36 рази

для ячменю та в 1,29 рази для кукурудзи, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,54 рази для ячменю та в 1,36 рази для кукурудзи.

6. Також за результатами досліджень встановлено, що найбільша продуктивність при транспортуванні зернових матеріалів досягається при використанні гвинтових робочих органів з периферійною еластичною щіткоподібною частиною. Відтак можна констатувати, що при транспортуванні зернового матеріалу такі гвинтові робочі органи забезпечують значно вищу продуктивність порівняно з гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною (в 1,51 рази). Також слід відмітити, що продуктивність транспортування зернових матеріалів гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами та з периферійною еластичною щіткоподібною частиною відрізняються тільки на 3,5%. Якщо порівнювати з відомими результатами продуктивності переміщення зернового матеріалу жорстким шнеком, то продуктивність переміщення таких матеріалів гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями є нижчою.

7. Досліджено, що збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до 511,2 об/хв. призводить до зростання ступеня пошкодження зерна кукурудзи в 1,53 рази для транспортування гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами; в 1,55 рази для транспортування гвинтовими робочими органами з периферійною еластичною щіткоподібною частиною; в 1,58 рази для транспортування гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм призводить до зменшення ступеня пошкодження зерна кукурудзи в 1,04 рази для транспортування трьома розглянутими гвинтовими робочими органами з еластичними поверхнями.

8. Встановлено, що найбільший ступень пошкодження зерна кукурудзи здійснюється при транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичною суцільною камероподібною частинною, а найменший – при транспортуванні гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою

частиною. Відтак можна констатувати, що при транспортуванні гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною та з периферійною еластичною щіткоподібною частиною ступінь пошкодження зерна кукурудзи на 4% та 8% нижчий, ніж при транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичною суцільною камероподібною частинною.

9. Представлено результати експериментальних досліджень з виведенням рівняння регресії величини максимальної деформації  $\Delta u$  нейлонових волокон гвинтового робочого органу з щіткоподібною гвинтовою частиною від діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$ , довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l$  та навантаження  $P$  у таких межах зміни вхідних факторів:  $1,8 \text{ мм} < d_1 < 2,6 \text{ мм}$ ,  $28 \text{ мм} < l < 36 \text{ мм}$ ,  $1,4 \text{ Н} < P < 2,6 \text{ Н}$ .

10. Встановлено, що із зменшенням діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$  та збільшенням довжини робочої частини волокон еластичного щіткоподібного шнека  $l$  та навантаження  $P$  величина деформації  $\Delta u$  нейлонових волокон еластичного щіткоподібного шнека зростає. Максимальне значення деформації  $\Delta u$  становить 10,5 мм, а мінімальне – 0,7 мм. Збільшення діаметра поперечного перерізу волокна  $d_1$  від 1,8 мм до 2,6 мм призводить до зменшення деформації  $\Delta u$  у 4,4 рази. Збільшення довжини робочої частини волокон  $l$  від 28 мм до 36 мм призводить до збільшення деформації  $\Delta u$  у 2,4 рази. При цьому збільшення навантаження  $P$  від 1,4 Н до 2,6 Н призводить до збільшення деформації  $\Delta u$  у 2,36 рази. Відхилення теоретичних результатів досліджень від експериментальних становить до 17%.



## РОЗДІЛ 5

### ПРОЕКТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ШНЕКОВИХ МЕХАНІЗМІВ З ЕЛАСТИЧНИМИ ЗМІННИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ НАСІННЄВИХ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 5.1. Технологічність конструкцій та способи виготовлення гвинтових робочих органів з еластичними робочими поверхнями

Гвинтові конвеєри широко використовуються у різних галузях економіки, й особливо у сільськогосподарському виробництві при переміщенні насінневих матеріалів, зернових, міндобрив тощо [158]. Однією із вимог, які ставляться до них, є мінімізація пошкодження (транспортування) насінневих зернових матеріалів, що зумовило розроблення прогресивних конструкцій гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями.

Суттєвим впливом на процес переміщення вантажів гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею, є технологічність конструкції його елементів. Забезпечення технологічності конструкції виробу - функція підготовки виробництва, яка передбачає взаємозв'язане вирішення конструкторських і технологічних задач спрямованих на підвищення продуктивності праці, досягнення оптимальних трудових та матеріальних затрат і скорочення часу на виробництво, технічне обслуговування та ремонт виробу [22]. Відпрацювання конструкції виробу на технологічність передбачає: зниження трудомісткості і собівартості виготовлення виробу та його монтажу поза межами заводу-виробника; зниження трудомісткості, вартості і часу технічного обслуговування та ремонту виробу; зниження загальної матеріаломісткості виробу – витрат металу і паливно-енергетичних ресурсів при виготовленні, монтажі поза межами підприємства-виробника, а також технічному обслуговуванні і ремонті [22].

В основному технологічність конструкції виробу залежить від наступних груп факторів, таких, як його властивостей, запроектованої якості, умов експлуатації та вимог до ремонту. Оцінюється виробнича та експлуатаційна

технологічність виробу показниками трудомісткість виготовлення і технологічною собівартістю, коефіцієнтом використання матеріалу, витратами на конструкторську і технологічну підготовку виробництва, витратами часу і ресурсів на реалізацію виробничих процесів і ремонтних робіт тощо [22].

При проектуванні гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею необхідно передбачати відповідність не лише експлуатаційним вимогам, але й раціонального та економічного його виготовлення згідно до вимог принципів технологічності конструкції виробу. Згідно [27] базовими критеріями технологічності конструкції виробу є трудомісткість і собівартість його виготовлення. Загалом технологічність конструкції виробу згідно [27] – це сукупність властивостей, які визначають його пристосованість до досягнення оптимальних витрат у процесі виробництва, експлуатації та ремонту для заданих показників якості й умов виконання своїх функцій.

При проектуванні гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею згідно [27] слід використовувати уніфіковані складальні одиниці, стандартизовані й нормалізовані деталі, що забезпечить високу якість, експлуатаційну надійність та довговічність виготовлення цих гвинтових робочих органів.

Враховуючи специфіку виготовлення дослідних зразків гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею, слід зазначити, що на відміну від традиційних гвинтових робочих органів технологія їх виготовлення є значно складнішою і передбачає окрім традиційних операцій, таких як навивання, калібрування, зварювання, додаткових, пов'язаних із створенням на периферійній частині шнека еластичної поверхні. Причому створенням на периферійній частині шнека еластичної поверхні залежно від її форми і матеріалів у кожному конструктивному варіанті потребує індивідуального технологічного вирішення.

Розглянемо більш детально технологічні особливості виготовлення гвинтових робочих органів з еластичними робочими поверхнями. На рис. 5.1 [158] представлено розроблені на основі отриманих патентів України [111-119]

гвинтові робочі органи із еластичними поверхнями. Зокрема на рис. 5.1 а, рис. 5.1 в і рис. 5.1 д представлено їх конструктивні схеми, а на рис. 5.1 б, рис. 5.1 г і рис. 5.1 е - загальний вигляд.

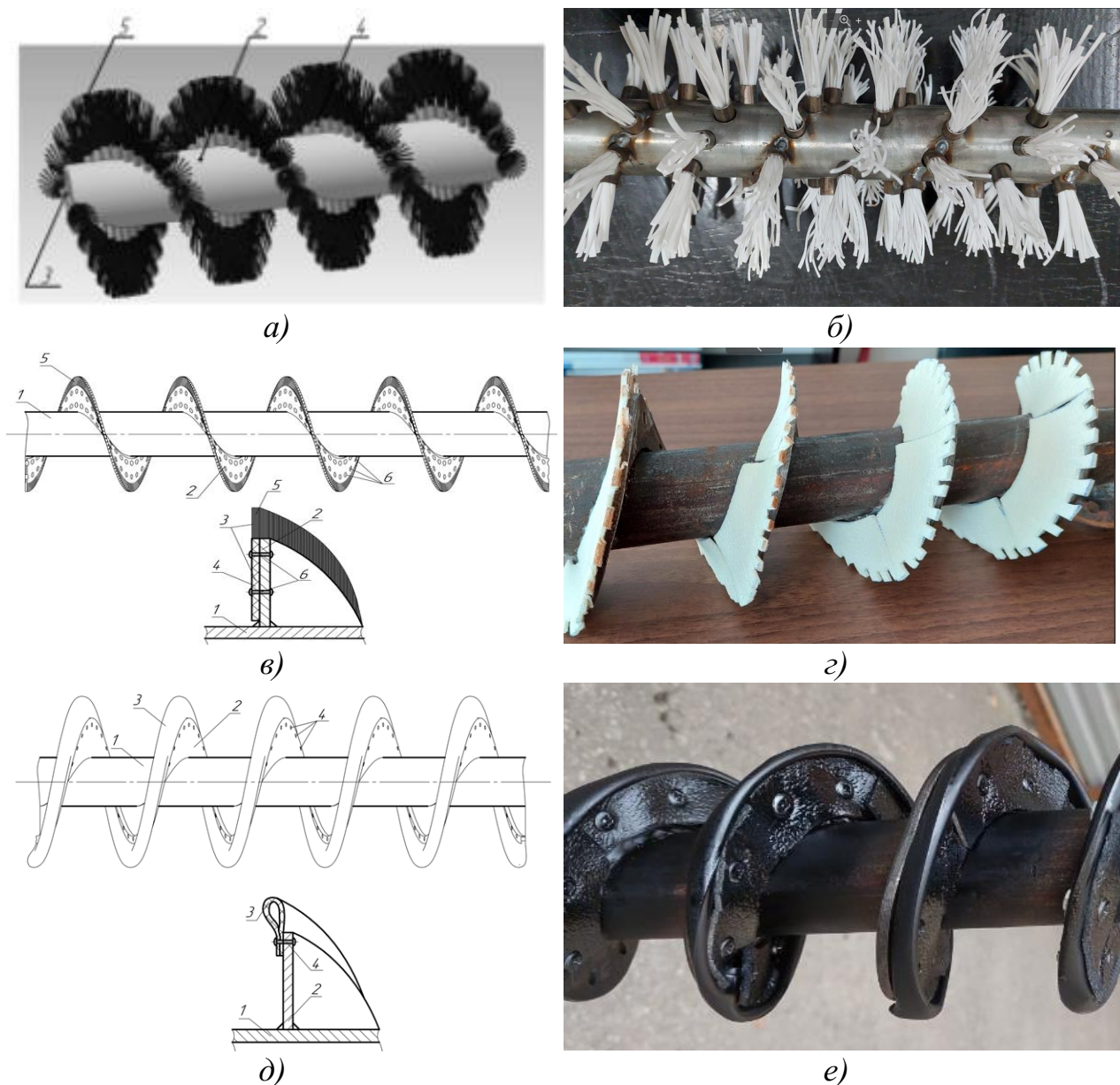


Рис. 5.1. Гвинтові робочі органи із еластичними поверхнями:  
а), в), д) конструктивні схеми; б), г), е) загальні вигляди

Конструктивне рішення еластичного гвинтового робочого органу з щіткоподібним елементом представлено на рис. 5.1 а (рис. 5.1 б). Воно передбачає наступну послідовність технологічних операцій при виготовленні [150]:

1. Попередня розмітка (відповідно до прийнятого кроку витків) і свердління отворів 4 по гвинтовій лінії вздовж пустотілого вала 2.

2. Закріплення пустотілих циліндричних трубок 3 в отворах 4 по гвинтовій лінії у пустотілому валі 2 (зварюванням, посадкою з натягом, паянням).

3. Закріплення в пустотілих циліндричних трубках 3 пучків еластичних щіткоподібних елементів (еластичних щіток) 1 (клеєнням).

4. Закріплення на торцевих поверхнях пустотілого вала двох цапф (механічно, зварюванням).

При використанні даної технології можна одержати лише двохзахідні еластичні гвинтові робочі органи (з подвійною спіраллю).

Отримання однозахідних чи багатозахідних шнеків можливе при кріпленні еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі шнека (конструктивні рішення таких еластичних гвинтових робочих органів представлені на рис. 3.3.б та рис. 3.3.в). Процес їх виготовлення передбачає виконання таких технологічних операцій:

1. Свердління свердлильною головкою отворів на торцевій поверхні навитої щільним пакетом на ребро спіралі, яка встановлена в кондуктор.

2. Калібрування спіралі на заданий крок.

3. Жорстке закріплення спіралі з заданим кроком на поверхні пустотілого вала (зварюванням).

3. Механічне закріплення в отворах торцевої поверхні спіралі еластичних елементів (секційних, з периферійною щіткоподібною частиною, із суцільним камероподібним елементом).

4. Закріплення на торцевих поверхнях пустотілого вала цапф (механічно, зварюванням).

Окрім представлених способів виготовлення гвинтових робочих органів з еластичною робочою поверхнею існує цілий ряд інших, наприклад з полімерним покриттям, кріпленням радіальних еластичних щіток до гвинтового ребра тощо. При цьому базовою вимогою, що висувається до еластичних поверхонь гвинтових робочих органів є мінімізація коефіцієнту тертя робочої поверхні

шнека при взаємодії із кожухом і зерновим матеріалом та забезпечення безперервного переміщення транспортованого матеріалу.

## **5.2. Перспективні розробки шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями для зменшення ступеня пошкодження зернового матеріалу при його транспортуванні**

З метою підвищення ефективності транспортування сипких вантажів шнековими механізмами актуальним залишається питання розробки їх прогресивних конструкцій з можливостями мінімального пошкодження зернових матеріалів. Відтак нами розроблено ряд перспективних конструкцій цих механізмів, оснащених гвинтовими робочими органами із еластичними поверхнями [111-119]. Проведемо їх аналіз.

Нами розроблено конструкцію шнека з еластичною щіткоподібною поверхнею (пат. України № 123753 і пат. України № 142241) [111, 113], загальний вигляд та перерізи якого зображено на рис. 5.2.

Так на рис. 5.2.а зображено загальний вигляд шнека з еластичною щіткоподібною поверхнею; рис. 5.2.б - вигляд А на рис. 5.2.а; на рис. 5.2.в у аксонометрії зображено розташування шнека з еластичною щіткоподібною поверхнею гвинтової спіралі на валу; на рис. 5.2.г зображено варіант виконання шнека з густою еластичною щіткоподібною поверхнею; на рис. 5.2.д зображено розташування та кріплення пучків еластичних щіток у пустотілих циліндричних трубках, краї яких переходять у еліпсоподібну форму; рис. 5.2.е - переріз по Б-Б на рис. 5.2.д; рис. 5.2.є - переріз по В-В на рис. 5.2.д.

Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею містить направляючий кожух 1, в якому розташований пустотілий вал 2. У пустотілому валу 2 перпендикулярно до його центральної осі, по гвинтовій лінії виконані отвори, в яких закріплені пустотілі циліндричні трубки 3, краї 4 яких виступають над зовнішньою поверхнею пустотілого вала 2. У пустотілих циліндричних трубках 3 (рис. 5.2.д) розташовані пучки еластичних щіткоподібних елементів 5, периферійна поверхня яких контактує з внутрішньою поверхнею

направляючого кожуха 1. Краї 4 порожніх циліндричних трубок 3, що виступають над зовнішньою поверхнею порожнього вала 2, переходять в еліпсоподібну форму для фіксації пучків еластичних щіток 5 (рис. 5.2.є).

