

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОВАЛЬ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.867.42

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВИХ ЗМІШУВАЧІВ
З РЕГУЛЬОВАНОЮ ПОДАЧЕЮ**

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.

_____ С.О. Коваль

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

Тернопіль – 2026

АНОТАЦІЯ

Коваль С.О. Обґрунтування параметрів шнекових змішувачів з регульованою подачею. – 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, 2026.

У дисертаційній роботі шляхом виконання теоретичного обґрунтування та експериментального дослідження здійснено вирішення наукового завдання, яке полягає у підвищенні однорідності змішування сумішей гвинтовими транспортно-технологічними змішувачами за рахунок збільшення інтенсивності перемішування при незначних довжинах шнекової магістралі за рахунок тертя матеріалів з обертовими гвинтовим робочим органом та кожухом, шляхом розроблення і дослідження шнекових змішувачів з обертовим кожухом з регульованою подачею та вибором їх раціональних конструктивних параметрів та режимів роботи.

На основі проведеного аналізу потоку суміші в гвинтових конвеєрах змішувачах при перехідних режимах показано, що транспортування суміші проходить із осьовою та коловою швидкостями з відривом від кожуха у верхній його частині, а на дузі піднімання утворюється динамічне тіло волочіння із стаціонарним осьовим рухом. Встановлено, що основним фактором, що впливає на колове переміщення суміші є обертовий рух кожуха, а обертанням гвинта забезпечується її осьове переміщення.

За результатами розв'язку диференціальних рівнянь руху потоку вантажу, визначено кінематичні та динамічні параметри транспортування суміші, зокрема осьові та колові складові швидкості потоку частинок суміші, а також продуктивність конвеєра-змішувача та його потужність і значення моментів приводу робочих органів. Показано, що рух динамічного тіла волочіння можна привести до руху частинки з приведеними параметрами.

В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що

згладжувальна здатність похилого гвинтового конвеєра-змішувача оптимізується при ймовірності просипання суміші через вал $p = 0,5$ та зростає із ростом кількості комірок, тобто із збільшенням довжини конвеєра-змішувача L , зменшенням кроку гвинта T та різниці між кутовими швидкостями гвинта та кожуха $\omega_1 - \omega_2$, при раціональному значенні кутової швидкості кожуха ω_2 .

В роботі представлено програму і методику проведення експериментальних досліджень розробленого і виготовленого зразка шнекового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з обертовим рухом кожуха в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування матеріалів. Проведено статистичне оброблення результатів повнофакторних експериментів з виведенням емпіричних рівнянь регресії, що дають можливість прогнозувати потужність приводу обертання шнека, потужність приводу обертання кожуха, продуктивність шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування при комбінації різних сипких матеріалів від зміни трьох основних факторів: частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача.

Встановлено, що при зменшенні частоти обертання шнека, збільшенні частоти обертання кожуха в іншому напрямку і кута нахилу змішувача величина коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної та двохкомпонентних сумішей зменшується. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,07...1,15 разів. Збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,2...1,22 рази. Зміна кута нахилу α шнека від 0 град. до 30 град. сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,11...1,14 рази. Загалом коефіцієнт неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші шнековим змішувачем з обертовим кожухом є в 1,64 рази меншим ніж при змішуванні класичним гвинтовим конвеєром із

спіральним шнеком в межах досліджуваних частот його обертання від 250 об/хв. до 350 об/хв.

Визначено, що при збільшенні частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів збільшується. Значення потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші коливалось в межах 0,078 кВт... 0,164 кВт, а для двохкомпонентних сумішей від 0,087 кВт 0,189 кВт. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання потужності приводу обертання шнека в 1,4 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. призводить до збільшення потужності приводу обертання шнека в 1,28 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. сприяє збільшенню потужності приводу обертання шнека в 1,23 рази.

Встановлено, що при збільшенні частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів збільшується. Потужність приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші змінювалась від 0,017 кВт до 0,045 кВт, а для двохкомпонентних сумішей ці значення коливались в межах 0,019 кВт... 0,052 кВт. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання потужності приводу обертання кожуха в 1,16 рази. Збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. призводить до збільшення потужності приводу обертання кожуха в 2 рази, Зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. сприяє збільшенню потужності приводу обертання кожуха в 1,18 рази.

Визначено, що при збільшенні частоти обертання шнека, зменшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина продуктивності транспортування та змішування комбінації різних сипких

матеріалів шнековим змішувачем зростає. При транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші вона коливалось в межах від 0,56 т/год. до 3,78 т/год., а для двохкомпонентної суміші в межах від 0,62 т/год. до 4,37 т/год. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання продуктивності шнекового змішувача в 1,85 рази. Збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. призводить до зменшення продуктивності шнекового змішувача в 1,58 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. призводить до зменшення продуктивності шнекового змішувача в 1,38 рази.

Виконано структурний синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами за допомогою морфологічного аналізу і отримано нові конструкції гвинтових робочих органів змішувачів та конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами. Розроблені конструкції гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, шнеків для змішування та способів їх виготовлення захищені дев'ятьма патентами України на корисні моделі. У ТОВ «Сієфджи Трейдинг» Компанії «Контінентал Фармерз Груп» (м. Тернопіль) і ФГ «КРОК ВПЕРЕД 2019» (Тернопільська обл., с. Трибухівці) підтверджено ефективність виконання технологічного процесу змішування сумішей із застосуванням гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, розроблених на основі патентів України № 154380 і № 154547. Конструкції шнеків для змішування, які виготовлені на основі патентів України № 153687 і № 153774, використовувались при виготовленні змішувальних апаратів у ФГ «ДАРИ ДОЛИНИ» (Тернопільська обл., смт. Гусятин) і ПП «Хлопівецьке» (Тернопільська обл., м. Копичинці). Економічний ефект від впровадження і використання технічних засобів, розроблених на основі зазначених патентів, склав 534000 грн.

Ключові слова: шнековий конвеєр, рівняння регресії, параметри гвинтового транспортера, шнек, спіраль, математичне моделювання, транспортування-змішування матеріалу, сипкий зерновий матеріал, структурний синтез, продуктивність, змішувач, змішування, компоненти, силові параметри, обертовий кожух.

ANNOTATION

Koval S.O. Justification of the parameters of screw mixers with regulated feed. – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 «Industrial Mechanical Engineering». – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2026.

In the dissertation, the scientific problem of improving the mixing homogeneity of mixtures in screw conveyor–technological mixers is solved through theoretical substantiation and experimental investigation. The proposed approach is based on increasing the mixing intensity over relatively short screw conveyor lengths by enhancing material friction with the rotating screw working body and the casing. This is achieved through the development and investigation of screw mixers with a rotating casing, adjustable feed rate, and the determination of their rational design parameters and operating modes.