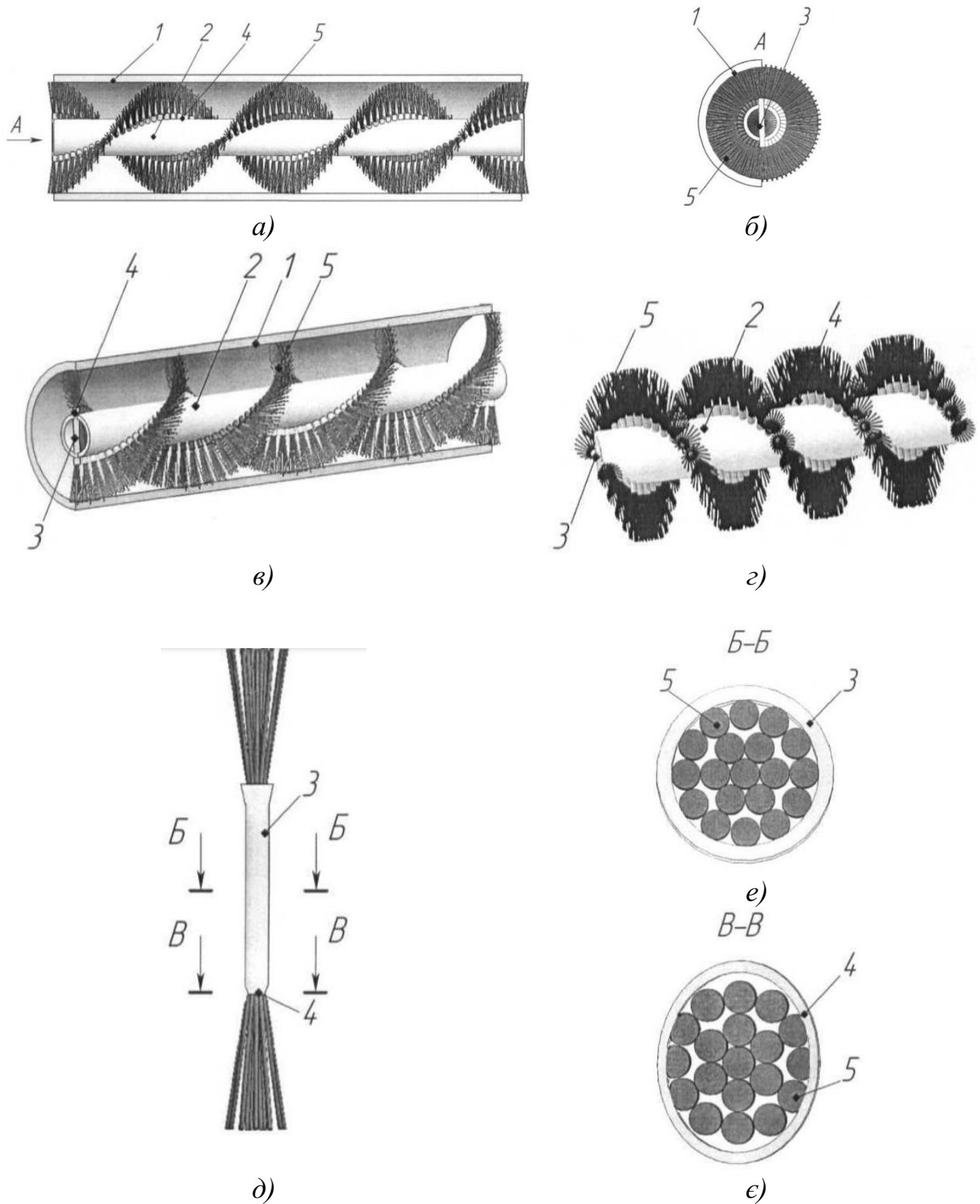


Рис. 5.2. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею (пат. України № 123753)

Розташуванням пучків еластичних щіткоподібних елементів 5 в пустотілих циліндричних трубках 3, які розміщені в отворах пустотілого вала 2 перпендикулярно до його центральної осі, по гвинтовій лінії, забезпечується конструктивно просте та надійне кріплення до пустотілого вала 2 еластичної гвинтової щіткоподібної поверхні. Пустотілі циліндричні трубки 3 можуть кріпитись в отворах до пустотілого вала різними способами, наприклад за допомогою точкового зварювання, клею або іншими способами. При цьому, виконанням країв 4 пустотілих циліндричних трубок 3, що виступають над зовнішньою поверхнею пустотілого вала 2, з переходом в еліпсоподібну форму забезпечується надійна фіксація пучків еластичних щіткоподібних елементів 5 в пустотілих циліндричних трубках 3 шляхом їх стискання. Також це сприяє додатковому кріпленню пустотілих циліндричних трубок 3 до пустотілого вала 2.

Виконання країв пустотілих циліндричних трубок 3 з переходом в еліпсоподібну форму дозволяє більш точно сформувати з пучків еластичних щіткоподібних елементів 5 гвинтову лінію. При цьому, більші осі еліпсоподібної форми країв пустотілих циліндричних трубок 3 повинні розташовуватись в напрямку формування гвинтової лінії. Контакт периферійної поверхні пучків еластичних щіткоподібних елементів 5 з внутрішньою поверхнею направляючого кожуха 1 дозволяє уникнути появи між ними зазорів і відповідно попадання в них частинок транспортованого матеріалу та їх пошкодження. При цьому, в критичних випадках защемлення частинок матеріалу між внутрішньою поверхнею направляючого кожуха 1 та периферійною поверхнею пучків еластичних щіткоподібних елементів 5, останні прогинаються і пропускають матеріал, не травмуючи його.

Також безпосередній контакт периферійної поверхні пучків еластичних щіткоподібних елементів 5 з внутрішньою поверхнею направляючого кожуха 1 сприяє зниженню радіальних коливань центральної частини пустотілого вала 2, закріпленого в опорах (що відбувається в традиційних шнеках) і відповідно підвищує його стійкість, надійність і довговічність. Таке розташування еластичної щіткоподібної поверхні відносно до внутрішньої поверхні

направляючого кожуха 1 до певної міри виконує функцію підшипника ковзання, що також позитивно впливає на процес транспортування.

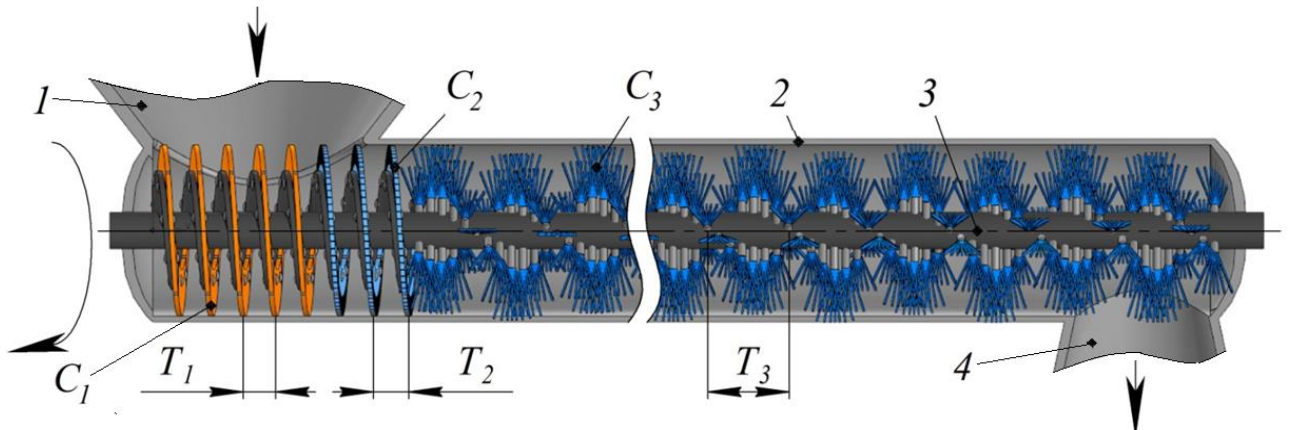
Працює шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею наступним чином. Матеріал, що транспортується подається (наприклад з бункера) в зону між внутрішньою поверхнею направляючого кожуха 1 та зовнішньою поверхнею пустотілого вала 2 і за допомогою пучків еластичних щіткоподібних елементів 5, які розташовані по гвинтовій лінії, переміщається в зону вивантаження. Густотою пучків еластичних щіткоподібних елементів 5 (на рис. 5.2.в зображено рідше їх розташування, а на рис. 5.2.г - густіше) формується щільність гвинтової лінії шнека залежно від розмірно-масових характеристик матеріалу, що транспортується. Застосування пар тертя метал - поліаміди або інші пластмасові матеріали показали високу стійкість до зношування навіть при їх роботі в абразивних середовищах.

Також нами розроблено конструкцію комбінованого еластичного гвинтового транспортера (пат. України № 124326) [112], загальний вигляд якого зображено на рис. 5.3.а; на рис. 5.3.б в аксонометрії зображено зону завантаження сипкого матеріалу з бункера; на рис. 5.3.в у аксонометрії зображено зону виходу сипкого матеріалу з вивантажувального патрубку. Комбінований еластичний гвинтовий транспортер містить бункер 1, який з'єднаний з направляючим кожухом 2, в котрому розташований гвинтовий робочий орган 3. З протилежної сторони від бункера 1 з направляючим кожухом 2 з'єднаний вивантажувальний патрубок 4.

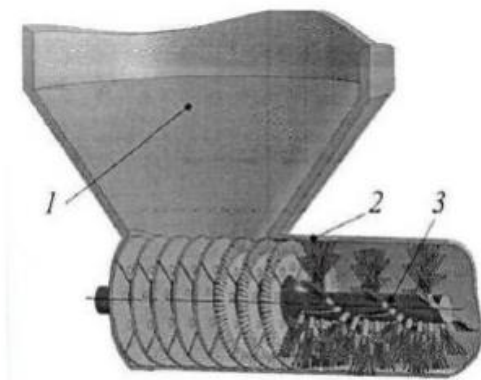
Гвинтовий робочий орган 3 виконано комбінованим, причому в зоні завантаження матеріалу з бункера 1 крок  $T_1$  гвинтового робочого органу 3 є найменшим, а жорсткість  $C_1$  його периферійної поверхні є максимальною. В зоні переходу бункера 1 в направляючий кожух 2 крок  $T_2$  гвинтового робочого органу та жорсткість  $C_2$  його периферійної поверхні є середньою. В зоні транспортування та вивантаження матеріалу крок  $T_3$  гвинтового робочого органу є найбільшим, а жорсткість  $C_3$  його периферійної поверхні є мінімальною. В процесі роботи комбінованого еластичного гвинтового транспортера сипкий матеріал завантажується в бункер 1 і потрапляє на



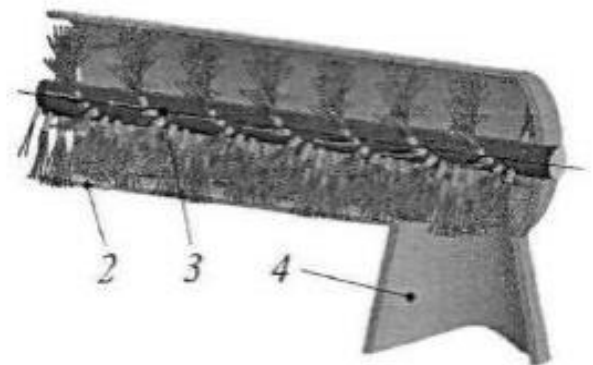
гвинтові витки першої зони гвинтового робочого органу 3 з найменшим кроком  $T_1$  та жорсткістю  $C_1$  його периферійної поверхні, яка є максимальною. Це необхідно для того, щоб сипкий матеріал гарантовано подавався в напрямку транспортування.



a)



б)



в)

Рис. 5.2. Комбінований еластичний гвинтовий транспортер (пат. України № 124326)

В зоні переходу бункера 1 в направляючий кожух 2 крок  $T_2$  гвинтового робочого органу збільшується, а жорсткість  $C_2$  його периферійної поверхні зменшується для забезпечення мінімізації ступеня пошкодження сипкого матеріалу між нерухомими поверхнями бункера 1 та направляючого кожуха 2, а також обертовою поверхнею гвинтового робочого органу. При транспортуванні сипкого матеріалу в направляючому кожусі 2 крок  $T_3$  гвинтового робочого органу є найбільшим, а жорсткість  $C_3$  його периферійної поверхні є мінімальною. В цьому випадку можуть застосовуватись еластичні щіткоподібні

елементи, які розташовані по гвинтовій лінії і забезпечують транспортування сипкого матеріалу з мінімальним їх пошкодженням.

Встановлення еластичних щіток в зоні забору сипкого матеріалу з бункера може призвести до неможливості його подачі в напрямку направляючого кожуха 2, оскільки, під дією вертикального навантаження, еластичні щітки будуть прогинатись, що дасть змогу забезпечити розосередження сипкого матеріалу по внутрішній поверхні направляючого кожуха від дії відцентрових сил. Таким чином, запропонований комбінований еластичний гвинтовий транспортер дає можливість забезпечити гарантоване транспортування сипкого матеріалу без його надмірних пошкоджень.

Окрім шнеків з еластичною щіткоподібною поверхнею нами розроблено і запатентовано ряд шнеків з еластичною поверхнею, що визначаються вищою продуктивністю (як було встановлено за результатами експериментальних досліджень викладеними у четвертому розділі роботи), описи яких наведено нижче.

Так конструкція розробленого еластичного шнека з розрізними пелюстками (пат. України № 143343) [114] рис. 5.4 містить направляючий кожух 1, в якому розташовано центральний вал 2. На валу 2 встановлено несучу смугову спіраль 3, в якій виконані отвори 4 для кріплення еластичних секторів 5.

Поверхня еластичних секторів 5 виступає над поверхнею несучої смугової спіралі 3. Еластичні сектори 5 в нижній частині виконані суцільними з отворами 6 для кріплення, діаметр яких є більшим ніж діаметр отворів 4 смугової спіралі. По периферії еластичні сектори 5 виконані розрізними у вигляді пелюстків 7, причому кут розрізу пелюстків  $\alpha$  спрямований в напрямку транспортування матеріалу. Напрямок транспортування матеріалу на рис. 5.4 показано стрілкою. Зовнішню поверхню кріпильних елементів 8 як зі сторони робочої поверхні шнека, так і з протилежної, виконано напівсферичною. Для запобігання розфіксації кріплення еластичних секторів 5 з несучою смуговою спіраллю 3 з її неробочою поверхнею застосовано граверні шайби 9. В процесі

роботи еластичний шнек переміщує сипкий матеріал в направляючому кожусі 1 в зону його вивантаження.

Запропонована конструкція еластичного шнека з розрізними пелюстками дозволяє мінімізувати пошкодження сипкого транспортованого матеріалу за рахунок виконання периферійної поверхні еластичних секторів розрізними під кутом, який сприяє прогин пелюстків при виникненні заклинення частинок матеріалу між нерухомою внутрішньою поверхнею направляючого кожуха та обертовою поверхнею еластичного шнека.

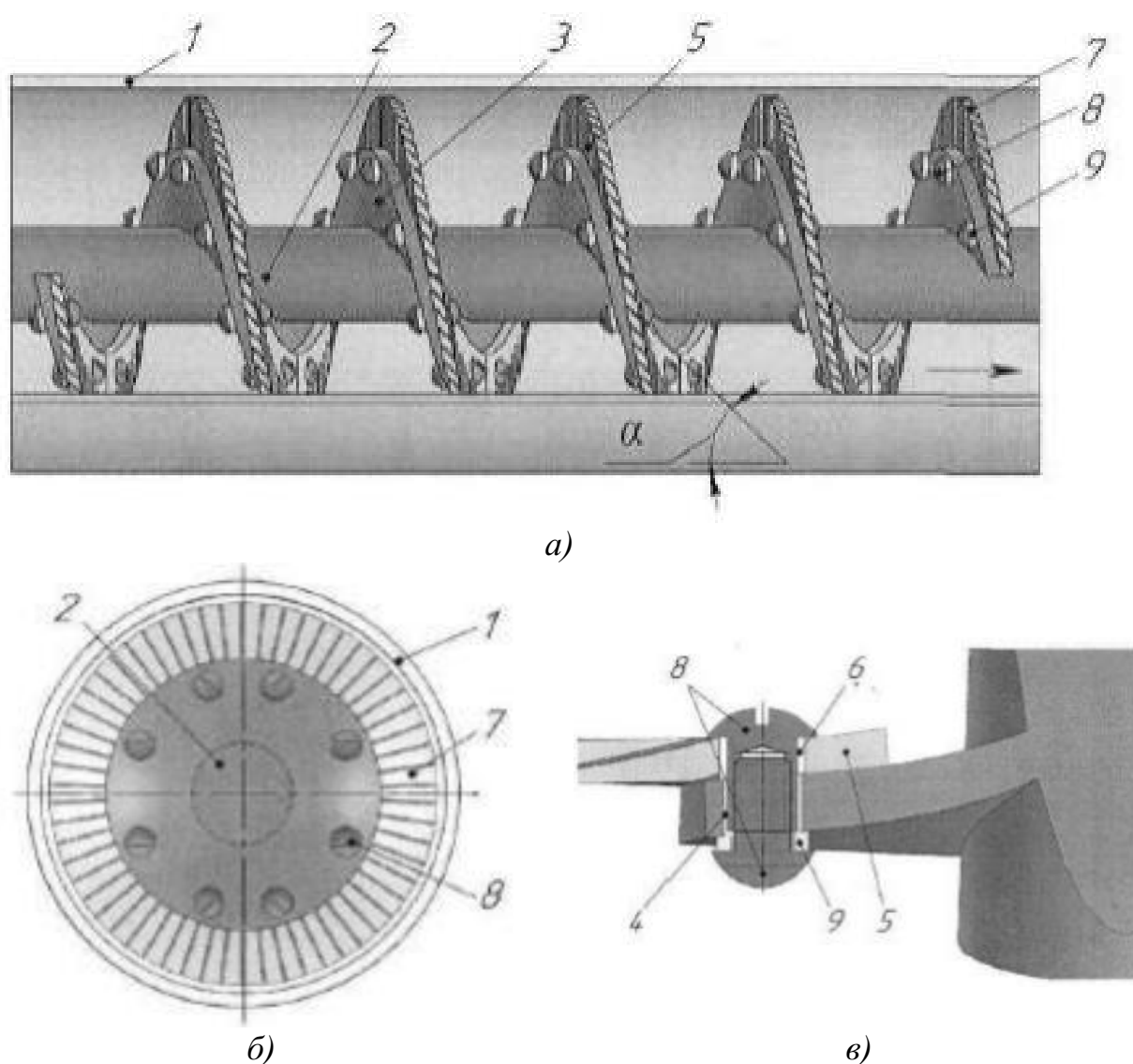


Рис. 5.4. Еластичний шнек з розрізними пелюстками (пат. України № 143343)

Шнек з еластичним камероподібним елементом (пат. України № 150763) [118] рис. 5.5 виконано у вигляді гвинтової спіралі 2, до якої кріпильними

елементами 4 закріплено еластичний камероподібний елемент 3. Гвинтову спіраль 2 жорстко закріплено до пустотілого вала 1.

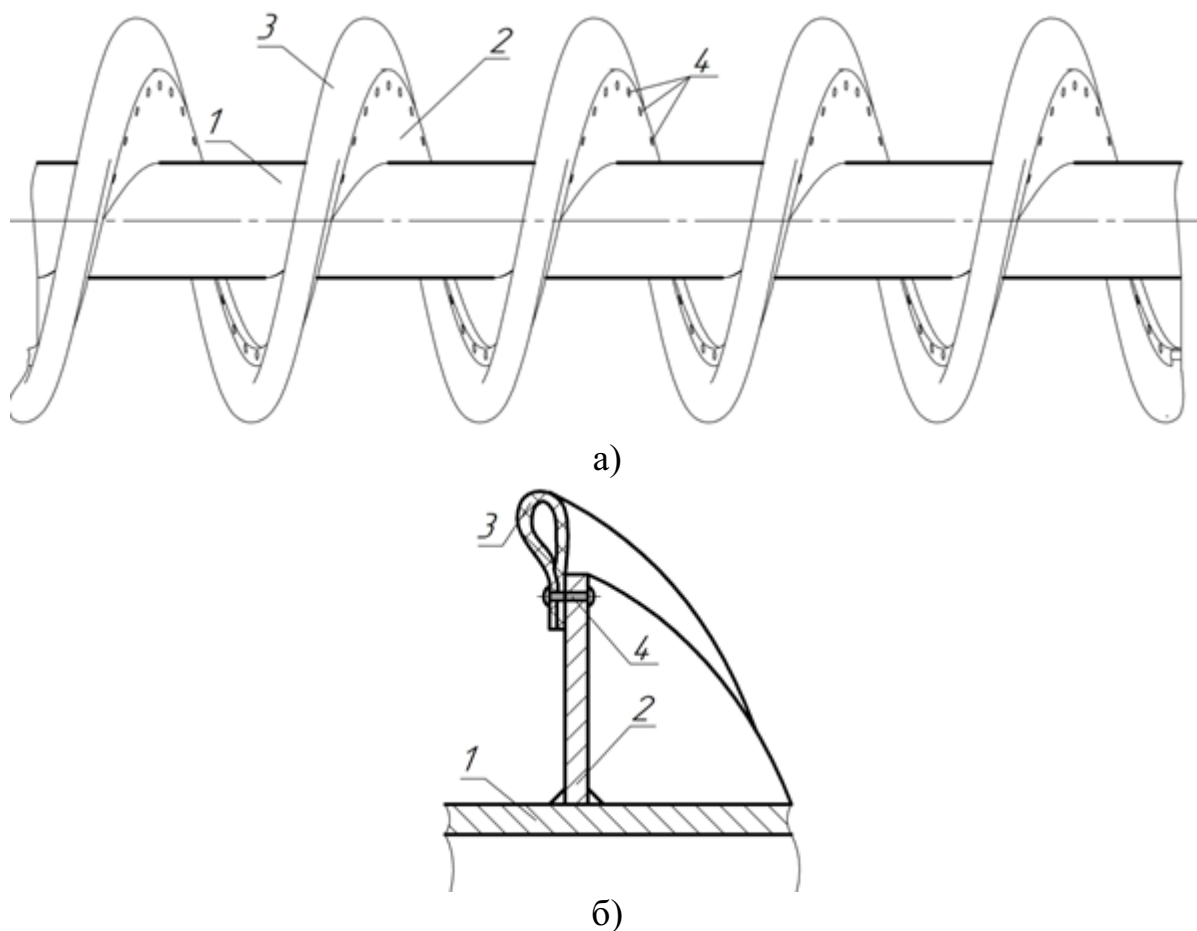


Рис. 5.5. Шнек з еластичним камероподібним елементом (пат. України № 150763)

Працює шнек з еластичним камероподібним елементом наступним чином. Матеріал, що транспортується подається в зону перевантаження на зовнішню поверхню пустотілого вала 1 і за допомогою гвинтової спіралі 2, оснащеною еластичним камероподібним елементом 3, переміщається в зону вивантаження.

До переваг шнека з еластичним камероподібним елементом відноситься надійність конструкції та кріплення еластичних елементів.

Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею (пат. України № 150968) [119] рис. 5.6 виконано у вигляді пустотілого вала 6, в якому по гвинтовій лінії закріплені еластичні елементи 3, які виконано у вигляді еластичної щітки 5 з двотавровою основою 4.

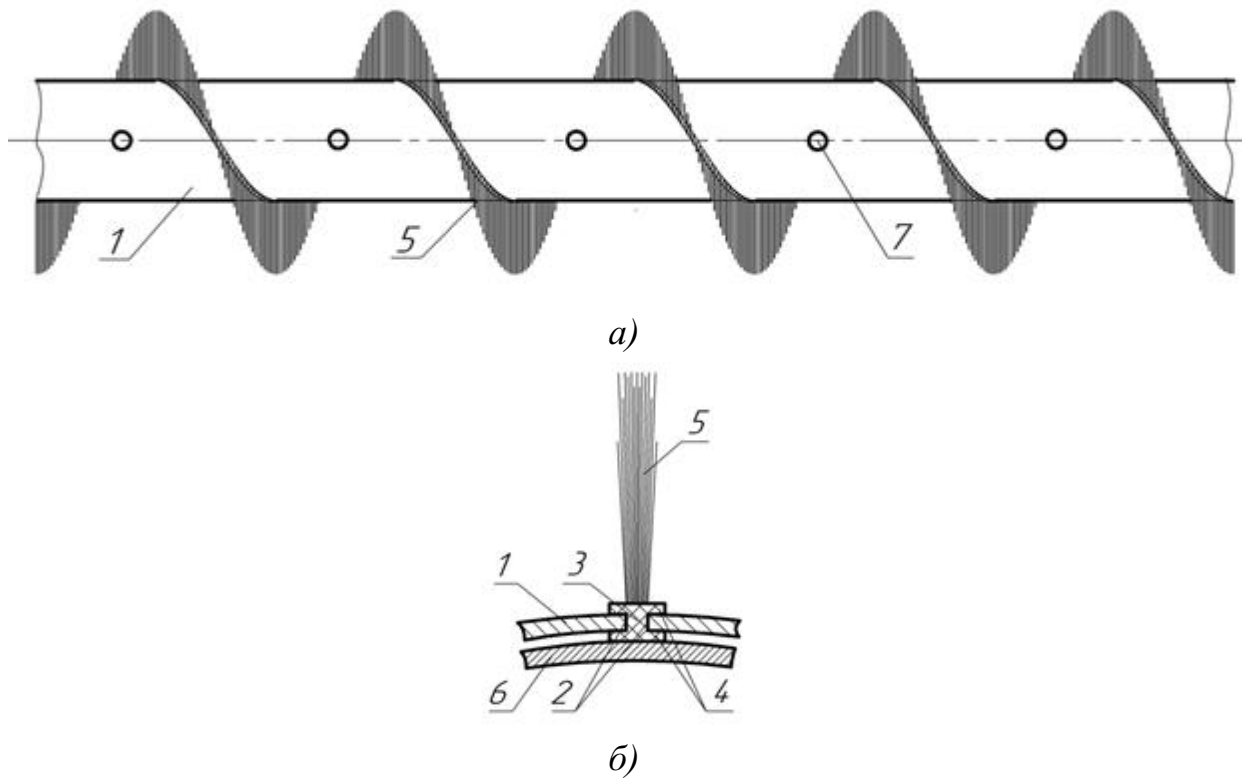


Рис. 5.6. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею (пат. України № 150968)

Двотаврову основу 4 встановлено в гвинтовому повздовжньому отворі 2 циліндричної пустотілої трубки 1. Циліндричну пустотілу трубку 1 жорстко закріплено гвинтами 7 до пустотілого вала 6.

Працює шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею наступним чином. Транспортований матеріал подається в зону перевантаження на зовнішню поверхню циліндричної пустотілої трубки 1 і за допомогою еластичної щітки 5 переміщається в зону вивантаження.

До переваг шнека з еластичною щіткоподібною поверхнею відноситься надійність конструкції та кріплення еластичних елементів, а також можливість одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів.

### **5.3. Обґрунтування техніко-економічної ефективності використання гвинтових робочих органів з еластичними робочими поверхнями**

Через механічне пошкодження зерна при виконанні різноманітних операцій, пов'язаних із збиранням, очищенням, сортуванням, сушінням та

зберіганням, протруюванням, а також його транспортуванням, зменшується валовий збір зерна, погіршуються посівні та продуктивні його якості. При цьому при виконанні зазначених операцій практично завжди використовуються шнеки для його переміщення. Відтак запобігання механічним пошкодженням зерна є актуальне завдання сьогодення. Враховуючи вимогу мінімізація пошкодження при транспортуванні насіннєвих зернових матеріалів, проведемо техніко-економічне обґрунтування ефективності розроблених конструкцій гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями.

Проаналізуємо закупівельні ціни на зерно станом на початок 2022 року (довоєнний період). Так орієнтовна вартість на оптових закупівельних ринках зерна становила:

- пшениця фуражна – 9800 грн./т.;
- пшениця сортова – більше 10000 грн./т.;
- ячмінь фуражний – 8000 ... 8500 грн./т.;
- ячмінь сортовий – більше 8500 грн./т.;
- кукурудза – від 7400 грн./т.

Вартість насіннєвих зернових є більшою мінімум на 50 % від представлених цін.

Враховуватимемо той факт, що фермерські господарства використовують одні і ті ж шнекові завантажувачі для транспортування різних видів зернових (горох, кукурудза, пшениця тощо), не маючи можливості забезпечити регулювання зазору між гвинтовим робочим органом та кожухом для мінімізації травмування. Відтак таке пасивне регулювання зазору якраз і забезпечується еластичною периферійною частиною у гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею (рис. 5.1), що сприяє зменшенню травмування зерна при перевантаженні [143, 178].

Також враховуючи ті факти, що посівні площі під зернові фермерського господарства в Україні становлять 50-300 га, а загальні втрати з кожного гектара посіву зернових унаслідок сівби травмованим насінням згідно [48] становлять 2–3 ц (приймаємо 2,5 ц), то орієнтовні втрати господарства, якщо посівні площі під пшеницю, ячмінь та кукурудзу взяти у рівних частках по 20

га, станом на початок 2022 року становитимуть щонайменше 15,0 т зерна щорічно (табл. 5.1). З них на перевантажування традиційними шнеками (з врахуванням травмування зерна шнековими транспортерами - 4,7% [48]) орієнтовно припадає 0,7605 тонни, або 5,98 тис. грн.

Таблиця 5.1

Орієнтовні втрати фермерського господарства внаслідок сівби травмованим насінням на початок 2022 року

	Втрати зерна у натуральному та грошовому виразі на 1 га		Річні втрати зерна фермерського господарства у натуральному та грошовому виразі	
	тонн	тис. грн.	тонн	тис. грн.
Пшениця	0,25	2,45	5,0	49,0
Ячмінь	0,25	2,06	5,0	41,2
Кукурудза	0,25	1,85	5,0	37,0
Разом	-	-	15,0	127,2

Враховуючи особливості виготовлення гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею, які були розкриті у попередньому розділі роботи [9], відомо, що поряд з технологічним процесом виготовлення традиційних гвинтових робочих органів їх виготовлення є складнішим і передбачає окрім традиційних операцій (навивання, калібрування, зварювання) виконання додаткових, які забезпечують виготовлення на периферійній частині гвинтових робочих органів еластичної поверхні.

Нами проведемо аналіз вихідних даних до процесу виконання додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею і результати щодо цих даних представлено у табл. 5.2 (для параметрів:  $L = 4$  м;  $D = 96$  мм;  $T = 80$  мм). Ці дані є порівняльними і можуть змінюватись залежно від зміни діаметрів, кроку шнеків тощо. Також слід відмітити, що при аналізі процесу виготовлення еластичного гвинтового робочого органу з кріпленням еластичного елемента на торцевій поверхні спіралі (секційних, з периферійною щіткоподібною частиною (рис. 5.1), із суцільним камероподібним елементом (рис. 5.5)) нами не розглядалась

індивідуальна технологія виготовлення окремих цих елементів, оскільки вона є досить подібною і включає операції нарізання елементів та виконання на їх поверхнях отворів.

Проведемо розрахунок окремих видів витрат на виконання додаткових операцій у процесах виготовлення гвинтових робочих органів з щіткоподібним елементом та із кріпленням еластичного елемента на торцевій поверхні спіралі.

Таблиця 5.2

Вихідні дані до процесу виконання додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями

Еластичний гвинтовий робочий орган з щіткоподібними елементами (варіант 1)	Еластичний гвинтовий робочий орган з кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі (варіант 2)
1	2
1. Операція свердління отворів в пустотілому валу:	1. Операція свердління отворів на торцевій поверхні навитої щільним пакетом на ребро спіралі:
- обладнання: верстат вертикально-свердлильний 2С132 (сумарна потужність електродвигунів встановлених на верстаті 4,12 кВт)	- обладнання: верстат вертикально-свердлильний 2С132 (сумарна потужність електродвигунів встановлених на верстаті 4,12 кВт)
- вартість обладнання (б/к) - 37 тис. грн.	- вартість обладнання (б/к) - 37 тис. грн.
- розряд робітника - 4	- розряд робітника - 4
- тривалість операції (5 отв. на 1 крок по 8 с) - 2000 с. (0,56 год.)	- тривалість операції (8 отв. по 8 с) - 64 с. (0,02 год.)
2. Операція закріплення пустотілих циліндричних втулок в отворах пустотілого вала:	2. Операція нарізання еластичних елементів відповідної форми:



Закінчення таблиці 5.2

1	2
- оснащення: прес гідравлічний настільний 10т ТУ10003 TORIN	- інструмент: ножиці ручні гільйотинні 90/125 мм
- вартість оснащення – 16,6 тис. грн.	- вартість інструменту – 1,45 тис. грн.
- розряд робітника - 2	- розряд робітника - 2
- тривалість операції - (250 втулок по 6 с) - 1500 с. (0,42 год.)	- тривалість операції - (від 20 хв. до 60 хв. залежно від конфігурації еластичного елемента) - 2400 с. (0,67 год.)
3. Операція нарізання еластичних щіткоподібних елементів:	3. Операція пробивання отворів в еластичних елементах:
- інструмент: ножиці ручні гільйотинні 90/125 мм	- інструмент: пробійник круглих отворів TOPEX 3-12 мм
- вартість інструменту – 1,45 тис. грн.	- вартість інструменту – 0,5 тис. грн.
- розряд робітника - 2	- розряд робітника - 2
- тривалість операції - (20 хв.) - 1200 с. (0,33 год.)	- тривалість операції - 600 с. (0,17 год.)
4. Операція закріплення в пустотілих циліндричних трубках еластичних щіток:	4. Операція закріплення еластичних елементах в отворах торцевої поверхні спіралі:
- інструмент: кліщі затискні УАТО УТ-2449	- інструмент: ключ заклепувальний Montero для люверсів 11822
- вартість інструменту – 0,3 тис. грн.	- вартість інструменту – 0,13 тис. грн.
- розряд робітника - 2	- розряд робітника - 2
- тривалість операції - (500 затисків) - 35000 с. (0,97 год.)	- тривалість операції - (20 хв.) - 1200 с. (0,33 год.)

Витрати на заробітну плату робітника, зайнятого виконанням операцій, з врахуванням єдиного соціального внеску (0,22) визначатимуться за формулою [22]:

$$Z = \sum T_i \cdot T_{c1} \cdot K_i \cdot K_n, \quad (5.1)$$

де  $Z$  - затрати на зарплату робітника;  $T_i$  - трудомісткість  $i$ -ї операції чи переходу, год.;  $T_{c1}$  - величина тарифної ставки 1-го розряду (з 01.10.2022 року мінімальна заробітна плата становить 6700,0 грн.;  $6700,0 / (21 \cdot 8) = 39,88$  грн.);  $K_i$  - тарифний коефіцієнт  $i$ -го розряду ( $K_1 = 1,09$ ;  $K_2 = 1,35$  [22]);  $K_n$  – коефіцієнт,

що враховує єдиний соціальний внесок  $K_n = 1,22$  (згідно закону України № 1774-VIII ЄСВ становить 0,22%).

Витрати на заробітну плату для додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами складуть:

$$З_1 = (0,56 \cdot 1,35 + (0,42 + 0,33 + 0,97) \cdot 1,09) \cdot 39,88 \cdot 1,22 = 128,0 \text{ грн.}$$

Витрати на заробітну плату для додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі складуть:

$$З_2 = (0,02 \cdot 1,35 + (0,67 + 0,17 + 0,33) \cdot 1,09) \cdot 39,88 \cdot 1,22 = 128,0 = 63,36 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію при вказаних параметрах визначатимуться за формулою [22]:

$$EE = \sum T_i \cdot C_{ел.ен} \cdot B_{кгод}, \quad (5.2)$$

де  $C_{ел.ен}$  – ціна 1 кВт/год. електроенергії (тариф на електроенергію для побутових споживачів з 01.10.2022 року II клас – 491,473 коп./кВт.год.);  $B_{кгод}$  – приведений обсяг споживання електроенергії обладнанням при виконанні операції чи переходу, кВт/год.