Based on the analysis of mixture flow in screw conveyor mixers under transient operating conditions, it is shown that the transportation of the mixture occurs with both axial and circumferential velocity components, accompanied by detachment from the casing in its upper part. Along the lifting arc, a dynamic dragging body with steady axial motion is formed. It has been established that the primary factor influencing the circumferential movement of the mixture is the rotational motion of the casing, whereas the axial movement is ensured by the rotation of the screw.

As a result of solving the differential equations of motion of the bulk material flow, the kinematic and dynamic parameters of mixture transportation were determined, including the axial and circumferential components of the particle flow velocity, as well as the capacity of the conveyor-mixer, its power consumption, and the torque values of the drives of the working bodies. It is shown that the motion of the dynamic dragging body can be reduced to the motion of a particle with equivalent parameters.

As a result of the conducted theoretical studies, it was established that the smoothing (equalizing) capability of an inclined screw conveyor–mixer is optimized at a certain probability of mixture leakage through the shaft and increases with an increase in the number of cells, i.e., with an increase in the length of the conveyor–mixer, a decrease in the screw pitch, and a reduction in the difference between the angular velocities of the screw and the casing, provided that a rational value of the casing angular velocity is selected.

The dissertation presents a program and methodology for conducting experimental studies of the developed and manufactured prototype of a screw conveyor with adjustable material feed in the loading zone from a hopper and with a rotating casing in the direction of screw rotation, intended for simultaneous mixing and conveying of bulk materials. Statistical processing of the results of full-factorial experiments was carried out, resulting in empirical regression equations that make it possible to predict the power of the screw drive, the power of the casing drive, the capacity of the screw mixer, and the mixing non-uniformity coefficient when combining various bulk materials, depending on variations in three main factors: the screw rotational speed n_1 , the casing rotational speed n_2 , and the inclination angle α of the screw mixer.

It was established that a decrease in the screw rotational speed, an increase in the casing rotational speed in the opposite direction, and an increase in the inclination angle of the mixer lead to a reduction in the mixing non-uniformity coefficient for both three-component and two-component mixtures. An increase in the screw rotational speed n_1 from 250 rpm to 350 rpm results in an increase in the mixing non-uniformity coefficient by a factor of 1.07–1.15. Increasing the casing rotational speed n_2 from 100 rpm to 200 rpm ensures a decrease in the mixing non-uniformity coefficient by a factor of 1.20–1.22. Changing the screw inclination angle α from 0° to 30° contributes to a reduction in the mixing non-uniformity coefficient by a factor of 1.11–1.14. Overall, the mixing non-uniformity coefficient of a two-component mixture mixed by a screw mixer with a rotating casing is 1.64 times lower than that

obtained using a conventional screw conveyor with a helical screw within the investigated screw rotational speed range of 250–350 rpm.

It was determined that an increase in the screw rotational speed, the casing rotational speed, and the inclination angle of the screw mixer leads to an increase in the power required for the screw drive during the conveying and mixing of combinations of various bulk materials. The screw drive power during the transportation and mixing of a three-component mixture ranged from 0.078 kW to 0.164 kW, while for two-component mixtures it varied from 0.087 kW to 0.189 kW. An increase in the screw rotational speed n_1 from 250 rpm to 350 rpm results in a 1.4-fold increase in the screw drive power. At the same time, an increase in the casing rotational speed n_2 from 100 rpm to 200 rpm leads to a 1.28-fold increase in the screw drive power, whereas a change in the inclination angle α of the screw mixer from 0° to 30° contributes to a 1.23-fold increase in the screw drive power.

It was also established that an increase in the screw rotational speed, the casing rotational speed, and the inclination angle of the screw mixer causes an increase in the power required for the casing drive during the conveying and mixing of combinations of various bulk materials. The casing drive power during the transportation and mixing of a three-component mixture varied from 0.017 kW to 0.045 kW, while for two-component mixtures these values ranged from 0.019 kW to 0.052 kW. An increase in the screw rotational speed n_1 from 250 rpm to 350 rpm results in a 1.16-fold increase in the casing drive power. Increasing the casing rotational speed n_2 from 100 rpm to 200 rpm leads to a twofold increase in the casing drive power, whereas changing the inclination angle α of the screw mixer from 0° to 30° contributes to a 1.18-fold increase in the casing drive power.

It was determined that an increase in the screw rotational speed, combined with a decrease in the casing rotational speed and the inclination angle of the screw mixer, leads to an increase in the conveying and mixing capacity of the screw mixer when handling combinations of various bulk materials. During the transportation and mixing of a three-component mixture, the capacity ranged from 0.56 t/h to 3.78 t/h, while for a two-component mixture it ranged from 0.62 t/h to 4.37 t/h. An increase in

the screw rotational speed n_1 from 250 rpm to 350 rpm results in a 1.85-fold increase in the capacity of the screw mixer. Increasing the casing rotational speed n_2 from 100 rpm to 200 rpm leads to a 1.58-fold decrease in the screw mixer capacity, whereas changing the inclination angle α from 0° to 30° results in a 1.38-fold decrease in the capacity of the screw mixer.

Structural synthesis of screw conveyor–mixers with rotating casings was performed using morphological analysis, resulting in the development of new designs of screw working bodies for mixers and screw conveyor–mixers with rotating casings. The developed designs of screw conveyor–mixers with rotating casings, mixing screws, and methods for their manufacture are protected by nine Ukrainian utility model patents.

The effectiveness of the technological process of mixture blending using screw conveyor–mixers with rotating casings, developed on the basis of Ukrainian patents No. 154380 and No. 154547, was confirmed at LLC “CFG Trading” of the Continental Farmers Group (Ternopil) and at the farming enterprise “KROK VPERED 2019” (Ternopil region, Trybukhivtsi village). The mixing screw designs manufactured in accordance with Ukrainian patents No. 153687 and No. 153774 were used in the production of mixing equipment at the farming enterprise “DARY DOLYNY” (Ternopil region, Husiatyn township) and at the private enterprise “Khlopivetske” (Ternopil region, Kopychyntsi).

The economic effect obtained from the implementation and use of the technical solutions developed on the basis of the above-mentioned patents amounted to UAH 534,000.

Key words: screw conveyor, regression equation, screw conveyor parameters, screw, helix, mathematical modeling, material conveying and mixing, bulk granular material, structural synthesis, productivity, mixer, mixing, components, force parameters, rotating casing.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у фахових виданнях

1. Коваль С.О. Синтез гвинтових конвєсєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький, 2023. Вип. №8(39), ч. I. С. 85-94.