Витрати на електроенергію для додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами складуть:

$$EE_1 = 0,56 \cdot 4,91 \cdot 4,12 = 11,33 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію для додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі складуть:

$$EE_2 = 0,02 \cdot 4,91 \cdot 4,12 = 0,03 \text{ грн.}$$

Затрати на амортизацію обладнання (при використанні в одну зміну), при обробленні одиниці продукції, визначаємо з залежності [22]:

$$A = B_o \cdot K_a \cdot \Sigma T_i / T_d, \quad (5.3)$$

де  $B_o$  - вартість обладнання, яке використовується в процесі, грн.;  $K_a$  - коефіцієнт амортизації, 0,2;  $T_d$  - дійсний час роботи обладнання протягом року, 2070 год.

Витрати на амортизацію обладнання для додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами складуть:

$$A_1 = 0,56 \cdot 37000 \cdot 0,2 / 2070 = 2,0 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію обладнання при виготовленні гвинтових робочих органів із кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі складуть:

$$A_2 = 0,02 \cdot 37000 \cdot 0,2 / 2070 = 0,07 \text{ грн.}$$

Провівши відповідні розрахунки за елементами витрат для додаткових операцій при виготовленні гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями їх результати відобразимо в таблиці 5.3. При цьому врахуємо вартість додаткових елементів, які необхідні для створення еластичних поверхонь, а також загальновиробничі (200% від основної заробітної плати основних робітників) та адміністративні витрати (40% від основної заробітної плати основних робітників) [22].

При виготовленні гвинтового робочого органу із щіткоподібним елементом довжиною  $L = 4$  м з кроком  $T = 80$  мм використовуються 250 циліндричних втулок за ціною 1,87 грн., а також еластичні щітки за ціною 0,22 грн. за пучок. При виготовленні гвинтового робочого органу з кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі вартість цих елементів із врахуванням кріпильних елементів (заклепок, гвинтів тощо) залежності від

виду та якості коливатиметься від 140 до 1190 грн. (приймаємо середнє значення у 665 грн.)

Таблиця 5.3

Розрахунок витрат на виготовлення еластичних поверхонь гвинтових робочих органів

Елементи витрат	Еластичний гвинтовий робочий орган з щіткоподібними елементами, грн.	Еластичний гвинтовий робочий орган з кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі, грн.
Витрати на матеріали	522,5	665,0
Затрати на зарплату	128,0	63,36
Витрати на електроенергію	11,33	0,03
Витрати на амортизацію обладнання	2,0	0,07
Загальнозаводські витрати	256,0	126,72
Адміністративні витрати	51,2	25,34
Всього витрат	971,03	880,52

Проведемо розрахунок річного економічного ефекту. Враховуючи те, що орієнтовні втрати фермерського господарства при використанні традиційних перевантажувальних шнеків на початок 2022 року, за підрахунками викладеними вище, становили 0,7605 тонни, або 5,98 тис. грн., а також те, що травмування зернового матеріалу при його переміщенні шнеком з щіткоподібним елементом є нижчим більше ніж 4,5 рази за його травмування при використанні жорсткого шнека, і нижчим в 4,06... 4,32 рази при застосуванні еластичних гвинтових робочих органів з кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі [178], річний економічний ефект від застосування таких шнеків становитиме:

1. Орієнтовний річний економічний ефект для фермерського господарства при використанні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами у порівнянні з традиційними:

$$E_1 = 5980,0 \cdot (1 - 1/4,5) - 971,03 = 3680,08 \text{ грн.}$$

2. Орієнтовний річний економічний ефект для фермерського господарства при використанні гвинтових робочих органів із кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі у порівнянні з традиційними:

$$E_2 = 5980,0 \cdot (1 - 1/4,06) - 880,52 = 3626,57 \text{ грн.}$$

Виходячи з проведених розрахунків, видно, що більший економічний ефект за рахунок зниження травмування зернових одержується при використанні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами. За розрахунками орієнтовний річний економічний ефект для фермерського господарства при використанні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами у порівнянні з традиційними становить 3680,08 грн. (станом на 01.2022 р.) і 3626,57 грн. при використанні гвинтових робочих органів із кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі. Проте враховуючи те, що гвинтові робочі органи із кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі забезпечують значно вищу продуктивність у порівнянні з шнеком з щіткоподібним елементом (у 1,34...1,5 рази) [178], то їх застосування можна вважати більш пріоритетним.

#### **5.4. Висновки**

1. Розглянуто параметри забезпечення технологічності конструкцій та способи виготовлення гвинтових робочих органів з еластичною робочою поверхнею, зокрема із щіткоподібною еластичною поверхнею та з еластичними елементами на торцевій поверхні спіралі шнека. Зазначено, що на відміну від звичайних гвинтових робочих органів технологія їх виготовлення є значно складнішою і передбачає окрім традиційних операцій виконання додаткових, пов'язаних із створенням на периферійній частині шнека еластичної поверхні.

2. Представлено нові конструкції гвинтових конвеєрів оснащених гвинтовими робочими органами із еластичними поверхнями, що забезпечують зменшення ступеня пошкодження насінневого зернових матеріалів при транспортуванні порівняно із жорсткими шнеками і на які одержано патенти України на корисні моделі.

3. Проведено обґрунтування техніко-економічної ефективності використання гвинтових робочих органів з щіткоподібною еластичною робочою поверхнею, враховуючи вимогу мінімізація пошкодження при транспортуванні насінневих зернових матеріалів. Прогнозований річний економічний ефект для фермерського господарства при використанні гвинтових робочих органів із щіткоподібними елементами у порівнянні з традиційними становить 3680,08 грн., а при використанні гвинтових робочих органів із кріпленням еластичних елементів на торцевій поверхні спіралі - 3626,57 грн. (станом на 01.2022 р.). Проте враховуючи те, що останні забезпечують значно вищу продуктивність у порівнянні з шнеком з щіткоподібним елементом (у 1,34...1,5 рази), то їх застосування можна вважати більш пріоритетним.

4. Розроблені конструкції гвинтових конвеєрів оснащених гвинтовими робочими органами із еластичними поверхнями та інших видів гвинтових конвеєрів захищені 9-ма патентами України на корисні моделі, а гвинтовий конвеєр з еластичною щіткоподібною поверхнею, що виготовлений на основі патенту України № 150968, пройшов успішні промислові випробування у Селянському фермерському науково-виробничому господарстві «Коваль». Річний економічний ефект від використання дослідного зразка склав 6870 грн.

## ВИСНОВКИ

1. У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове технічне забезпечення вирішення наукового завдання, яке полягає в зниженні ступеня пошкодження насінневих зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами шляхом розроблення нових змінних гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями і вибору раціональних конструктивних параметрів та режимів їх роботи.

2. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження деформації волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів при транспортуванні зернового матеріалу. Виведено диференціальне рівняння для середньої лінії деформації декількох волокон еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів горизонтального та полого нахилоного гвинтового конвеєра із тихохідним режимом роботи під час транспортування сипкого матеріалу при коефіцієнті завантаження до 0,45. На основі проведеного розв'язку диференціального рівняння встановлено, що при зменшенні діаметра волокна від 2,3 мм до 1,7 мм для однакових зовнішніх навантажень відбувається деформація волокон на величину 5 мм. При збільшенні робочої частини волокон від 20 мм до 40 мм для однакових зовнішніх навантажень відбувається деформація волокон на величину 8,6 мм. Відтак використання волокон із більшою довжиною робочої частини знижує навантажувальну здатність еластичного щіткоподібного шнека, проте призводить до зменшення величини травмування насінневого зернового матеріалу, що транспортується.

3. Проведено теоретичні дослідження параметрів взаємодії волокон еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу із зерновим матеріалом; виведено рівняння рівноваги зернини в початковий момент їх контакту та визначено кут контакту. Виведено рівняння для знаходження допустимого зовнішнього навантаження  $P$  на зернину в напрямку перпендикулярному виткам гвинтового робочого органу, при якому величина прогину волокон не перевищує граничної величини, за якої забезпечується транспортування зернового матеріалу. Збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  між

зерниною та волокном та  $\mu_2$  між зерниною та кожухом зумовлює зростання навантаження  $P$ . Так, для  $\mu_1=\mu_2=0,2$  точка перегину визначається кутом  $\alpha=35$  град., для  $\mu_1=\mu_2=0,4$  – кутом  $\alpha=50$  град., а при куті  $\alpha=90$  град. на зернину діють тільки сили тертя.

4. Визначено умову защемлення зернини між волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу та внутрішньою поверхнею кожуха. Встановлено, що збільшення кута  $\alpha$  контакту між зерниною та волокном та відстані  $l_1$  між центрами волокон круглого поперечного перерізу призводить до збільшення ймовірності защемлення зернини між волокнами еластичного щіткоподібного гвинтового робочого органу. Для коефіцієнта тертя між зерниною та волокном  $\mu_1 < 0,5$  кут  $\alpha$  знаходиться в межах від 50 град. до 90 град., а відстань  $l_1$  від 4 мм до 5 мм при радіусі зернини 2 мм. Визначено критичний кут  $\alpha$ , при яких відбувається защемлення зернини, й встановлено, що збільшення коефіцієнтів тертя  $\mu_1$  та  $\mu_2$  призводить до зменшення кута  $\alpha$ . При коефіцієнті тертя  $\mu_1=0,5$  кут  $\alpha$  знаходиться в межах від 52...64 град. до 90 град. для різних значень коефіцієнта тертя  $\mu_2$ . Встановлено співвідношення зазору між волокнами та діаметром зернини, при яких можливе защемлення зернини, з якого випливає, що чим більший коефіцієнт тертя  $\mu_1$ , тим менше таке співвідношення. Так для коефіцієнта тертя  $\mu_1=0,5$  защемлення зернини можливе при співвідношенні зазору до діаметра зернини від 0,75, а для  $\mu_1=0,3$  – від 0,89.

5. Представлено результати експериментальних досліджень продуктивності гвинтових конвеєрів із трьома типами гвинтових робочих органів з еластичними поверхнями: суцільною камероподібною частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, з щіткоподібною гвинтовою частиною. Встановлено, що:

- продуктивність під час транспортування гвинтовим робочим органом з еластичною суцільною камероподібною частиною складала: для ячменю максимальна - 6,37 т/год., а мінімальна – 3,98 т/год.; для кукурудзи максимальна - 6,67 т/год., а мінімальна – 4,18 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органу  $n$  від 284 об/хв. до 511,2 об/хв.



призводить до зростання продуктивності в 1,29 рази. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,11 рази, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,12 рази;

- продуктивність під час транспортування гвинтовим робочим органом з периферійною еластичною щіткоподібною частиною складала: для ячменю максимальна - 6,61 т/год, а мінімальна – 3,49 т/год.; для кукурудзи максимальна - 6,92 т/год, а мінімальна – 3,84 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до оптимальної частоти обертання призводить до зростання продуктивності в 1,25 рази для ячменю (від 430 до 440 об/хв.) та в 1,22 рази для кукурудзи (від 450 до 480 об/хв.);

- продуктивність під час транспортування гвинтовим робочим органом з щіткоподібною гвинтовою частиною складала: для ячменю максимальна - 4,37 т/год, а мінімальна – 1,77 т/год.; для кукурудзи максимальна - 5,25 т/год, а мінімальна – 2,56 т/год. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа  $n$  від 284 об/хв. до 470...480 об/хв. призводить до зростання продуктивності в 1,25 рази. При цьому збільшення діаметра кожуха від 96 мм до 108 мм забезпечує зростання продуктивності в 1,36 рази для ячменю та в 1,29 рази для кукурудзи, а зміна кута нахилу конвеєра від 0 град до 30 град. призводить до спадання продуктивності в 1,54 рази для ячменю та в 1,36 рази для кукурудзи.

6. Встановлено, що максимальна величина ступеня пошкодження зерна кукурудзи при транспортуванні гвинтовими робочими органами з еластичними суцільними камероподібними частинами складала 0,26%, при транспортуванні гвинтовими робочими органами з периферійною еластичною щіткоподібною частиною - 0,25%, а при транспортуванні гвинтовими робочими органами з гвинтовими робочими органами з щіткоподібною гвинтовою частиною - 0,24%. Травмування кукурудзи при її переміщенні шнеками з суцільним камероподібним елементом та периферійною еластичною щіткоподібною частиною є нижчою в 4,06... 4,32 рази, а при використанні шнека з щіткоподібним елементом є нижчою в 4,5 рази, ніж при використанні

звичайних жорстких шнеків. Збільшення частоти обертання гвинтового робочого органа *n* від 284 об/хв. до 511,2 об/хв. призводить до зростання ступеня пошкодження зерна кукурудзи в 1,55 рази.

7. Проведено структурний синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями з метою пошуку конструктивних рішень для зменшення пошкодження зернових матеріалів при транспортуванні гвинтовими конвеєрами у порівнянні із традиційними жорсткими шнеками. Одержано декілька конструкцій гвинтових робочих органів, що відповідають меті синтезу, на які одержано патенти України на корисні моделі, зокрема із щіткоподібною гвинтовою частиною, з периферійною еластичною щіткоподібною частиною, із суцільною камероподібною частиною. Розроблені конструкції гвинтових конвеєрів оснащених гвинтовими робочими органами із еластичними поверхнями та інших видів гвинтових конвеєрів захищені дев'ятьма патентами України на корисні моделі, а гвинтовий конвеєр з еластичною щіткоподібною поверхнею, що виготовлений на основі патенту України № 150968, пройшов успішні промислові випробування у Селянському фермерському науково-виробничому господарстві «Коваль». Річний економічний ефект від використання дослідного зразка склав 6870 грн.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Альбота Д. С., Бодак М. В., Дідух В.Ф. Обґрунтування конструкції підбирача валків льону олійного для роздільної технології. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2022. Вип. 48. С. 30-37.
2. Барановський В. М., Соломка В. О., Онищенко В. Б. Вибір параметрів при конструюванні гвинтового конвеєра. *Вісник Харківського дер. техн. ун-ту сільського господарства*. Харків, 2001. Вип. 8. Т. 2. С. 209-215.
3. Богацький В. М. Удосконалення конструкції та обґрунтування параметрів шнекового дозатора порошкових реагентів для позапічної обробки сталі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.08. Донецьк, 2004. 18 с.
4. Бойко А. І., Куликівський В. Л. Аналіз конструкцій гвинтових транспортерів та живильників зерноочисних машин. *Вісник Харківського нац. техн. ун-ту сільського господарства ім. П. Василенка*. Харків, 2011. Вип. 93. Т. 1. С. 199-205.
5. Бойко А. І., Савченко В. М., Куликівський В. Л. Визначення зусиль, що діють на периферійну частину витка шнека. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2011. Вип. 21. Т. 1. С. 15-26.
6. Василенко П. М., Василенко И. И. Механизация и автоматизация процессов приготовления и дозирования кормов. М. : Агропромиздат, 1985. 224 с.
7. Василенко П. М., Погорелый Л. В. Основы научных исследований. К. : Вища школа, 1985. 266 с.
8. Василенко П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. К. : УСХА, 1960. 216 с.
9. Васильків В. В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.02.08. Львів, 2015. 47 с.
10. Гевко Ів. Б., Паливода Ю. Є., Скиба О. П., Дубиняк Т. С. та ін. Взаємозв'язок конструктивних характеристик гвинтових і захисних механізмів від характеру навантаження. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. Рівне, 2016. № 3 (75).

С. 257–266.

11. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Є., Любачівський Р. О., Грудовий Р. С. Визначення динамічних навантажень у гвинтових змішувачах. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник*. Луцьк, 2013. Вип. 40. С. 214-220.

12. Залуцький С. З., Гладь Ю. Б., Гевко Р. Б., Погріщук Б. В. Визначення зусиль деформації еластичної лопаті шнека при її взаємодії із зерновим матеріалом. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2017. № 2. С. 13–19.

13. Вітровий А. О. Обґрунтування параметрів технологічного процесу роботи модульного гвинтового агрегату : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 1999. 20 с.

14. Гевко Б. М., Рогатынский Р. М.. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин. Львів : Вища школа, 1989. 176 с.

15. Гевко Б. М., Дячун А. Є., Грудовий Р. С., Гевко І. Б. Дослідження кінематики зернового вантажу у конвеєрі із шнеком з поступово зростаючим кроком витків у напрямку руху вантажу. *Сільськогосподарські машини* : зб. наук. ст. Луцьк, 2013. Вип. 26. С. 3-12.

16. Гевко Б. М., Рогатынский Р. М. Оптимизация конструктивных параметров шнековых конвейеров. *Изв. вузов машиностроения*. М. : Машиностроения, 1987. № 5. С. 109-114.

17. Гевко Б., Ляшук О., Дячун А. Результати експериментальних досліджень величини травмування зерна під час транспортування трубчастим скребковим конвеєром. *Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження*. Львів : Львів. нац. агроуніверситет, 2013. № 17. С. 187-193.

18. Гевко Б. М., Мельничук А. Л., Шуст І. М. Дослідження технологічного процесу транспортування сипких матеріалів широко-універсальним шнековим транспортером. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Т. : ТНТУ, 2015. Т. 79. № 3. С. 143-148.

19. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання. Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 307 с.