2. Гєвко І.Б., Лєщук Р.Я., Брикса А.О., Стібайло О.Ю., Коваль С.О. Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів лопатєвих гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький, 2023. Вип. 8(39), ч. II. С. 24-34. (Автором запропоновано спосіб виготовлення гвинтового лопатєвого робочого органу змішувача та окремі конструктивні і технологічні особливості його проектування).

3. Nevko I., Pik A., Komar R., Stibaylo O., Koval' S. Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2024. Vol. 113, No 1. P. 5–15. (Автором запропоновано спосіб виготовлення U-подібного шнека та окремі конструктивні і технологічні особливості його проектування).

4. Дячун А.Є., Дмитрів О.Р., Гєвко Б.Р., Коваль С.О., Цапик Р.П. Експериментальна установка гвинтового конвєєра з обертовим кожухом для змішування сипких матеріалів. *Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»*. Луцьк, 2024. Вип. 24. С. 38-44. (Автором запропоновані окремі конструктивні рішення при проектуванні експериментальної установки, зокрема використання двох частотних перетворювачів для регулювання різностороннього руху приводів установки).

5. Nevko I., Diachun A., Dmytriv O., Koval S., Leskiv P., Okhnyvskyi R. Research of horizontal screw conveyors-mixers with rotating casing. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2024. Vol. 115. No 3. P. 130–141. (Автором виведені окремі аналітичні залежності з визначення конструктивних, кінематичних і

силових параметрів горизонтальних гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами).

6. Дячун А.Є., Гевко І.Б., Золотий Р.З., Коваль С.О., Дериш О.Б., Брикса А.О. Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвеєра з обертовим кожухом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* Кропивницький, 2024. Вип. №10(41), ч. I. С. 133-143. *(Автором проведено експериментальні дослідження та виконано оброблення окремих статистичних даних експерименту).*

7. Гевко І.Б., Гупка А.Б., Коваль С.О., Брикса А.О., Бучинський В.М. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* Кропивницький, 2025. Вип. 11(42). ч. 1. С. 129-138. *(Автором запропоновано спосіб визначення очікуваного економічного ефекту та формулу вибору гвинтових змішувачів).*

Тези конференцій та семінари

8. Гевко І.Б., Гудь В.З., Гурик О.Я., Коваль С.О. Шнековий змішувач з регульованими отворами просипання. *Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики* : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. присвячена 90-річчю Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, м. Тернопіль, 29–30 вересня 2022. Тернопіль, 2022. С. 48. *(Автором запропоновано окремі конструктивні рішення при проектуванні нових конструкцій шнекових змішувачів).*

9. Гевко І.Б., Коваль С.О., Стібайло О.Ю., Брикса А.О., Бучинський В.М. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом. *Матеріали V Міжнародної наук.-практ. конф. «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем»*, м. Кропивницький, 19-21 квітня 2023. Кропивницький, 2023. С. 124-125. *(Автором запропоновано окремі конструктивні рішення при проектуванні*

нових конструкцій шнекових змішувачів).

10. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Гевко Б.Р., Довбуш Т.А., Коваль С.О., Стібайло О.Ю., Брикса А.О. Стенд для дослідження характеристик гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами. *Збірник тез ІХ Міжнародної наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в АПК»*, м. Луцьк, 7-8 червня 2023. Луцьк, 2023. С. 27-29. *(Автором запропоновані окремі конструктивні рішення при проектуванні експериментальної установки, зокрема використання двох частотних перетворювачів для регулювання різностороннього руху приводів установки).*

11. Коваль С.О. Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Збірник тез XII Міжнародної наук.-практ. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, м. Тернопіль, 6-7 грудня 2023. Тернопіль, 2023. С. 51-52.

12. Коваль С.О., Стібало О.Ю. Особливості виготовлення лопатевих спіралей змішувачів. *Матеріали та програма XI Всеукраїнської наук.-техн. конф. «Сучасні технології у промисловому виробництві»*, м. Суми, 23-26 квітня 2024. Суми, 2024. С. 40-41. *(Автором запропоновано окремі конструктивні і технологічні особливості виготовлення лопатевих спіралей змішувачів).*

13. Гевко І., Дячун А., Дмитрів О., Коваль С. Моделювання роботи похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Збірник тез доповідей XXV міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвяченій 124-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 95-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України*, м. Київ, 17–19 жовтня, 2024. Київ, 2024. С. 130-133. *(Автором виведені окремі аналітичні залежності з визначення конструктивних, кінематичних і силових параметрів похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами).*

14. Гевко І., Коваль С., Брикса А. Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром з

обертовим кожухом. *Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, м. Тернопіль, 11-12 грудня 2024. Тернопіль, 2024. С. 137-138. (Автором проведено експериментальні дослідження та виконано оброблення окремих статистичних даних експерименту).

15. Гевко І., Коваль С. Моделювання процесу змішування похилими гвинтовими конвеєрами-змішувачами з обертовим кожухом. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвяченої 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, м. Тернопіль, 28-29 травня 2025. Тернопіль, 2025. С. 127. (Автором виведені окремі аналітичні залежності з моделювання процесу змішування похилими гвинтовими конвеєрами-змішувачами з обертовим кожухом).

Патенти України

16. Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів: пат. 153687 Україна: МПК 65G 33/16, 65G 33/26. № u202301003; заявл. 13.03.2023; опубл. 10.08.2023, Бюл. №32. 3 с. (Частка всіх авторів однакова).

17. Гвинтовий робочий орган змішувача: пат. 153774 Україна: МПК 65G 33/16. № u 202301002; заявл. 13.13.2023; опубл. 24.08.2023, Бюл. №34. 3 с. (Частка всіх авторів однакова).

18. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом: пат. 154380 Україна: МПК 65G 33/08 (2006.01). № u202302288; заявл. 15.05.2023; опубл. 09.11.2023, Бюл. №45. 4 с. (Частка всіх авторів однакова).

19. Стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом: пат. 154996 Україна: МПК 65G 33/08 (2006.01). № u202302289; заявл. 15.05.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. №2. 5 с. (Частка всіх авторів однакова).

20. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок: пат. 157048 Україна: МПК

B21H 3/12, B21D 11/06. № u202400164; заявл. 11.01.2024; опубл. 05.09.2024, Бюл. №36. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

21. Шнек для змішування з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат. 157049 Україна: МПК B65G 33/16. № u202400169; заявл. 11.01.2024; опубл. 05.09.2024, Бюл. №36. 3 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

22. Шнек із змінним еластичним елементом: пат. 157149 Україна: МПК B65G 33/16. № u202400165; заявл. 11.01.2024; опубл. 05.09.2024, Бюл. №36. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

23. Шнек з механічним кріпленням спіралей: пат. 157050 Україна: МПК B65G 33/26, B65G 33/16. № u2024 00170; заявл. 11.01.2024; опубл. 05.09.2024, Бюл. №36. 3 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

24. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок: пат. 157208 Україна: МПК B21H 3/12, B21D 11/06. № u202400167; заявл. 11.01.2024; опубл. 19.09.2024, Бюл. №38. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

ЗМІСТ

ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ І РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ НАПРАЦЮВАНЬ У СФЕРІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ШНЕКОВИХ ЗМІШУВАЧІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	24
1.1. Особливості конструкцій шнекових змішувачів та їх робочих органів	24
1.2. Аналіз результатів досліджень гвинтових транспортно-технологічних механізмів з функцією змішування	39
1.3. Специфіка проектування шнекових змішувачів та їх робочих органів з використанням сучасних методів моделювання та синтезу	47
1.4. Висновки.....	52
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ГВИНТОВИМИ КОНВЕЄРАМИ-ЗМІШУВАЧАМИ РЕГУЛЬОВАНОЮ ПОДАЧЕЮ	3 54
2.1. Дослідження горизонтальних гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертним кожухом	54
2.2. Модель функціонування похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертним кожухом	67
2.3. Моделювання процесу змішування похилими гвинтовими конвеєрами- змішувачами з обертним кожухом.....	82
2.4. Висновки.....	96
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ШНЕКОВОГО ЗМІШУВАЧА З РЕГУЛЬОВАНОЮ ПОДАЧЕЮ	98
3.1. Програма експериментальних досліджень.....	98
3.2. Параметри лабораторної установка шнекового змішувача з	

регульованою подачею для проведення експериментальних досліджень	99
3.3. Методика проведення експериментальних досліджень для визначення потужностей приводів обертання шнека та кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування сипких матеріалів	109
3.4. Висновки.....	116
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	118
4.1. Результати експериментальних досліджень коефіцієнта неоднорідності змішування зернових матеріалів шнековим змішувачем з регульованою подачею	118
4.2. Результати експериментальних досліджень потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів шнековим змішувачем з регульованою подачею	135
4.3. Результати експериментальних досліджень потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів шнековим змішувачем з регульованою подачею	141
4.4. Результати експериментальних досліджень продуктивності транспортування та змішування зернових матеріалів шнековим змішувачем з регульованою подачею	148
4.5. Висновки	154
РОЗДІЛ 5. ПРОЄКТУВАННЯ ГВИНТОВИХ КОНВЕЄРІВ-ЗМІШУВАЧІВ З ОБЕРТОВИМ КОЖУХОМ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	159
5.1. Синтез конструкцій гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів	159
5.2. Методика проєктування гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів	172
5.3. Техніко-економічне обґрунтування доцільності використання гвинтових змішувачів	175

5.4. Висновки.....	181
ВИСНОВКИ.....	184
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	188
ДОДАТКИ.....	208

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній час виконання транспортних та інших технологічних операцій не можливо уявити без шнекових транспортно-технологічних засобів. Гвинтові механізми мають найширше застосування у машинах і засобах сільськогосподарського виробництва, будівельної механіки, фармації тощо. Їх застосування далеко виходить від простого транспортування і на сьогодні з їх допомогою здійснюють операції калібрування, сепарації, видавлювання, очищення, сортування, подрібнення, й наголовніше змішування різних матеріалів. Крім зазначеного слід додати, що вони характеризуються значною простотою і надійністю, високою екологічністю та забезпеченням показників охорони праці, забезпечують значну точність подачі і мають високу придатність для автоматизації процесів, можуть широко агрегатуватись у поєднанні з іншими засобами, забезпечувати значну гнучкість у використанні, поєднувати кілька додаткових процесів при транспортуванні, є нескладними і економічно вигідними при проектуванні та виготовленні.

Найбільшого використання як технологічні засоби шнеки набули у якості змішувачів матеріалів. Враховуючи часту необхідність поєднання процесів переміщення різних матеріалів з їх змішуванням, такі засоби дозволяють проводити об'єднання операцій, забезпечуючи значне скорочення витрат. Але при цьому інтенсивність перемішування є не надто високою, що потребує більшої кількості перелопачувань суміші і, відтак, збільшення довжини шнекової магістралі. Забезпечити необхідну кількість перелопачувань можливо при зрушуванні суміші відповідним тертям матеріалів з обертовими гвинтовим робочим органом та кожухом. Тому, розроблення і дослідження шнекових змішувачів з обертовим кожухом з регульованою подачею є актуальним є актуальними, перспективним і доцільним.

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 ВК 72-24 «Розроблення енергоефективних конструкцій та ресурсозберігаючих технологій виробництва робочих органів гвинтових транспортно-технологічних машин» (№ державної реєстрації 0124U002485), 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** – підвищення однорідності змішування сумішей при функціонуванні горизонтальних і похилих шнекових змішувачів шляхом розроблення нової конструкції і вибору раціональних параметрів гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом з регульованою подачею.

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

- провести аналіз конструкцій, особливостей створення шнекових змішувачів та їх робочих органів, результатів досліджень гвинтових транспортно-технологічних механізмів з функцією змішування, й на базі цього розробити концепцію проектування їх ефективних конструкцій;

- провести теоретичні дослідження горизонтальних гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом із виведенням теоретичних залежностей для визначення максимальної лінійної швидкості проходження частини суміші у горизонтальній вітці конвеєра-змішувача та нерівномірності змішування залежно від кількості циклів перелопачування;

- розробити модель функціонування похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом із виведенням теоретичних залежностей зі встановленням режиму переміщення та змішування суміші відносно кутових швидкостей обертового кожуха та кута його нахилу;

- провести теоретичні дослідження перемішування в гвинтовому конвеєрі-змішувачі сипкого матеріалу внаслідок його перелопачування та оцінити вплив конструктивних параметрів та режимів роботи на згладжувальну здатність змішувача та якість змішування;

- спроектувати та виготовити дослідний зразок гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом та провести необхідні експериментальні дослідження із подальшою статистичною обробкою та виведенням рівнянь регресії залежності потужностей приводів обертання шнека та кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування сипких матеріалів від режимів роботи конвеєра-змішувача;

- провести структурний синтез конструкцій гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів, а також розробити методику їх проектування і вибору з врахуванням вартості, продуктивності, ефективності забезпечення технологічного процесу змішування та інших характеристик;

- провести техніко-економічне обґрунтування доцільності використання гвинтових змішувачів.