20. Гевко І. Б. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.02.02. Львів, 2013. 42 с.
21. Гевко І. Б. Операційний менеджмент: навч. посіб. К. : Кондор, 2005. 228 с.
22. Гевко І. Б., Оксентюк А. О., Галуцзяк М. П. Організація виробництва: теорія і практика: підручник. К. : Кондор, 2008. 178 с.
23. Гевко І. Б. Розробка і дослідження низькочастотних пристроїв для виконання технологічних процесів гнучкими гвинтовими конвеєрами : автореф. дис. .... канд. техн. наук: 05.20.01. Луцьк, 1997. 18 с.
24. Гевко І., Дячун А., Грудовий Р. Дослідження моменту інерції гвинтових транспортерів. *Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження*. Львів : Львів. нац. агроуніверситет, 2012. № 16. С. 201-211.
25. Гевко І. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ*. Тернопіль, 2011. Т. 16. № 1. С. 69-77.
26. Гевко І., Любачівський Р., Дячун А. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. *Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження*. Львів : Львів. нац. агроуніверситет, 2012. № 16. С. 237-246.
27. Гевко І.Б., Гевко Б.М. Управління процесом розробки і освоєння виробництва нових виробів: підручник. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2015. 199 с.
28. Гевко І.Б., Вітровий А.О., Гурик О.Я. Динамічна модель процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2001. Вип. 8. С. 72-82.
29. Гевко Ів. Б., Дячун А. Є., Тарасюк Ю. М. Результати експериментальних досліджень якості змішування кормових сумішей гвинтовим транспортером-змішувачем. *Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету*. Житомир, 2014. № 2 (45), Т. 4, Ч. 1. С. 308-315.

30. Гевко Ів. Б., Дячун А. Є., Любачівський Р. О. Структурний синтез гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями методом морфологічного аналізу. *Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт*. Севастополь, 2012. Вип. 128. С. 37-41.
31. Гевко Ів., Дячун А., Любачівський Р. Розширення технологічних можливостей гвинтових конвеєрів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2012. № 3(67). С. 143–150.
32. Гевко Ів.Б., Ляшук О.Л., Дячун А.Є. Результати експериментальних досліджень гнучких гвинтових конвеєрів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. Вінниця: ВНАУ, 2013. Вип. 2 (79). С. 17 – 24.
33. Гевко Р. Б., Вітровий А. О., Пік А. І. Підвищення технічного рівня гнучких гвинтових конвеєрів. Тернопіль, 2012. 204 с.
34. Гевко Р. Б., Залуцький С. З., Гевко М. Р. Розробка конструкції та технологія виготовлення шнекового робочого органу з еластичною. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2014. № 1. С. 152–159.
35. Гевко Р. Б., Залуцький С. В. Напрямки зниження пошкодження сипких матеріалів при їх транспортуванні гвинтовими робочими органами конвеєра. *Збірник наукових статей «Сільськогосподарські машини»*. Луцьк, 2014. Вип. 24. С. 75–81.
36. Гевко Р. Б., Залуцький С. З. Розробка конструкції шнека з еластичною гвинтовою поверхнею та результати її експериментальних досліджень. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2015. № 1. С. 241–246.
37. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є., Вар'ян А.Р., Мельничук А.Л., Шуст І.М. Генерування конструкцій гвинтових механізмів методом морфологічного аналізу з ієрархічним групуванням. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10. С. 186-192.
38. Герман Х. Шнековые механизмы в технологии ФРГ. Л. : Машиностроение, 1975. 230 с.
39. Герук С. М., Дячун А. Є., Грудовий Р. С. Дослідження енергосилових параметрів конвеєра із шнеком з поступово зростаючим кроком

витків у напрямку руху вантажу. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха, 2014. Вип. 99. Т. 1. С. 297-312.

40. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження / [І. Б.Гевко, Р. Я.Лещук, В. З.Гудь та ін.]. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.

41.Гевко Б. М., Любачівський Р. О., Дячун А. Є. Динамічна модель приводу гвинтового змішувача вібраційного. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник*. Луцьк, 2011. Вип. 30. С. 27-31.

42. Григорьев А. М. Винтовые конвейеры. М. : Машиностроение, 1972. 184 с.

43. Грудовий Р., Дячун А., Гевко І. Дослідження кінематики руху сипкого вантажу у гвинтовому еліптичному змішувачі. *Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження*. Львів, 2012. № 16. С. 194-201.

44. Грудовий Р. С., Герук С. М., Дячун А. Є. Дослідження енергосилових параметрів конвеєра із шнеком з поступово зростаючим кроком витків у напрямку руху вантажу. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха, 2014. Вип. 99. Т. 1. С. 297-312.

45. Гудь В. З. Механіко-технологічні основи розробки багатофункціональних секційних шнеків для зернового матеріалу: дис. ... докт. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2021. 410 с.

46. Гурик О. Я. Обґрунтування параметрів транспортерів-змішувачів сипких матеріалів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2003. 20 с.

47. Дерев'янюк Д. А. Дослідження показників якості насіннєвого матеріалу озимої пшениці під час збирання, післязбирального обробітку і посіву. *Техніка і технології АПК*. 2011. № 6. С. 34–36.

48. Дерев'янюк Д. А. Механіко-технологічне обґрунтування процесів зниження травмування насіння зернових культур технічними засобами: дис. ... докт. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2018. 475 с.

49. Дерев'янюк Д. А. Травмування зерна внаслідок дії внутрішніх і

зовнішніх чинників на якість насіння і зернофуражу. *Зб. наук. пр. КНТУ.*

2011. Вип. 24. С. 184–187.

50. Дідух В. Ф., Сацюк В. В. Вплив процесу змішування на якість гранульованих органо-мінеральних добрив. *Сільськогосподарські машини.* Луцьк, 1999. Вип. 5. С. 89–92.

51. Дідух В.Ф., Буснюк В.В., Бодак М.В. Обґрунтування обладнання для збирання льону олійного зернозбиральним комбайном. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки».* Кропивницький, 2022. №5(36). С. 226-235.

52. Дмитрів Д. В. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів малогабаритних кормозмішувачів: дис. ... кандидата техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2001. 179 с.

53. Станько А. І., Дячун А. Є., Головатий І. В. Дослідження деформації еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів для транспортування сипких матеріалів. *Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. “Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики”:* присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибачка Тимофія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин (Тернопіль, 29-30 вересня 2022 р.). Тернопіль, 2022. С. 177.

54. Дячун А.Є., Чвартацький Р.І., Мельничук С.Л., Маруніч О.П. Дослідження кінематики вантажу у середньошвидкісному гвинтовому конвеєрі-змішувачі із осьовим коливанням шнека. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК».* Вінниця, 2017. №1(96). С. 181-186.

55. Гевко Б. М., Дячун А. Є., Грудовий Р. С. , Гевко І. Б. Дослідження кінематики зернового вантажу у конвеєрі із шнеком з поступово зростаючим кроком витків у напрямку руху вантажу. *Сільськогосподарські машини* : зб. наук. ст. Луцьк, 2013. Вип. 26. С. 3-12.

56. Дячун А.Є., Ляшук О.Л., Котик Р.М., Михайлюк В.П., Гандзій В.С. Дослідження кінематики сипкого матеріалу у гвинтовому конвеєрі-змішувачі із



обертвовим кожухом та гофрованим шнеком. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків, 2019. Вип. 198. С. 233-243.

57. Рогатинський Р.М., Гевко Ів.Б., Дячун А.Є., Вар'ян А.Р., Мельничук А.Л. Дослідження продуктивності гвинтового конвеєра з обертвовим кожухом. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні системи і технології тваринництва*. Харків, 2017. Вип. 181. С. 285-293.

58. ДСТУ 2672-94. Конвеєри гвинтові. Загальні технічні вимоги. К.: Держстандарт України, 1994. 10 с.

59. ДСТУ 3768:2009. Пшениця. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2009. 12 с.

60. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. К.: Ред.-вид. відділ УкрНДІССІ, 2003. 172 с.

61. ДСТУ 4397:2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. К.: Держспоживстандарт України, 2005. 15 с.

62. Душинський В. В. Основи наукових досліджень. Теорія та практикум з програмним забезпеченням: навчальний посібник. К.: НТУУ "КПІ", 1998. 408 с.

63. Дячун А., Грудовой Р., Гевко И. Винтовой конвейер с вращающимся цилиндрическим кожухом. *Научные труды Русенского университета «Ангел Кънчев»: Сельскохозяйственная техника и технологии. Аграрные науки и ветеринарная медицина. Ремонт и надежность*. 2012. Т. 51. Серия 1.1. С. 31–35.

64. Дячун А. Є., Ляшук О. Л., Любачівський Р. О. Дослідження динаміки гвинтового секційного конвеєра. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія машинобудування*. К., 2013. № 3(69). С. 45–50.

65. Луців І.В., Гевко Ів.Б., Гудь В.З., Дубиняк Т.С. Експериментальне обладнання для дослідження приводів гвинтових конвеєрів. *«Перспективні технології та прилади»*. Луцьк, 2017. № 10 (1). С. 115 – 121.

66. Ефективні техніко-технологічні рішення вирощування льону: монографія / [О.О.Налобіна, В.В.Думич, Т.Л. Бабінець та ін]. Дослідницьке, 2021. 251 с.
67. Дідух В., Шимчук О., Дударєв І., Грабовець В. Ефективність пристрою шнекового типу для віджиму сапропелю. *Вісник ТДТУ*. 2009. Том 14. №1. С. 94-100.
68. Єдина система конструкторської документації. Експлуатаційні документи : ДСТУ ГОСТ 2.601:2006. К. : Держспоживстандарт України, 2007. 144 с..
69. ЄСКД. Загальні положення : ДСТУ ГОСТ 2.001:2006. К. : Держспоживстандарт України, 2007. 144 с.
70. Залуцький С.З. Обґрунтування параметрів шнеків з робочою еластичною поверхнею для транспортування сільськогосподарських матеріалів: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / С.З. Залуцький. Тернопіль, 2018. 197 с.
71. Залуцький С. З. Методика та результати експериментальних досліджень шнекових робочих органів з еластичною гвинтовою поверхнею. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2016. № 1. С. 159–162.
72. Олексюк В. П., Довбуш А. Д., Станько А. І. Застосування еластичних щіткоподібних поверхонь для зниження пошкодження сипких матеріалів при їх транспортуванні гвинтовими робочими органами. *Збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції «Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку» присвячена 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України (Київ, 7-8 листопада 2019 р.)*. Київ, 2019. С. 71-72. (Автором обґрунтовано можливість використання еластичних щіткоподібних поверхонь для зниження пошкодження сипких матеріалів).
73. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов. М. : Машиностроение, 1973. 220 с.
74. Іванченко Ф. К. Підйомно-транспортні машини. К. : Вища школа, 1993. 412 с.
75. Казачковський Н. Н., Якупов Д. В. Програма PowerSuite для

настройки преобразователей частоты и устройств плавного пуска (версия 2.3.0): методичні вказівки [для слухачів курсів підвищення кваліфікації та студентів спеціальності 7.092203 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривід»]. Дніпропетровськ : НГУ, 2006. 45 с.

76. Капаціла Ю. Б. Розробка і дослідження технологічних процесів багатофункціональних агрегатів для кормовиробництва : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01. Луцк, 1999. 18 с.

77. Клендій М. В. Обґрунтування параметрів перевантажувального патрубку гвинтового конвеєра : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.05. Тернопіль, ТДТУ. 2007. 137 с.

78. Конвеєри гвинтові. Терміни та визначення : ДСТУ 2763:94. К. : Держспоживстандарт України, 1995. 11 с.

79. Кузнєцов Ю. М., Луців, І. В., Дубиняк С. А. Теорія технічних. Тернопіль : ТНТУ, 1997 310 с.

80. Куликівський В. Л. Розробка гвинтових транспортерів з підвищеним ресурсом для зерноочисних машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Вінниця, 2012. 20 с.

81. Лещук Р. Я. Обґрунтування конструктивно-силових параметрів секційних робочих органів гвинтових перевантажувальних механізмів : дис. ... канд. техн. наук. : 05.02.02. Тернопіль, 2004. 166 с.

82. Лещук Р., Гевко І., Комар Р. Результати експериментальних досліджень гвинтових перевантажувальних механізмів. *Вісник ТДТУ*. Тернопіль, 2003. Том 8. № 4. С. 56-61.

83. Ловейкін В. С., Рогатинська О. Р. Вибір раціональних параметрів та режимів роботи вертикальних гвинтових конвеєрів. *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету*. Вінниця: ВДАУ, 2005. Вип. 23. С. 181-195.

84. Ловейкін В. С., Рогатинська О. Р. Вибір раціональних параметрів та режимів роботи вертикальних гвинтових конвеєрів. *Вібрації в техніці*. К., 2005. № 3 (41). С. 61-68.

85. Ловейкін В. С., Рогатинська О. Р. До розрахунку швидкохідних гвинтових конвеєрів. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Мелітополь: ТДАТА, 2004. Вип. 21. С. 130-141.
86. Ловейкін В. С., Рогатинська О. Р. Оптимізація режимів роботи гвинтових конвеєрів. *Підйомно-транспортна техніка*. К., 2004. № 2. С. 8-15.
87. Дячун А. Є., Любачівський Р. О. Змішувач гвинтовий з піднімально-пересипним механізмом. *Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2011. Вип. 108. С. 20-25.
88. Ловейкін В. С. Вибір раціональних параметрів та режимів роботи вертикальних гвинтових конвеєрів. *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету*. Вінниця, 2005. Т. 23. С. 181–195.
89. Ловейкін В., Рогатинська Л. Модель транспортування сипкого вантажу швидкохідними гвинтовими конвеєрами з еластичними робочими органами. *Вісник ТНТУ*. 2011. Том 16. № 4. С.66-70.
90. Ляшук О., Дячун А., Тарасюк Ю. Дослідження кінематики та енергосилових параметрів сипкого вантажу у конвеєрі із гофрованим робочим органом. *Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження*. Львів : Львів. нац. агроуніверситет, 2014. № 18. С. 135-148.
91. Ляшук О. Л., Дячун А. Є. Дослідження динаміки процесу роботи гвинтового секційного конвеєра. *Науковий вісник Херсонського державного морського інституту*. Херсон, 2011. № 1(4). С. 215–221.
92. Ляшук О.Л. Науково-прикладні основи створення транспортно-технологічних механізмів неперервної дії сільськогосподарських машин : дис. ... докт. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль: ТНТУ, 2015. 451 с.
93. Матухно Н. В. Шнекові транспортні органи зернозбиральних комбайнів. *Науковий вісник: Зб. наук. праць Нац. агр. ун-ту*. К., 1998. Вип. 9. С. 256–260.
94. Механізми з гвинтовими пристроями / [Б.М. Гевко, М.Г. Данильченко, Р.М. Рогатинський та ін.]. Львів : Світ, 1993. 208 с.

95. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дмитрів Д. В., Гудь В. З., Дмитрів О. Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. *Збірник наукових статей «Сільськогосподарські машини»*. 2020. Вип. 45. С. 85-93.
96. Налобіна О.О., Васильчук Н.В., Івашко П.Г. Експериментальне дослідження взаємодії стебел соняшнику із роторами жатки. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2021. Вип. 46. С. 58 - 69.
97. Налобіна О.О., Бундза О.З. Обґрунтування параметрів завантажувально-розподільчого пристрою для комбікорму. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2022. Вип. 48. С. 53-58.
98. Гевко Р. Б., Станько А. І., Довбуш Т. А. Нові конструкції гвинтових робочих органів з еластичною секцією та щіткоподібними поверхнями. *Збірник тез доповідей Матеріали VI-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020»* (Херсон, 8-12 вересня 2020 р.). Херсон, 2020. С. 280-283.
99. Піддубний В.А., Стадник І.Я., Чагайда А.О., Петриненко Є.А. Обґрунтування параметрів змішувача для борошняних компонентів. *Технічна інженерія*. 2022. 1(89). С. 3–10.
100. Гевко І., Станько А., Пік А., Лещук Р., Гурик О. Обґрунтування техніко-економічної ефективності використання гвинтових робочих органів зі щіткоподібною еластичною робочою поверхнею. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія “Агроінженерні дослідження”*. Львів, 2022. № 26. С. 13-21.
101. Гевко И., Ляшук О., Дячун А., Довбиш А. Обоснование выбора конвейеров с расширенными технологическими возможностями. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin - Rzeszow, 2015. Vol. 17. No 4. P. 107-115.
102. Омельченко О. О., Ткач Б. Д. Довідник по механізації тваринницьких і пташиних ферм і комплексів. К. : Урожай, 1982. 271 с.
103. Пилипець М. І., Гевко І. Б., Пік А. І., Дмитрів Д. В. Оптимізація робочого органа з пружним валом для гнучких гвинтових конвеєрів. *Вісник*

національного університету "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів, 2000. № 412. С. 84 – 91.

104. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунків деталей машин. К. : Вища школа, 1993. 556 с.

105. Гвинтовий конвеєр: пат. 69808 Україна: МПК А 01 F 12/46 (2006.01). № u201113598 ; заявл. 18.11.11 ; опубл. 10.05.12, Бюл. № 9. 4 с.

106. Гвинтовий конвеєр: пат. 70813 Україна: МПК А 01 F 12/46 (2006.01). № u201114633 ; заявл. 09.12.11 ; опубл. 25.06.12, Бюл. № 12. 5 с.