Об'єкт дослідження – процеси змішування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром-змішувачем з обертовим кожухом з регульованою подачею.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивних параметрів та режимів роботи гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами з регульованою подачею на процес змішування сипких матеріалів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проведено з використанням методів математичного моделювання, базових положень теоретичної механіки, елементів механіки суцільного середовища, опору матеріалів, диференціального числення і чисельних методів розв'язку диференціальних рівнянь, комбінаторики та морфологічного аналізу. Апробацію розроблених аналітичних моделей проведено при проведенні експериментальних досліджень із застосуванням спеціально розробленої експериментальної установки та використанні методів комп'ютерного моделювання і відповідного прикладного програмного забезпечення.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше побудована модель руху частинок суміші по поверхні обертового кожуха гвинтового конвеєра-змішувача залежно від кутового їх

розміщення в потоці в умовах перехідного режиму транспортування;

- вперше розроблено модель руху динамічного тіла волочіння суміші у вигляді взаємодії двох його елементів, відповідно, із висхідним та нисхідним напрямками дії на них зовнішніх сил відносно обертового кожуха;

- уточнено залежності для визначення кінематичних та силових параметрів похилих конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом для випадку його роботи в перехідному режимі транспортування-змішування;

- уточнено поточно-коміркову модель змішування суміші для випадку гвинтових конвеєрів-змішувачів із обертовим кожухом із розбиттям комірок за кількістю циклів перелопачування та виведено відповідну функцію розподілу ключового компоненту по довжині конвеєра-змішувача.

Практичне значення отриманих результатів. Виконано структурний синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами за допомогою морфологічного аналізу і отримано нові конструкції гвинтових робочих органів змішувачів та конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами. На базі синтезованих технічних рішень розроблено, виготовлено і випробувано конструкцію гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом, що дозволило визначити його раціональні конструктивні і технологічні параметри. Проведена порівняльна оцінка розробленого гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом та гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем і гвинтовим змішувачем з пересипом довела його техніко-економічну ефективність.

Розроблені конструкції гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, шнеків для змішування та способів їх виготовлення захищені дев'ятьма патентами України на корисні моделі. У ТОВ «Сієфджи Трейдинг» Компанії «Контінентал Фармерз Груп» (м. Тернопіль) і ФГ «КРОК ВПЕРЕД 2019» (Тернопільська обл., с. Трибухівці) підтверджено ефективність виконання технологічного процесу змішування сумішей із застосуванням гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, розроблених на основі патентів України № 154380 і № 154547. Конструкції шнеків для змішування з

механічним кріпленням елементів, які виготовлені на основі патентів України № 153687 і № 153774, використовувались при виготовленні змішувальних апаратів у ФГ «ДАРИ ДОЛИНИ» (Тернопільська обл., смт. Гусятин) і ПП «Хлопівецьке» (Тернопільська обл., м. Копичинці). Економічний ефект від впровадження і використання технічних засобів, розроблених на основі зазначених патентів, склав 534000 грн.

Особистий внесок здобувача. Основні результати кваліфікаційної роботи здобувачем отримано самостійно. В одноосібних працях та у співавторстві виконано структурний синтез гвинтових елементів за допомогою морфологічного аналізу і отримано нові конструкції гвинтових робочих органів змішувачів та конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами [152, 153, 156, 162, 167, 168], в працях, які опубліковані у співавторстві, проведено теоретичні дослідження горизонтальних і похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами [140, 142, 147], представлено результати їх експериментальних досліджень та оброблення даних експериментів [145, 157, 158, 159], запропоновано і запатентовано нові конструкції гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, шнеків для змішування та способи їх виготовлення [154, 155, 160, 161, 163, 164, 165, 169, 170], запропоновано спосіб вибору і виконано техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами [171].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались й обговорювались на: Міжнародній науково-практичній конференції «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 (м. Тернопіль, 2022); V Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем» (м. Кропивницький, 2023); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК» (м. Луцьк, 2023); XII Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів

«Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2023); XI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, 2024); XXV Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченій 124-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 95-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України (м. Київ, 2024); XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2024); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвяченої 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2025).

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

Публікації. Результати наукових досліджень викладено у 24 наукових працях, з них – 7 статей у фахових виданнях України, 8 тез наукових конференцій і 9 патентів України на корисні моделі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 173 найменувань та 7 додатків. Загальний обсяг дисертації 245 сторінок, в тому числі 187 сторінок основного тексту, 71 рисунок, 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ І РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ НАПРАЦЮВАНЬ У СФЕРІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ШНЕКОВИХ ЗМІШУВАЧІВ, ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Особливості конструкцій шнекових змішувачів та їх робочих органів

Вперше ідеї переміщення вантажів гвинтовими елементами були зафіксовані у Стародавній Греції, винахідником яких був Архімед. Дослідження прикладного характеру, на яких базується сучасна теорія функціонування шнеків, відносяться до 20-го століття [1]. Використання гвинтових транспортерів стримувалось тим, що на початкових етапах у якості робочих органів шнеків використовувались спіралі круглого поперечного перетину (пружини), які забезпечували вкрай низьку продуктивність. Також негативно впливало на їх використання підвищене пошкодження продуктів транспортування, яке відбувається за рахунок потрапляння часток транспортованого матеріалу між поверхнями шнекової спіралі та кожуха, що часто спричиняє їх подрібнення чи травмування для зернових матеріалів. Проте позитивний ефект значно переважав негативний, що в подальшому призвело до надзвичайно широкого використання шнекових механізмів у різних галузях економіки, а відтак до появи цілої гамми різнотипних конструктивних рішень та розширення сфер функціонування даних механізмів.

Однією з таких сфер є використання шнекових механізмів у якості шнекових змішувачів у галузях сільськогосподарського виробництва, харчової і переробної галузі, будівництва, хімічній промисловості та фармацевтиці, металургії тощо. Операцію змішування при використанні шнекових змішувачів можна проводити як супутню, при транспортуванні вантажів, або як головну, коли шнековий механізм використовується лише для перемішування сипких,

в'язких або напіврідких компонентів. Відтак поділ шнекових змішувачів проводять за цими функціональними ознаками [2].

До основних переваг шнекових змішувачів слід віднести їх відносну простоту та високу надійність конструкцій, що зумовлено використанням обмеженої кількості рухомих та статичних елементів; досить високу якість отримання однорідних сумішей, особливо якщо операція змішування реалізується як основна, коли шнековий механізм використовується лише для перемішування окремих компонентів; високу степінь відповідності по забезпеченні показників охорони праці і безпеки персоналу, значну екологічну придатність, що зумовлена їх герметичністю та захистом від впливів зовнішнього середовища, а також можливістю уникнення витоку пилу, окремих часток і компонентів в зовнішнє середовище; універсальність використання, де поряд із операцією змішування можна проводити інші, такі як переміщення, подрібнення, сепарацію, дозування тощо; можливість агрегування із іншими засобами для модифікації різних виробничих процесів [3-6].

До основних недоліків шнекових змішувачів відносять пошкодження (подрібнення, травмування) перетворюваних матеріалів при їх потраплянні в зазор між спіралями та поверхнею ємкості, в якій проходить змішування; часом високу неоднорідність суміші, особливо коли операція змішування реалізується як допоміжна; проблему самоочищення шнекової спіралі та ємності, в якій проходить змішування, від залишків компонентів після проведеного змішування [3-6].

До основних вимог, які ставляться до шнекових змішувачів, відносять забезпечення високої степені однорідності сумішей при змішуванні; мінімізацію пошкодження (подрібнення, травмування) змішуваних компонентів; високу продуктивність виконуваного процесу; простоту і низьку собівартість конструкції; низькі часові та енерговитрати при виконання операції змішування.

На практиці найбільшого використання набули шнекові змішувачі з горизонтальним та вертикальним розташуванням гвинтових спіралей. Проте

також зустрічаються змішувачі із нахилених розташуванням шнекових спіралей, а також із спареними шнеками, одно- та різнонаправленими спіралями, шнекові змішувачі циклової дії тощо. Крім того, існує значна кількість машин і механізмів, де операція змішування із залученням шнекових робочих органів використовується поряд з іншими операціями (готувальники кормів, змішувачі-роздавальники, дробарки-змішувачі для приготування кормів, комбікормові агрегати тощо). Нижче представлено аналіз різнотипних конструкцій шнекових змішувачів.

Почнемо з того, що практично кожен шнековий транспортер поряд із операцією переміщення вантажів також здійснює їх перемішування. Відтак почнемо розгляд конструкцій горизонтальних шнекових транспортерів з функцією перемішування, до яких відносяться горизонтальні шнекові транспортери компанії «ВИМАЛСПЕЦБУД» [7] (рис. 1.1 а) та ПВКП «Огрант» [8] (рис. 1.1 б). Такі шнекові механізми не забезпечують високої якості процесу перемішування компонентів (відбувається при перекиданні матеріалів через вал і у міжвитковому просторі у процесі переміщення) і дана операція з їх допомогою виконується як допоміжна при відповідних режимах роботи.



а)



б)

Рис 1.1. Горизонтальні шнекові транспортери з функцією перемішування:
а) компанії «ВИМАЛСПЕЦБУД» [7]; б) ПВКП «Огрант» [8]

На рис. 1.2 а представлено горизонтальні безосьові шнекові транспортери-змішувачі (в трубі чи жолобі) фірми KWS [9], а на рис. 1.2 б фірми ТОВ «Технік» [10], у яких операція змішування проводиться як супутня при транспортуванні вантажів. На відміну від представлених вище (рис. 1.1) горизонтальних шнекових транспортерів з функцією перемішування відсутність валу та наявність підшипникового вузла лише зі сторони приводу дає можливість вільного прогинання шнекової спіралі, що забезпечує дещо вищу якість змішування у таких апаратах за рахунок потрапляння і пересипання компонентів сумішей у безосьовому та міжвитковому просторі. Проте отримання сумішей із мінімальною неоднорідністю забезпечується лише при багаторазовому переміщенні у прямому та зворотному напрямках, що робить процес змішування з їх використанням надто енергоємним і витратним.

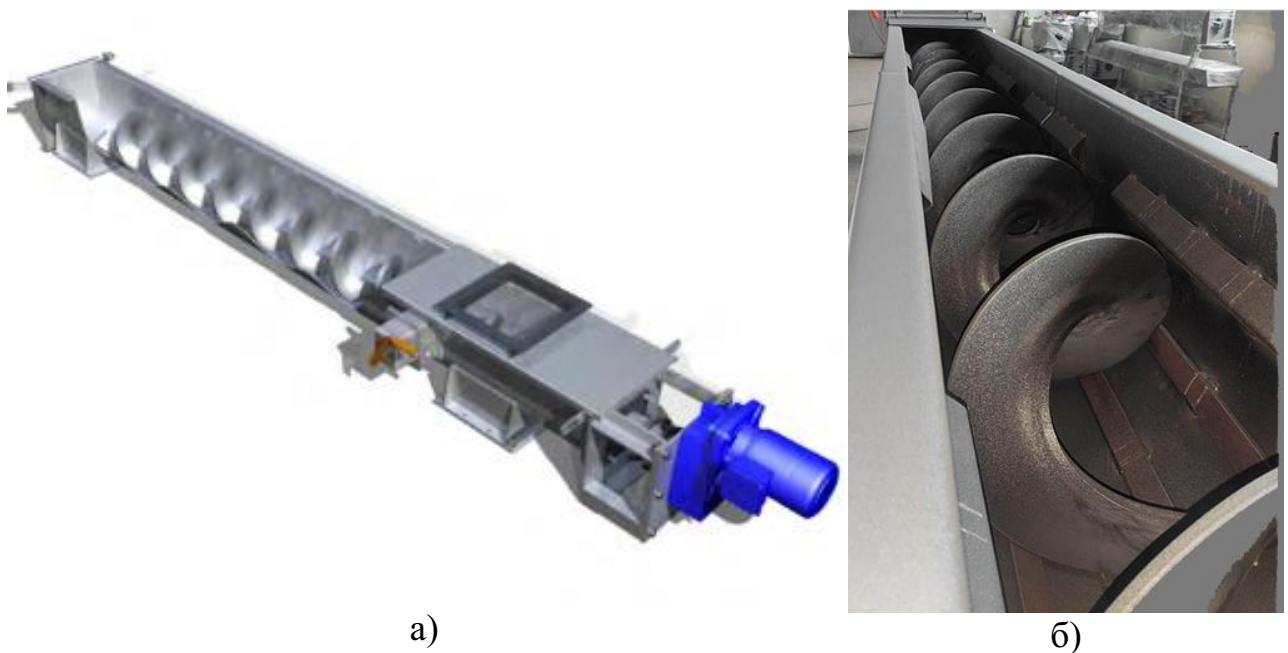


Рис 1.2. Горизонтальні безосьові шнекові транспортери-змішувачі
а) фірми KWS [9]; б) фірми ТОВ «Технік» [10]