107. Гвинтовий конвеєр: пат. 73085 Україна: МПК А 01 F 12/00 (2012.01). № u201202448 ; заявл. 01.03.12 ; опубл. 10.09.12, Бюл. № 17. 4 с.

108. Гвинтовий еластичний конвеєр: пат. 75314 Україна: МПК В 65 G 33/16 (2006.01). № u201206231 ; заявл. 23.05.12 ; опубл. 26.11.12, Бюл. № 22. 5 с.

109. Шнек з секційною еластичною гвинтовою поверхнею: пат. 119856 Україна: МПК В65G 33/26, В65G 33/16. № u 201704151; заявл. 26.04.17; опубл. 10.10.17, Бюл. № 19. 4 с.

110. Стенд для дослідження ступеня пошкодження сільськогосподарських матеріалів: пат. 81469 Україна: МПК G01N 3/00, A01C 1/00. № u 201302116; заявл. 20.02.13; опубл. 25.06.13, Бюл. № 12. 5 с.

111. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат. 123753 Україна: МПК В65G 33/14 (2006.01), В65G 33/26 (2006.01), А46В 3/10 (2006.01), А46В 7/10 (2006.01). № а 2019 11228; заявл. 18.11.19; опубл. 19.05.21, Бюл. №20. 7 с.

112. Еластичний шнек з розрізними пелюстками: пат. 124326 Україна: МПК В65G 33/16 (2006.01), В65G 33/26 (2006.01). № а202003160; заявл. 26.05.20; опубл. 26.08.21, Бюл. №34. 3 с.

113. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат. 142241 Україна: МПК В65G 33/14 (2006.01), В65G 33/26 (2006.01). № u201911236; заявл. 18.11.19; опубл. 25.05.20, Бюл. №20. 4 с.

114. Еластичний шнек з розрізними пелюстками: пат. 143343  
Україна: МПК В65G 33/14 (2006.01), В65G 33/26 (2006.01). № u202000461;  
заявл. 27.01.20; опубл. 27.07.20, Бюл. №14. 5 с.

115. Гвинтовий змішувач з бункером рівномірного завантаження: пат.  
150442 Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01). № u202105716; заявл. 11.10.21;  
опубл. 11.02.22, Бюл. №7. 4 с.

116. Шнековий змішувач: пат. 150443 Україна: МПК В65G  
33/26 (2006.01). № u202105718; заявл. 11.10.21; опубл. 11.02.22, Бюл. №7. 4 с.

117. Шнековий змішувач з регульованими отворами просипання: пат.  
150445 Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01). № u202105720; заявл. 11.10.21;  
опубл. 11.02.22, Бюл. №7. 4 с.

118. Шнек з еластичним камероподібним елементом: пат. 150763  
Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01), В65G 33/16 (2006.01). № u202106203;  
заявл. 04.11.21; опубл. 13.04.22, Бюл. №15. 4 с.

119. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат. 150968  
Україна: МПК В65G 33/26 (2006.01). № u202106202; заявл. 04.11.21; опубл.  
18.05.22, Бюл. №20. 4 с.

120. Пелешок Т. М. Обґрунтування параметрів бункерного  
завантаження швидкохідних гвинтових конвеєрів : дис. ... канд. техн. наук :  
05.05.05. Тернопіль, 2010. 173 с.

121. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок,  
дослідження : монографія / [Р. М. Рогатинський, І. Б. Гевко, О. Л. Ляшук та ін.].  
Тернопіль, 2019. 212 с.

122. Пилипець М. І., Гурик О. Я. Дослідження процесу транспортування  
і змішування сипких матеріалів шнеково-лопатевим агрегатом. *Зб. наук. пр.  
НАУ "Механізація сільськогосподарського виробництва*. К. : Вид-во НАУ,  
2000. Т. 9. С. 206-214.

123. Пилипець М. І. Розробка і дослідження гнучких гвинтових  
конвеєрів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.04. Тернопіль, 1993. 23 с.

124. Пік А. І. Підвищення технічного рівня засобів механізованого  
переміщення сипких сільськогосподарських матеріалів по криволінійних трасах:

автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01. Луцьк, 1999. 20 с.

125. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов: [пер. с нем.] / [К. Хартан, Э. Лецкий, В. Шефер и др.]. М. : Мир, 1977. 552 с.

126. Радик Д. Л. Розробка і дослідження енергозберігаючих гвинтових живильників : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 1996. 19 с.

127. Луців І.В., Гевко Ів.Б., Дубиняк Т.С., Гудь В.З. Результати експериментальних досліджень обертального моменту пружно-запобіжної муфти гнучкого гвинтового конвеєра. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2017. Вип. 38. С. 105 – 113.

128. Гевко Ів. Б., Дячун А. Є., Любачівський Р. О., Грудовий Р. С. Результати експериментальних досліджень продуктивності гвинтового конвеєра. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. Вінниця, 2012. Вип. 11. Т.1(65). С. 119-122.

129. Гевко Р. Б., Залуцький С. З., Погріщук Б. В., Клендій О. М., Добіжа Н. В. Результати лабораторних досліджень еластичного секційного шнека. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2017. № 3. С.245-250.

130. Рогатинська О. Р. Обґрунтування параметрів навантаження і конструкцій гвинтових конвеєрів : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05. Тернопіль, 2006. 167 с.

131. Рогатинський Р., Гевко І., Дячун А. Исследование крутных колебаний шнека. *Научные труды Русенского университета «Ангел Кънчев»: Сельскохозяйственная техника и технологии. Аграрные науки и ветеринарная медицина. Ремонт и надежность*. 2012. Том 51, Серия 1.1. С. 42–46.

132. Рогатинський Р. М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів з сировиною сільськогосподарського виробництва : дис. ... докт. техн. наук : 05.20.01, 05.05.05. К., 1997. 502 с.

133. Рогатинський Р. М., Дудін О. В., Рогатинська О. Р. Модель контактної взаємодії частинки вантажу з робочими поверхнями сільськогосподарських машин. *Вісник Харківського державного технічного*



університету сільського господарства “Механізація сільськогосподарського виробництва”. Харків: ХДТУСГ, 2003. Вип. 21. С. 222-228.

134. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія. Тернопіль, 2014. 280 с.

135. Рогатинський Р., Гевко І. Модель конструювання і вибору гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями. *Вісник ТНТУ*. 2012. № 3 (67). С.197–210.

136. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є., Вар’ян А.Р., Мельничук А.Л, Шуст І.М. Генерування конструкцій гвинтових механізмів методом морфологічного аналізу з ієрархічним групуванням. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10. С. 186-192.

137. Рогатинський Р.М., Дячун А.Є., Вар’ян А.Р. Дослідження кінематики зернового матеріалу у гвинтовому конвеєрі з обертовим кожухом. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Харків, 2016. Вип. 168. С. 24-31.

138. Рогатинський Р.М., Дячун А.Є., Мельничук А.Л. Дослідження швидкостей зернового матеріалу у гвинтовому конвеєрі із обертовим кожухом графоаналітичним методом. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2017. №38. С. 125-132.

139. Рогатынский Р., Гевко И., Дячун А. Исследование крутных колебаний шнека. *Научни трудове на Русенския университет*. .Русе, 2012. . Т. 51, Серия 1.1. С. 42-46.

140. Гевко Р. Б., Довбуш Т. А., Станько А. І. Розробка еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів для транспортування сипких матеріалів з мінімальними їх пошкодженнями. *Міжнародна науково-технічна конференція до 60- річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя (Тернопіль, 14–15 травня 2020 р.)*. Тернопіль, 2020. С. 61-62.

141. Залуцький С.З., Гевко Р.Б., Гладь Ю.Б., Ткаченко І.Г., Клендій О.М. Рух потоку сипкого матеріалу по поверхні шнека з еластичними секціями, що перекриваються між собою. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 11. С. 81-90.
142. Серілко Д. Л. Обґрунтування конструкцій та параметрів забірних пристроїв вертикальних гвинтових конвеєрів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05. Тернопіль, 2015. 20 с.
143. Гевко І. Б., Довбуш Т. А., Цьонь О. П., Довбуш А. Д., Станько А. І. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх дослідження. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2021. Вип. 47. С. 63-72.
144. Рогатинський Р.М., Гевко Ів.Б., Дячун А.Є., Вар'ян А.Р. Синтез гвинтових транспортно-технологічних механізмів з транспортуючими кожухами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Харків, 2016. Вип. 168. С. 149-155.
145. Гевко Ів.Б., Гудь В.З., Шуст І.М., Мельничук А.Л. Синтез телескопічних гвинтових конвеєрів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. Харків, 2016. Вип. 168. С. 85-91.
146. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення : ДСТУ 3278:95. К. : Держспоживстандарт України, 1996. 142 с.
147. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання науково-дослідних робіт. Загальні положення : ДСТУ 3973:2000. К. : Держспоживстандарт України, 2001. 46 с..
148. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення : ДСТУ 3974:2000. К. : Держспоживстандарт України, 2001. 54 с.
149. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по

сопротивленню материалов. Київ: Наукова думка, 1988. 736 с.

150. Станько А.І. Дослідження еластичних щіткоподібних гвинтових робочих органів та розроблення технології їх виготовлення. *Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»*. Луцьк, 2022. Вип. 21. С. 125-131.

151. Ляшук О. Л., Рогатинська О. Р., Слободян Л. М., Гудь В. З., Клендій В. М., Гупка В. В. Стенд і результати дослідження гвинтового завантажувача сипких матеріалів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків, 2019. Вип. 198. С. 226-232.

152. Гевко Ів.Б., Дячун А.Є., Мельничук А.Л., Вар'ян А.Р., Кондратюк О.М. Стендове обладнання для дослідження модернізованих гвинтових конвеєрів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Рівне, 2016. Вип. 3 (75). С. 274-282.

153. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Любачівський Р. О., Брошак І. І. Стендове оснащення для дослідження приводів та робочих органів гвинтових транспортно-технологічних механізмів машин. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник*. Луцьк, 2013. Вип. 40. С. 50-55.

154. Гевко Ів., Дячун А., Рогатинська Л., Клендій В., Лотоцький Р. Структурний синтез гвинтових сепараторів методом морфологічного аналізу з ієрархічним групуванням. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2013. № 1(69). С. 131–140.

155. Сучасні технології та енергетичні потоки при формуванні борошняних напівфабрикатів: монографія / [І. Я.Стадник, В. А.Піддубний, В. М.Федорів та ін]. Тернопіль, 2021. 372 с.

156. Гевко Ів.Б., Дячун А.Є., Мельничук А.Л., Золотий Р.З., Шуст І.М. Техніко-економічне обґрунтування підвищення продуктивності транспортно-технологічних процесів за допомогою гвинтових конвеєрів з обертовими кожухами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків, 2018. Вип. 190. С. 318-326.

157. Гевко Б. М., Дячун А. Є., Кучвара І. М., Клендій В. М. Технологічність конструкцій механізмів з гвинтовими робочими органами. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2013. Вип. 26. С. 13-19.
158. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Цьонь О. П., Станько А. І. Технологія виготовлення еластичних шнеків. *Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні ОТМЕ-2022»* (Івано-Франківськ – Яремче, 1-5 лютого 2022 р.). - Івано-Франківськ, 2022. С. 69-71.
159. Стадник І. Я., Піддубний В. А. Удосконалення технологічного процесу та обладнання для формування виробів : монографія. Тернопіль, 2019. 292 с.
160. Гевко І. Б., Гевко М. Р., Залуцький С. З., Станько А. І. Установка для дослідження параметрів шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями. *Міжнародна науково-технічна конференція присвячена пам'яті професора Гевка Богдана Матвійовича. Проблеми теорії проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин* (Тернопіль, 23-24 вересня 2021 р.). Тернопіль, 2021. С. 69-72.
161. Ягелюк С.В., Дідух В.Ф. Формування якості льняної продукції: монографія. Луцьк: ЛНТУ, 2021. 140 с.
162. Часов Д. П. Обґрунтування параметрів шнекового конвеєра з додатковими лопатями для транспортування стружки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05. Тернопіль, 2015. 20 с.
163. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 374 с.
164. Ярошенко В. Ф., Білоножко В. М., Петровський В. В. Уточнення коефіцієнту заповнення міжвиткового простору горизонтального гвинтового транспортера. *Науковий вісник НАУ*. К., 2002. № 49. С. 380–384.
165. Bulgakov V., Trokhniak O., Adamchuk V., Chernovol M., Korenko M., Dukulis I., Ivanovs S. A study of dynamic loads of a flexible sectional screw conveyor. *Acta Technol. Agric.* 2022. 25(3). 131–136. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2022-0020>.

166. Lyashuk O., Sokil M., Vovk Y., Levkovych M., Tson O., Kondratyuk D., Dmytrenko V. Analysis of resonance oscillations of extruder elastic screw conveyor. *Int. J. Eng. Res. Africa*. 2019. No 43. P. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.43.49>.
167. Zaica A., Visan A., Zaica A., Olan M., Bunduchi G. Coating process of corn grains using treatment machine with brush screw conveyor. *Engineering for rural development*. Jelgava/Latvia, 2019. P. 233-238.
168. Manjit K. Misra, Yuh-Yuan Shyy, Leopoldo Baudet, Stephen J. Marley Conveyors for Bulk Handling of Seed Soybeans. *APPLIED ENGINEERING IN AGRICULTURE*. Iowa, 1991. Vol. 7(6). P. 735–740.
169. Defining parameters of elastic-safety clutches for screw conveyers = Луців І.В., Гевко Ів.Б., Дубиняк Т.С, Манзій О.С.. Визначення параметрів пружно-запобіжних муфт гвинтових конвеєрів *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль, 2017. № 3 (87). С. 74 – 82.
170. Hevko R.B., Zalutskyi S.Z., Hladyo Y.B., Tkachenko I.G., Lyashuk O.L., Pavlova O.M., Pohrishchuk B.V., Trokhaniak O.M., Dobizha N.V. Determination of interaction parameters and grain material flow motion on screw conveyor elastic section surface. *INMATEH: Agricultural engineering*. Bucharest/Romania, 2019. Vol. 57. No 1. P.123-134.
171. Hevko R.B., Zalutskyi S.Z., Tkachenko I.G., Klendiy O.M. Development and investigation of reciprocating screw with flexible helical surface. *INMATEH: Agricultural engineering*. Bucharest/Romania, 2015. Vol. 46. No. 2. P. 133 - 138.
172. Pankiv V. Experimental studies of consumer specific costs capacity of the screw conveyor. *Innovative Solutions In Modern Science*. 2023. No 1(56). P. 1-19.
173. Rogatynskyi R., Peleshok T., Rogatynska O., Les'kiv P. Directed loading of the high-speed screw conveyor from the bunker. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil : TNTU, 2018. Vol. 91. No 3. P. 93–100.

174. Moorthi S., Megaraj M., Nagarajan L., Karthick A., Bharani M., Patil P. Dynamic analysis and fabrication of single screw conveyor machine. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2022, No 10, P. 1–10.
175. Baranovskyi V., Pankiv V., Komar R., Berezhenko B., Korol O. Mathematical model of functioning of the screw conveyor loading hopper. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2021. No 4 (104). P. 109-122.
176. Zaica A., Olan M., Bunduchi G., Zaica A., Gageanu P., Paun A. Factors that influence coverage degree in seed treatment equipment having brush screw conveyor. *Engineering for rural development*. Jelgava/Latvia, 2020. P. 1325-1330.
177. Rohatynskyi R., Gevko I., Diachun A., Lyashuk O., Skyba O., Melnychuk A. Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra/Slovak, 2019. Vol. 4. P. 141-146.
178. Hevko I., Liashuk O., Tson O., Dovbush T., Zalutskyi S., Stanko A. Installation for the investigation of screw working bodies with elastic surfaces and the results of their experimental tests. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2021. Vol. 103. No 3. P. 98–109.
179. Lyashuk O., Rohatynskyi R., Hevko I., Dmytriv O., Tson O., Tkachenko I., Sokol M., Leshchuk R., Kobelnyk V. Investigation of Bulk Material Transportation by Screw Conveyer with Hinge-Pan Operating Device. *Key Engineering Materials. Engineering Materials, Devices and Equipments-2023*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2023. Vol. 948. P. 169-182.
180. Lutsiv I.V., Hevko Iv.B., Lyashuk O.L., Dubynyak T.S. Investigation of dynamical impact loads in screw conveyer drives with safety clutches. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Bucharest, 2017. Vol. 51. No 1. P. 69 – 76.
181. Hevko Iv.B., Lyashuk O.L., Leshchuk R.Y., Rogatynska L.R., Melnychuk A.L. Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyers. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Bucharest : INMA Bucharest / Romania, 2016. Vol. 48. No. 1. P. 35-42.
182. Hevko I.B., Dyachun A.Ye., Gud V.Z., Rohatynska L.R., Klendiy V.M. Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyer under the

influence of pulse forces. *INMATEH: Agricultural engineering*.

Bucharest/Romania, 2015. Vol.45. No.1. P. 77-86.

183. Articulated screw conveyor in bent pipe or ushaped groove: patent Japan: JP 55093715A. B65G33/16; B65G33/26. 16.07.1980.