Для забезпечення ефективного змішування горизонтальні шнекові змішувачі часто оснащуються стрічковими шнеками (рис. 1.3). Так на рис. 1.3 а зображено горизонтальний шнековий змішувачі із стрічковим шнеком ТОВ «Технік» [10]. Ефективність стрічкових шнекових змішувачів значно зростає, у

порівнянні з безосьовими шнековими транспортерами-змішувачами, за рахунок пересипання і змішування компонентів у просторі між витком і валом, а також за рахунок розбивання кріпильними елементами, які з'єднують вал із стрічковою спіраллю. Але як і в у попередньо проаналізованій конструкції отримання сумішей із мінімальною неоднорідністю забезпечується лише при багаторазовому переміщенні у прямому та зворотному напрямках. Це часто призводить до забивання шнека матеріалом на окремих ділянках і неефективності процесу. Якщо процес змішування відбувається одноразово при переміщенні компонентів суміші в одному напрямку, тоді такий змішувач для забезпечення якісних показників повинен володіти значною довжиною, що відповідно негативно впливає на ріст енерговитрати та його собівартості.

Значно вищу ефективність забезпечують стрічкові змішувачі з двома різнонаправленими шнеками, представник яких виробництва ТОВ НВП «СЕРВІС ПАК» зображений на рис. 1.3 б [11].



а)



б)

Рис 1.3. Горизонтальні змішувачі з стрічковими шнеками: а) з одним шнеком [10]; б) з двома різнонаправленими шнеками різних діаметрів [11]

Дана конструкція оснащена двома різнонаправленими шнеками різних діаметрів. У таких змішувачах матеріали різнонаправлено перекидаються, просипаються і інтенсивно змішуються. Негативним фактором є неможливість забезпечення як супутньої операції переміщення (транспортування) на відповідну відстань змішувальної суміші.

Науковцями ТНТУ ім. І. Пулюя розроблені і досліджуються конструкції двохвальних шнекових змішувачів з еластичними поверхнями (рис. 1.4) [12]. Ці шнекові змішувачі забезпечують досить високий коефіцієнт однорідностей сумішей і можуть забезпечувати, на відміну від інших, мінімальне пошкодження (травмування) оброблюваних матеріалів при значній продуктивності процесу. Швидкість обертання у даних дослідних установках регулюється за допомогою частотного перетворювача, що забезпечує дослідження і встановлення найбільш оптимальних швидкостей для різних сумішей при забезпеченні заданих параметрів якості і продуктивності процесу.



Рис 1.4. Шнековий двовальний змішувач із еластичними шнеками [12]

Також на практиці широко використовуються двохвальні лопатеві шнекові змішувачі, спіралі яких виконані у вигляді лопаток різної конфігурації. На рис. 1.5 *a* представлено двохвальний шнековий змішувач безперервної дії СНД-3000 виробництва фірми ФОП «Зелений О.А.» [13] продуктивністю 10

тонн на годину. Шнекові вали з лопатками приводяться в рух від електродвигунів 7,5 кВт і 11 кВт через редуктори Ц2У-160/200 та РМ-350. Використовуються такі змішувачі для змішування та формування будівельних сумішей, сумішей для брикетування тощо.

Інший представник даного типу змішувачів виробництва ТОВ «Технік» (рис. 1.5 а) [10], який забезпечує ефективне змішування на протязі від 15 с до 10 хв., містить подвійний U-подібний жолоб, в якому розташовані два лопатеві шнеки. Особливість даної конструкції полягає у можливості регулювання як швидкості обертання (частотним перетворювачем), так і кута нахилу лопаток, що забезпечує регулювання швидкості виконання процесу, а також можливості забезпечення напрямку обертання валів з лопатками в одному чи різних напрямках, що дозволяє змішувачу працювати у режимах безперервної чи періодичної дії. Загалом значна степінь універсальності шнекового лопаткового змішувача забезпечує необхідне змішування продуктів з усуванням «мертвих зон» в процесі виконання операції.



а)



б)

Рис 1.5. Двохвалі лопатеві шнекові змішувачі: а) без регулювання кута нахилу лопаток [13]; б) з регулюванням кута нахилу лопаток [10]

Загалом представлені лопатеві шнекові змішувачі забезпечують високі якісні показники процесу змішування, проте споживають значну кількість енергії на виконання процесу та мають високу собівартість виготовлення порівняно з іншими представниками шнекових змішувачів.

Для змішування різних типів матеріалів, в тому числі зволжених, використовують комбіновані спіральньо-лопатеві шнекові робочі органи у конструкціях шнекових змішувачах. На рис. 1.6 а представлено такий шнековий змішувач моделі ШС-200 фірми ТОВ «ТКС СЕРВІС» [14], на рис. 1.6 б спіральньо-лопатеві шнекові робочі органи фірми ТОВ «ВОДРЕМ» [15].

Проте слід враховувати, що конструктивно такі комбіновані спіральньо-лопатеві шнеки є складними у виготовленні, що значно піднімає їх собівартість, а переміщення матеріалів на різних їх ділянках відбувається нерівномірно, що негативно впливає на продуктивність процесу.



а)



б)

Рис 1.6. Комбіновані спіральньо-лопатеві шнекові змішувачі: а) фірми ТОВ «ТКС СЕРВІС» [14]; б) фірми ТОВ «ВОДРЕМ» [15]

Значного використання набули шнекові змішувачі з вертикальним розташуванням гвинтових робочих органів. Особливо широко їх використовують для отримання комбікормів і кормосумішей у сільськогосподарському виробництві як самостійні засоби, так і в комплексі з дробарками зерна, або в лініях виробництва різних типів (розсипних, плющених, гранульованих тощо) комбікормів.

На рис. 1.7 а зображено типового представника такого шнекового кормозмішувача моделі НВ-500 компанії «Greens» [16], який до 15 хв. при затратах потужності електродвигуна 2,2 кВт забезпечує задовільне виготовлення в об'ємі 1100 л комбікорму масою до 500 кг. Кормозмішувач моделі НВ-500 являє собою вертикальний циліндричний бункер, з розташованим в основі конусом, всередині якого встановлений вертикальний шнек. До нього зверху закріплюються мішки аспірації, через які випускається повітря і утримується пил. Кормозмішувач оснащено засобами подачі сировини всередину і вивантаження назовню. При виконанні процесу відповідні дозовані харчові компоненти одночасно чи послідовно подаються в змішувач, а необхідні добавки в спеціальну бічну кишеню [16]. Після змішування суміш вивантажують через бічний патрубок.