184. Flexible screw conveyor: patent Japan: JP 55093715A. B65G33/16; B65G33/26. 25.01.2008.

185. Pankiv M., Pylypets M., Pankiv V., Pankiv Y., Dubchak N. Methodology for refining the performance of screw conveyor. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2022. No 1 (105). P. 95-107.

186. Screw conveyor: patent USA: № 4,717,014 B65G65/16. Jan. 5, 1988.

187. Didukh V., Kirchuk R., Yaschuk A. Modeling of motion of material on the surface of spiral activator in bulk materials dryer. *Motrol. Motoryzacja i Energetyka*. 2013. T. 15 Вип. 4.

188. Mondal D. Design consideration of a laboratory size screw conveyor with variable speed for experimentation purpose-a methodological approach. *Techno Societal*. 2020. No 2(68). P. 705–715.

189. Yu W., Zhang K., Li D., Zou D., Zhang S. Numerical modeling of concrete conveying capacity of screw conveyor based on DEM. *Powder Technol.* 2022. No 29(6). P.361–374.

190. Hevko R.B., Dzyadykevych Y.V., Tkachenko I.G., Zalutskyi S.Z. Parameter justification for interworking relationship of elastic screw operating element with grain material. *Вісник ТНТУ*. Т. : ТНТУ, 2016. Т. 81. № 1. С. 77-87.

191. Hevko R., Trokhaniak A., Zalutskyi S., Stanko A. Screw conveyors with elastic surfaces. *Physical and mathematical justification of scientific achievements: collective monograph*. Boston, 2020. P. 80-96.

192. Nalobina O., Vasylchuk N., Bundza O., Holotiuk M., Martyniuk V., Puts V.. Reaper blade system for harvesting sunflowers. *INMATEH: Agricultural engineering*. Bucharest/Romania, 2023. Vol. 69. No. 1. P. 195-204.

193. Bulgakov V., Pascuzzi S., Adamchuck V., Olt J., Ruzhylo Z., Trokhaniak O., Santoro F., Arak M., Nowak J., Beloev H. Farm Research into power and load parameters of flexible screw conveyors for transportation of

agricultural materials. *Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture. FMPMSA 2022. 2023 Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. No 289. P. 61–75.

194. Lyashuk O. L., Hevko I. B., Hud V. Z., Tkachenko I. G., Hevko O. V., Sokol M. O., Tson O. P., Kobelnyk V. R., Shmatko D. Z., Stanko A. I. Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw - fluid medium" system. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Bucharest/Romania, 2022. Vol. 68, No 3. P. 499-510.

195. Hevko I.B., Hud V.Z., Lyashuk O.L., Hevko O.M., Shust I M. Research of resonance vibrations of the system “telescopic screw is a bulk media” condited by tortial vibrations. *Karaganda University. «Physics» Series*. 2020. No 2(98). P. 119–126.

196. Trokhaniak O.M., Hevko R.B., Lyashuk O.L., Dovbush T.A., Pohrishchuk B.V., Dobizha N.V. Research of the of bulk material movement process in the inactive zone between screw sections. *INMATEH: Agricultural engineering*. Bucharest/Romania, 2020. Vol.60. No.1. P. 261-268.

197. Tian Y., Yuan P., Yang F., Gu J., Chen M., Tang J., Su Y., Ding T., Zhang K., Cheng Q. Research on the Principle of a New Flexible Screw Conveyor and Its Power Consumption. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8. No.7.

198. Hevko I., Lyashuk O., Sokil M., Slobodian L., Hud V., Vovk Yu. Resonant oscillation of vertical working part of conveyer-loader. *Bulletin of the Karaganda University. «Physics» Series*. 2019. No 2(94). 73–82.

199. Zareiforoush H., Komarizadeh M.H., Alizadeh M.R. Review on screw conveyors performance evaluation during handling process. *Journal of Scientific Review*. 2010. No 2. P. 55–63.

200. Rohatynskyi R. M., Hevko Iv. B., Diachun A. Ye. The research of the torsional vibrations of the screw in terms of impulsive force impacts. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпропетровськ, 2015. № 5 (149). С. 64-68.

201. Lyashuk O., Diachun A., Kuchvara I., Vovk Y., Dzyura V. Study of power parameters of forming profile elliptical screw workpieces. *The International*



*Journal of Integrated Engineering*. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia Publisher's Office, 2021. Vol. 13. No. 4. P. 142-151.

202. Rogatynskiy R., Hevko I., Diachun A., Rogatynska O., Melnychuk A. The cargo movement model by the screw conveyor surfaces with the rotating casing. *Scientific Journal of TNTU*. Tern. : TNTU, 2018. Vol. 92. No 4. P. 34–41.

203. Zaica A., Visan A., Paun A., Gageanu P., Bunduchi G., Zaica A., Stefan V., Manea D. The coating process of corn grains using a treatment machine with brush screw conveyor. *Proceedings of the 44th International Symposium on Agricultural Engineering: Actual Tasks on Agricultural Engineering*. Opatija/Croatia, 2016. P. 333-345.

204. Hud V.Z., Rohatynsky R.M., Hevko I.B., Lyashuk O.L., Pik A.I., Huryk O.Y. The research of the resonant oscillations of the system telescopic screw in a bulk environment caused by external periodic forces. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. No 60(1). P. 29–39.

205. Rohatynskiy R.M., Hevko I.B., Diachun A.Ye. The research of the torsional vibrations of the screw in terms of impulsive force impacts. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. No 149(5). P 64–68.

206. Hewko B.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., Lyashuk O.L., Liubachivskiy R.O. The study of bulk material kinematics in a screw conveyor-mixer. *INMATEH: Agricultural engineering*. Bucharest/Romania, 2015. Vol. 47. No. 3. P. 156-163.

207. Diachun A., Hevko I., Stanko A., Korol O., Derysh O. The study of interaction parameters of the elastic brush screw working body fibers with the spherical surfaces of the grain material. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2023. Vol. 109. No 1. P. 32–42.

208. Offenlegungsschrift: pat. DE 10 2005 053 082 A1 Deutschland: B65G 33/14 (2006.01). anmeldetag: 04.11.2005; offenlegungstag: 10.05.2007. 6 p.

209. Brush setting structure of screw conveyor: pat. KR 100941923B1 South Korea: E03F 5/14 (2006.01). filing date: 13.12.2008; disclosure date: 18.08.2009. 12 p.

210. Screw conveyor: pat. CN 109592316 B China: B65G 33/14 (2006.01).

filing date: 15.11.2018; disclosure date: 09.04.2019. 11 p.

211. A kind of screw conveyor ensuring grain of rice integrity: pat. CN 209411039 U China: B65G 33/14 (2006.01). filing date: 22.11.2018; disclosure date: 20.09.2019. 7 p.

212. Flight Edging : веб-сайт. URL: <https://www.kwsmfg.com/resources/features-and-benefits/flight-edging/> (дата звернення: 24.11.2022).

213. Flight Brush Edging : веб-сайт. URL: <https://mininglifeonline.net/equipment/screw-conveyor-components/flight-brush-edging/221> (дата звернення: 27.11.2022).

214. Custom Plastics Manufacturing : веб-сайт. URL: <https://maljohn.com/> (дата звернення: 28.11.2022).

215. KWS. Screw Conveyors Engineering Guide. Conveying Knowledge, Workmanship, Solutions. Release Date 4.1.16. 2015. 72 p.

216. Screw Flights : веб-сайт. URL: <https://bulknet.com.au/screw-flights/#> (дата звернення: 29.11.2022).

217. Brush screw conveyer: pat. CN 209956835 U China: B65G 45/18 (2006.01). filing date: 12.03.2019; disclosure date: 17.01.2020. 7 p.

## ДОДАТКИ

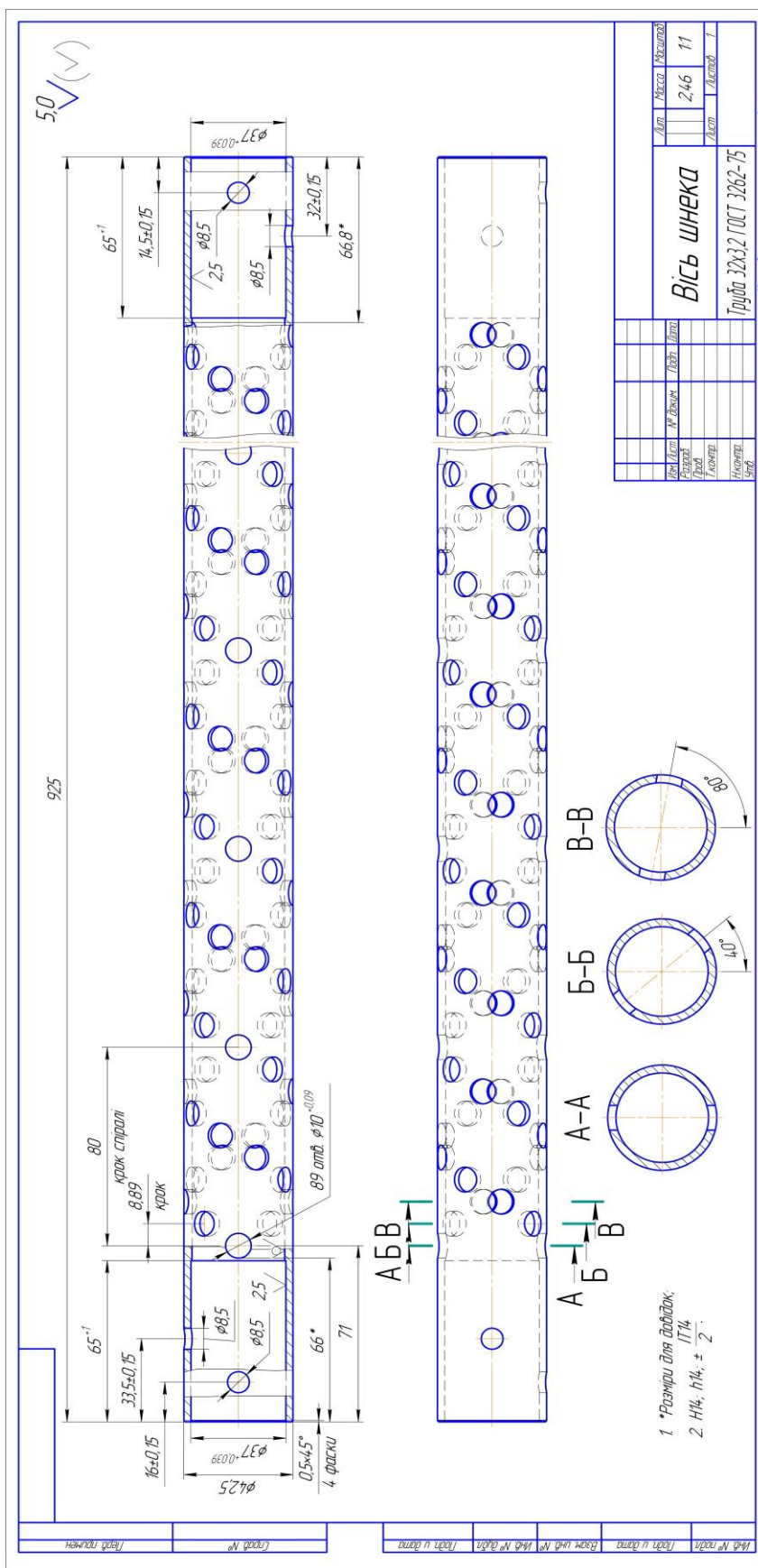
## Додаток А

Таблиця А.1.

Умовна план-матриця експерименту типу ПФЕ  $3^3$ 

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У			Середні значення, У
									повторюваність			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$U_{\text{сер.}}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$	$Y_{1c}$
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$	$Y_{2c}$
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	$Y_{31}$	$Y_{32}$	$Y_{33}$	$Y_{3c}$
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$Y_{41}$	$Y_{42}$	$Y_{43}$	$Y_{4c}$
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	$Y_{51}$	$Y_{52}$	$Y_{53}$	$Y_{5c}$
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	$Y_{61}$	$Y_{62}$	$Y_{63}$	$Y_{6c}$
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	$Y_{71}$	$Y_{72}$	$Y_{73}$	$Y_{7c}$
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	$Y_{81}$	$Y_{82}$	$Y_{83}$	$Y_{8c}$
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	$Y_{91}$	$Y_{92}$	$Y_{93}$	$Y_{9c}$
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$Y_{101}$	$Y_{102}$	$Y_{103}$	$Y_{10c}$
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	$Y_{111}$	$Y_{112}$	$Y_{113}$	$Y_{11c}$
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	$Y_{121}$	$Y_{122}$	$Y_{123}$	$Y_{12c}$
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	$Y_{131}$	$Y_{132}$	$Y_{133}$	$Y_{13c}$
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_{141}$	$Y_{142}$	$Y_{143}$	$Y_{14c}$
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	$Y_{151}$	$Y_{152}$	$Y_{153}$	$Y_{15c}$
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	$Y_{161}$	$Y_{162}$	$Y_{163}$	$Y_{16c}$
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	$Y_{171}$	$Y_{172}$	$Y_{173}$	$Y_{17c}$
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	$Y_{181}$	$Y_{182}$	$Y_{183}$	$Y_{18c}$
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	$Y_{191}$	$Y_{192}$	$Y_{193}$	$Y_{19c}$
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	$Y_{201}$	$Y_{202}$	$Y_{203}$	$Y_{20c}$
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	$Y_{211}$	$Y_{212}$	$Y_{213}$	$Y_{21c}$
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	$Y_{221}$	$Y_{222}$	$Y_{123}$	$Y_{22c}$
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	$Y_{231}$	$Y_{232}$	$Y_{233}$	$Y_{23c}$
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	$Y_{241}$	$Y_{242}$	$Y_{243}$	$Y_{24c}$
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	$Y_{251}$	$Y_{252}$	$Y_{253}$	$Y_{25c}$
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	$Y_{261}$	$Y_{262}$	$Y_{263}$	$Y_{26c}$
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{271}$	$Y_{272}$	$Y_{273}$	$Y_{27c}$

### Додаток Б Креслення вісі шнека



## Додаток В



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **123753** (13) **C2**

(51) МПК

**B65G 33/14** (2006.01)**B65G 33/26** (2006.01)**A46B 3/10** (2006.01)**A46B 7/10** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД**

<p>(21) Номер заявки: а 2019 11228</p> <p>(22) Дата подання заявки: 18.11.2019</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 27.05.2021</p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: 19.05.2021, Бюл.№ 20</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 26.05.2021, Бюл.№ 21</p>	<p>(72) Винахідник(и): Гевко Роман Богданович (UA), Рогатинський Роман Михайлович (UA), Ляшук Олег Леонтійович (UA), Довбуш Тарас Анатолійович (UA), Рогатинська Лілія Романівна (UA), Станько Андрій Ігорович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: DE 8900680 U1, 31.05.1990 SU 1279555 A1, 30.12.1986 GB 1088839 A, 25.10.1967 DE 104888 C, 27.05.1898 US 4192418 A, 11.03.1980 JP 2001233433 A, 28.08.2001 US 4496086 A, 29.01.1985 JP S56103010 A, 17.08.1981 SU 1613404 A1, 15.12.1990 UA 101095 U, 25.08.2015</p>
--	--

UA 123753 C2

**(54) ШНЕК З ЕЛАСТИЧНОЮ ЩІТКОПОДІБНОЮ ПОВЕРХНЕЮ****(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі піднімально-транспортного машинобудування, а саме до гвинтових конвеєрів, що забезпечують транспортування сипких матеріалів з мінімальними їх пошкодженнями в замкнутих кожухах.

Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею, що містить направляючий кожух, в якому розташований пустотілий вал, в якому, перпендикулярно до його центральної осі, по гвинтовій лінії виконані отвори, в яких закріплені нерухомі осі з краями, що виступають над зовнішньою поверхнею пустотілого вала із закріпленими до них еластичними елементами. Нерухомі осі виконані у вигляді пустотілих циліндричних трубок, в яких розташовані пучки еластичних щіткоподібних елементів, периферійна поверхня яких контактує з внутрішньою поверхнею направляючого кожуха, причому краї пустотілих циліндричних трубок над зовнішньою поверхнею пустотілого вала переходять в еліпсоподібну форму для фіксації пучків еластичних щіток.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **124326** (13) **C2**

(51) МПК

**B65G 33/16** (2006.01)**B65G 33/26** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД**

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2020 03160</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>26.05.2020</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>26.08.2021</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заяву: <b>10.11.2020, Бюл.№ 21</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>25.08.2021, Бюл.№ 34</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Гевко Роман Богданович (UA), Рогатинський Роман Михайлович (UA), Довбуш Тарас Анатолійович (UA), Ляшук Олег Леонтійович (UA), Ткаченко Ігор Григорович (UA), Хомик Надія Ігорівна (UA), Станько Андрій Ігорович (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці): <b>ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 108782 U, 25.07.2016 SU 1620399 A1, 15.01.1991 WO 2018/060955 A1, 05.04.2018 JP H1179356 A, 23.03.1999 US 3056487 A, 02.10.1962 SU 1435511 A1, 07.11.1988 SU 602428 A1, 15.04.1978 SU 1148822 A1, 07.04.1985 SU 1613404 A1, 15.12.1990 RU 2081043 C1, 10.06.1997 RU 22939 U1, 10.05.2000</p>
--	--

**UA 124326 C2**
**(54) КОМБІНОВАНИЙ ЕЛАСТИЧНИЙ ГВИНТОВИЙ ТРАНСПОРТЕР****(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі піднімально-транспортного машинобудування, а саме до гвинтових транспортерів, які забезпечують переміщення сипких матеріалів з мінімальними їх пошкодженнями в замкнутих кожухах.

Комбінований еластичний гвинтовий транспортер, що містить бункер, який з'єднаний з направляючим кожухом, в котрому розташований гвинтовий робочий орган, а з протилежної сторони від букера з направляючим кожухом з'єднаний вивантажувальний патрубок, згідно з винаходом вводиться те, що гвинтовий робочий орган виконано комбінованим, причому в зоні завантаження матеріалу з бункера крок гвинтового робочого органу є найменшим, а жорсткість його периферійної поверхні є максимальною, в зоні переходу бункера в направляючий кожух крок гвинтового робочого органу та жорсткість його периферійної поверхні є середньою, а в зоні транспортування та вивантаження матеріалу крок гвинтового робочого органу є найбільшим, а жорсткість його периферійної поверхні є мінімальною.

Використання винаходу дозволить зменшити ступінь пошкодження сипких матеріалів при їх переміщенні в зону вивантаження.



УКРАЇНА

(19) UA (11) 142241 (13) U  
 (51) МПК  
 B65G 33/26 (2006.01)  
 B65G 33/16 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ  
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА  
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
 УКРАЇНИ

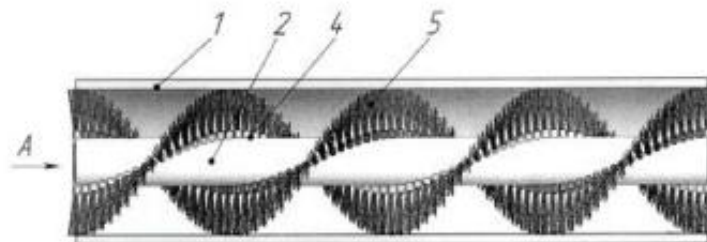
## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: и 2019 11236          (22) Дата подання заявки: 18.11.2019          (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.05.2020          (46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.05.2020, Бюл.№ 10</p>	<p>(72) Винахідник(и):          Гевко Роман Богданович (UA),          Рогатинський Роман Михайлович (UA),          Ляшук Олег Леонтійович (UA),          Довбуш Тарас Анатолійович (UA),          Рогатинська Лілія Романівна (UA),          Станько Андрій Ігорович (UA)          (73) Власник(и):          ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ          ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА          ПУЛЮЯ,          вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</p>
--	--

## (54) ШНЕК З ЕЛАСТИЧНОЮ ЩІТКОПОДІБНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

## (57) Реферат:

Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею містить направляючий кожух, в якому розташований пустотілий вал, в котрому, перпендикулярно до його центральної осі, по гвинтовій лінії виконані отвори, в яких закріплені нерухомі осі з краями, що виступають над зовнішньою поверхнею пустотілого вала із закріпленими до них еластичними елементами. Нерухомі осі виконані у вигляді пустотілих циліндричних трубок, в яких розташовані пучки еластичних щіткоподібних елементів, периферійна поверхня котрих контактує з внутрішньою поверхнею направляючого кожуха. При цьому краї пустотілих циліндричних трубок над зовнішньою поверхнею пустотілого вала переходять в еліпсоподібну форму для фіксації пучків еластичних щіток.



Фіг. 1

UA 142241 U





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **143343** (13) **U**  
 (51) МПК  
**B65G 33/26** (2006.01)  
**B65G 33/16** (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ  
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА  
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
 УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2020 00461</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>27.01.2020</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>27.07.2020</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>27.07.2020, Бюл.№ 14</b></p>	<p>(72) Винахідник(и):  <b>Гевко Роман Богданович (UA),          Рогатинський Роман Михайлович (UA),          Станько Андрій Ігорович (UA),          Довбуш Тарас Анатолійович (UA),          Баліцький Ігор Богданович (UA),          Залуцький Сергій Зіновійович (UA),          Гевко Андрій Ігорович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и):  <b>ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ          ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА          ПУЛЮЯ,          вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</b></p>
--	---

**(54) ЕЛАСТИЧНИЙ ШНЕК З РОЗРІЗНИМИ ПЕЛЮСТКАМИ****(57) Реферат:**

Еластичний шнек з розрізними пелюстками містить направляючий кожух, в якому розташовано центральний вал, на котрому встановлено несучу смугову спіраль, в якій виконані отвори для кріплення еластичних секторів, поверхня яких виступає над поверхнею несучої смугової спіралі. Еластичні сектори в нижній частині виконані суцільними з отворами для кріплення, діаметр яких є більшим, ніж діаметр отворів смугової спіралі. По периферії еластичні сектори виконані розрізними у вигляді пелюстків. Кут розрізу пелюстків спрямовано в напрямку транспортування матеріалу.

**UA 143343 U**



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **150442** (13) **U**  
 (51) МПК  
**B65G 33/26** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: **u 2021 05716**  
 (22) Дата подання заявки: **11.10.2021**  
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **17.02.2022**  
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **16.02.2022, Бюл.№ 7**

(72) Винахідник(и):  
**Гевко Іван Богданович (UA),**  
**Гудь Віктор Зіновійович (UA),**  
**Пік Андрій Іванович (UA),**  
**Сташків Микола Ярославович (UA),**  
**Остафійчук Віталій Васильович (UA),**  
**Довбуш Тарас Анатолійович (UA),**  
**Станько Андрій Ігорович (UA)**

(73) Володілець (володільці):  
**Гевко Іван Богданович,**  
 вул. Крушельницької, 6, с. Гаї-Гречинські,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46016 (UA),  
**Гудь Віктор Зіновійович,**  
 вул. Суходольська, 13, кв. 1, смт Гусятин,  
 Чортківський р-н, Тернопільська обл., 48201  
 (UA),  
**Пік Андрій Іванович,**  
 вул. Макаренка, 6, кв. 157, м. Тернопіль,  
 Тернопільська обл., 46027 (UA),  
**Сташків Микола Ярославович,**  
 вул. 15 Квітня, 2-д, кв. 31, м. Тернопіль,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46013 (UA),  
**Остафійчук Віталій Васильович,**  
 вул. Тернопільська, 6, кв. 8, смт Гусятин,  
 Чортківський р-н, Тернопільська обл., 48201  
 (UA),  
**Довбуш Тарас Анатолійович,**  
 вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46003 (UA),  
**Станько Андрій Ігорович,**  
 вул. Польова, 6, смт В. Березовиця,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 47724 (UA)

UA 150442 U

**(54) ГВИНТОВИЙ ЗМІШУВАЧ З БУНКЕРОМ РІВНОМІРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ****(57) Реферат:**

Гвинтовий змішувач з бункером рівномірного завантаження виконано у вигляді транспортної труби з гвинтовим робочим органом, завантажувальним і розвантажувальним елементами та приводом. Завантажувальний елемент виконано у вигляді бункера рівномірного завантаження, в якому закріплено кронштейн, на якому встановлено вісь, на якій розміщено з можливістю колового обертання конічну втулку, на зовнішній поверхні якої виконано спіральні виступи. Бункер рівномірного завантаження встановлено у крайній верхній частині транспортної труби, яку розміщено на опорах. До транспортної труби закріплено привід, що через муфту з'єднано з



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **150443** (13) **U**  
 (51) МПК  
**B65G 33/26** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: **u 2021 05718**  
 (22) Дата подання заявки: **11.10.2021**  
 (24) Дата, з якої є чинними  
 права інтелектуальної  
 власності: **17.02.2022**  
 (46) Публікація відомостей  
 про державну  
 реєстрацію: **16.02.2022, Бюл.№ 7**

(72) Винахідник(и):  
**Гевко Іван Богданович (UA),**  
**Гудь Віктор Зіновійович (UA),**  
**Пік Андрій Іванович (UA),**  
**Остафійчук Віталій Васильович (UA),**  
**Довбуш Тарас Анатолійович (UA),**  
**Станько Андрій Ігорович (UA),**  
**Сукенік Ірина Петрівна (UA)**

(73) Володілець (володільці):  
**Гевко Іван Богданович,**  
 вул. Крушельницької, 6, с. Гаї-Гречинські,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46016 (UA),  
**Гудь Віктор Зіновійович,**  
 вул. Суходольська, 13, кв. 1, смт Гусятин,  
 Чортківський р-н, Тернопільська обл., 48201  
 (UA),  
**Пік Андрій Іванович,**  
 вул. Макаренка, 6, кв. 157, м. Тернопіль,  
 Тернопільська обл., 46027 (UA),  
**Остафійчук Віталій Васильович,**  
 вул. Тернопільська, 6, кв. 8, смт Гусятин,  
 Чортківський р-н, Тернопільська обл., 48201  
 (UA),  
**Довбуш Тарас Анатолійович,**  
 вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46003 (UA),  
**Станько Андрій Ігорович,**  
 вул. Польова, 6, смт В. Березовиця,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 47724 (UA),  
**Сукенік Ірина Петрівна,**  
 вул. Поліська, 29, с. Новостав,  
 Кременецький р-н, Тернопільська обл.,  
 47133 (UA)

UA 150443 U

**(54) ШНЕКОВИЙ ЗМІШУВАЧ****(57) Реферат:**

Шнековий змішувач виконаний у вигляді транспортної труби з гвинтовим робочим органом, завантажувальним і розвантажувальним елементами та приводом. Транспортну трубу виконано конусною і в ній розміщено стрічковий конусний гвинтовий робочий орган з отворами. Конусну транспортну трубу з однієї сторони закріплено на рухомій плиті, а з іншої - на регульовальній опорі. На рухомій плиті закріплено привід, що через муфту з'єднано з валом стрічкового конусного гвинтового робочого органу з отворами. Рухому плиту і регульовальну опору встановлено з можливістю кутового зміщення  $\alpha$  на стаціонарній плиті. У крайній верхній



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **150445** (13) **U**  
 (51) МПК  
**B65G 33/26** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: **u 2021 05720**  
 (22) Дата подання заявки: **11.10.2021**  
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **17.02.2022**  
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **16.02.2022, Бюл.№ 7**

(72) Винахідник(и):  
**Гевко Іван Богданович (UA),**  
**Сташків Микола Ярославович (UA),**  
**Довбуш Тарас Анатолійович (UA),**  
**Станько Андрій Ігорович (UA),**  
**Сукенік Ірина Петрівна (UA),**  
**Маруніч Олександр Петрович (UA),**  
**Цьонь Ганна Богданівна (UA)**

(73) Володілець (володілці):  
**Гевко Іван Богданович,**  
 вул. Крушельницької, 6, с. Гаї-Гречинські,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46016 (UA),  
**Сташків Микола Ярославович,**  
 вул. 15 Квітня, 2-д, кв. 31, м. Тернопіль,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46013 (UA),  
**Довбуш Тарас Анатолійович,**  
 вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46003 (UA),  
**Станько Андрій Ігорович,**  
 вул. Польова, 6, смт В. Березовиця,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 47724 (UA),  
**Сукенік Ірина Петрівна,**  
 вул. Поліська, 29, с. Новостав,  
 Кременецький р-н, Тернопільська обл.,  
 47133 (UA),  
**Маруніч Олександр Петрович,**  
 вул. Петра Могилы, 4, кв. 3, м. Рівне,  
 Рівненський р-н, Рівненська обл., 33004  
 (UA),  
**Цьонь Ганна Богданівна,**  
 вул. Ломоносова, 30, м. Тернопіль,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46002 (UA)

**UA 150445 U**

**(54) ШНЕКОВИЙ ЗМІШУВАЧ З РЕГУЛЬОВАНИМИ ОТВОРАМИ ПРОСИПАННЯ****(57) Реферат:**

Шнековий змішувач з регульованими отворами просипання виконаний у вигляді транспортної труби з гвинтовим робочим органом, завантажувальним і розвантажувальним елементами та приводом. Транспортну трубу виконано конусною і в ній на валу закріплено стрічковий конусний гвинтовий робочий орган з отворами, крім того, на валу розміщено з можливістю колового повертання додатковий стрічковий конусний гвинтовий робочий орган з регульовальними отворами. Додатковий стрічковий конусний гвинтовий робочий орган з регульовальними



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **150763** (13) **U**

(51) МПК

**B65G 33/26** (2006.01)**B65G 33/16** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2021 06203</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>04.11.2021</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>14.04.2022</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>13.04.2022, Бюл.№ 15</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Гевко Іван Богданович (UA), Цьонь Олег Петрович (UA), Довбуш Тарас Анатолійович (UA), Станько Андрій Ігорович (UA), Довбуш Анатолій Дмитрович (UA), Хомик Надія Ігорівна (UA), Цьонь Ганна Богданівна (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володілці): <b>Гевко Іван Богданович,</b> вул. Крушельницької, 6, с. Гаї-Гречинські, Тернопільський р-н, Тернопільська обл., 46016 (UA), <b>Цьонь Олег Петрович,</b> вул. Володимира Великого, 5, кв. 129, м. Тернопіль, 46003 (UA), <b>Довбуш Тарас Анатолійович,</b> вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль, 46003 (UA), <b>Станько Андрій Ігорович,</b> вул. Польова, 6, смт В. Березовиця, Тернопільський р-н, Тернопільська обл., 47724 (UA), <b>Довбуш Анатолій Дмитрович,</b> вул. Броварна, 25, кв. 30, м. Тернопіль, 46003 (UA), <b>Хомик Надія Ігорівна,</b> вул. Тарнавського, 7-а, блок 14, кв. 5, м. Тернопіль, 46002 (UA), <b>Цьонь Ганна Богданівна,</b> вул. Ломоносова, 30, м. Тернопіль, 46002 (UA)</p>
---	---

**UA 150763 U**
**(54) ШНЕК З ЕЛАСТИЧНИМ КАМЕРОПОДІБНИМ ЕЛЕМЕНТОМ****(57) Реферат:**

Шнек з еластичним камероподібним елементом виконаний у вигляді пустотілого вала, в якому по гвинтовій лінії закріплені еластичні елементи. При цьому еластичний елемент виконано у вигляді гвинтової спіралі, до якої кріпильними елементами закріплено еластичний камероподібний елемент, причому гвинтову спіраль жорстко закріплено до пустотілого вала.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **150968** (13) **U**  
 (51) МПК  
**B65G 33/26** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: **u 2021 06202**  
 (22) Дата подання заявки: **04.11.2021**  
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **19.05.2022**  
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **18.05.2022, Бюл.№ 20**

(72) Винахідник(и):  
**Гевко Іван Богданович (UA),**  
**Цьонь Олег Петрович (UA),**  
**Дячун Андрій Євгенович (UA),**  
**Довбуш Тарас Анатолійович (UA),**  
**Станько Андрій Ігорович (UA),**  
**Сукенік Ірина Петрівна (UA),**  
**Довбуш Анатолій Дмитрович (UA)**

(73) Володілець (володільці):  
**Гевко Іван Богданович,**  
 вул. Крушельницької, 6, с. Гаї-Гречинські,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 46016 (UA),  
**Цьонь Олег Петрович,**  
 вул. Володимира Великого, 5, кв. 129,  
 м. Тернопіль, 46003 (UA),  
**Дячун Андрій Євгенович,**  
 вул. Березова, 7, кв. 3, м. Тернопіль,  
 46003 (UA),  
**Довбуш Тарас Анатолійович,**  
 вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль,  
 46003 (UA),  
**Станько Андрій Ігорович,**  
 вул. Польова, 6, смт В. Березовиця,  
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,  
 47724 (UA),  
**Сукенік Ірина Петрівна,**  
 вул. Поліська, 29, с. Новостав,  
 Кременецький р-н, Тернопільська обл.,  
 47133 (UA),  
**Довбуш Анатолій Дмитрович,**  
 вул. Броварна, 25, кв. 30, м. Тернопіль,  
 46003 (UA)

**UA 150968 U**

**(54) ШНЕК З ЕЛАСТИЧНОЮ ЩІТКОПОДІБНОЮ ПОВЕРХНЕЮ****(57) Реферат:**

Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею виконано у вигляді пустотілого вала, в якому по гвинтовій лінії закріплені еластичні елементи. Еластичні елементи виконано у вигляді еластичної щітки з двотавровою основою, яку встановлено в гвинтовому повздожньому отворі циліндричної пустотілої трубки. Циліндричну пустотілу трубку жорстко закріплено гвинтами до пустотілого вала.

## Додаток Д

**АКТ**  
**промислового випробування**  
**шнека з еластичною щіткоподібною поверхнею**

Даний акт складено на те, що на нашому підприємстві у 2022 році було проведено промислове випробування шнека з еластичною щіткоподібною поверхнею, конструкція якого захищена патентом України № 150968.

Експлуатація шнека з еластичною щіткоподібною поверхнею показала надійність його в роботі при значній продуктивності та відповідність поставленим вимогам щодо низького пошкодження насінневих матеріалів матеріалів.

Економічний ефект отриманий від використання даної конструкції протягом року склав 6870 грн.

Голова наглядової ради  
СФНВГ «Коваль» і  
«Ковалівське нове»



**ВОЛОДИМИР КОВАЛЬ**