На рис. 1.7 б представлено вертикальний шнековий змішувач з двома різнонаправленими шнеками різних діаметрів [17]. Він складається з рами 1 та циліндричного корпусу 2. В останньому співвісно одна в одній встановлені гвинтові спіралі 3 і 4 з протилежно направленими витками. Шнековий змішувач включає механізм завантаження 5 і розвантаження 6, а також у його верхній та нижній частинах закріплені електроприводи 7 і 8 гвинтових спіралей 3 і 4. Завантажування компонентів у циліндричний корпус 2 проходить через механізм завантаження 5, а вивантаження, після їх змішування гвинтовими різнонаправленими спіралями 3 і 4, з допомогою механізму розвантаження 6. При цьому електроприводами 7 і 8 можна почергово змінювати рух спіралей у різних напрямках, забезпечуючи змішування.

Слід зазначити, що розглянуті конструкції не забезпечують

транспортування змішаних сумішей у потрібному напрямку, а виконують лише процес змішування, що потребує їх агрегування з додатковими транспортерами.

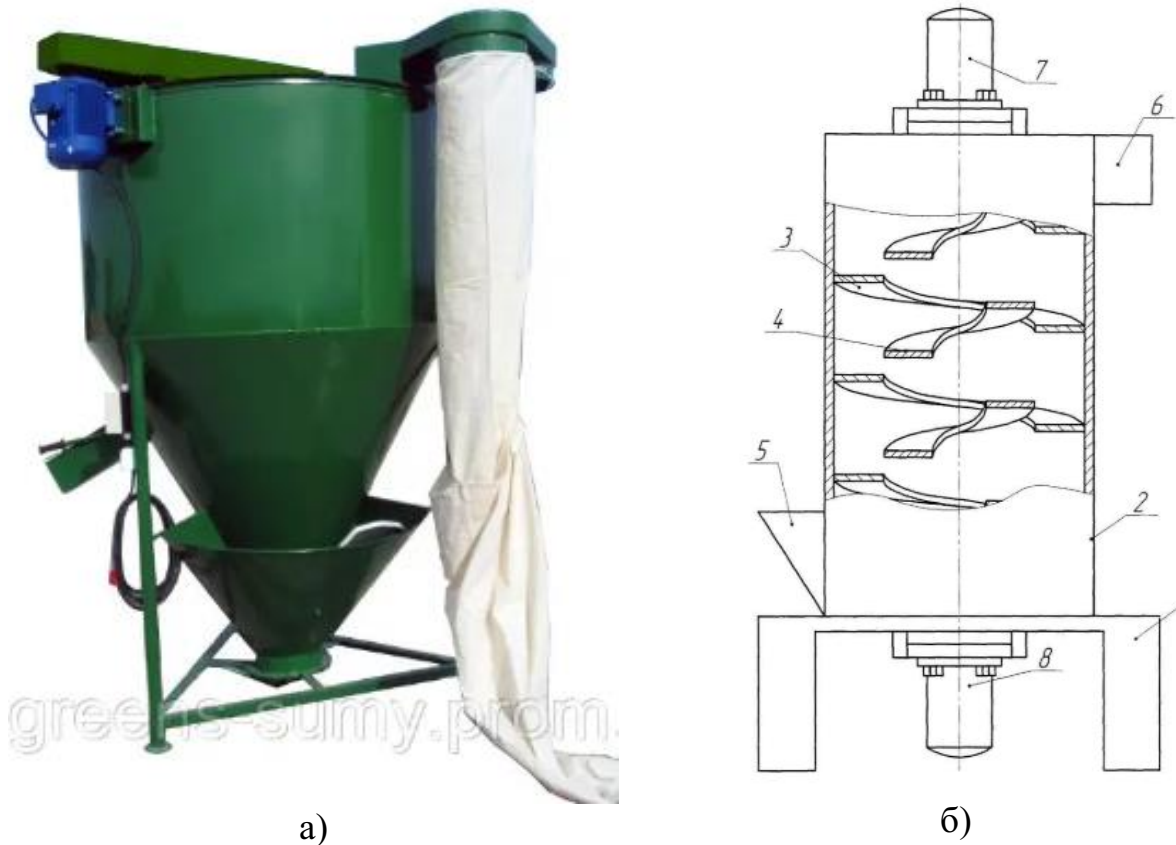


Рис 1.7. Вертикальні шнекові змішувачі: а) з одним шнеком [16]; б) з двома різнонаправленими шнеками різних діаметрів [17]

Існує ціла гамма шнекових кормозмішувачів, що також виконують функцію кормороздавачів, які після приготуванні необхідних сумішей можна переміщувати до годівниць і рухаючись забезпечувати роздавання кормів. Як правило такі шнекові кормозмішувачі для великої рогатої худоби для виконання операції змішування оснащені конусоподібними шнеками. На рис. 1.8 представлено кормозмішувачі фірми ТОВ «Демі-мікс-Україна» [18] з одним Demi-mix 12 (рис. 18 а) і двома Demi-mix 14 шнеками (рис. 18 б), конструкції яких оснащені ножами для подрібнення та перемішування різних типів кормів, що приводяться в обертний рух від валу відбору потужності трактора. Якщо

об'єм бункера є більший 12 метрів кубічних, то кормозмішувачі Demi-mix оснащують двома шнеками.

Негативною стороною даних шнекових змішувачів є їхня низька універсальність і неможливість використання при змішуванні різних типів продуктів.



а)



б)

Рис 1.8. Вертикальні кормозмішувачі фірми ТОВ «Демі-мікс-Україна» [18]:
а) Demi-mix 12 з одним шнеком; б) Demi-mix 14 з двома шнеками

Також вертикальні шнекові змішувачі широко використовуються у фармацевтичній, хімічній, харчовій та переробній промисловості. На рис. 1.9 зображено вертикальний шнековий змішувач фірми ТОВ «Сайленс» [19] (постачальник PHARMIX (Чехія)). Даний тип змішувачів призначений для перемішування як сипучих сумішей, так і сумішей із додаванням певної кількості рідини для грануляції продукту. Він оснащений планетарно-

шнековою мішалкою, у якій шнек приводиться в обертовий рух від приводу через водило (рис. 1.9 б), і який здійснює два рухи - обертання навколо своєї осі та обертовий рух по внутрішній поверхні конічного корпусу змішувача, забезпечуючи перемішування багатокomпонентних сумішей.

Недоліком даної конструкції є складне виконання приводу шнека, висока металоємність і можливість утворення «мертвої зони» по центру змішувача.

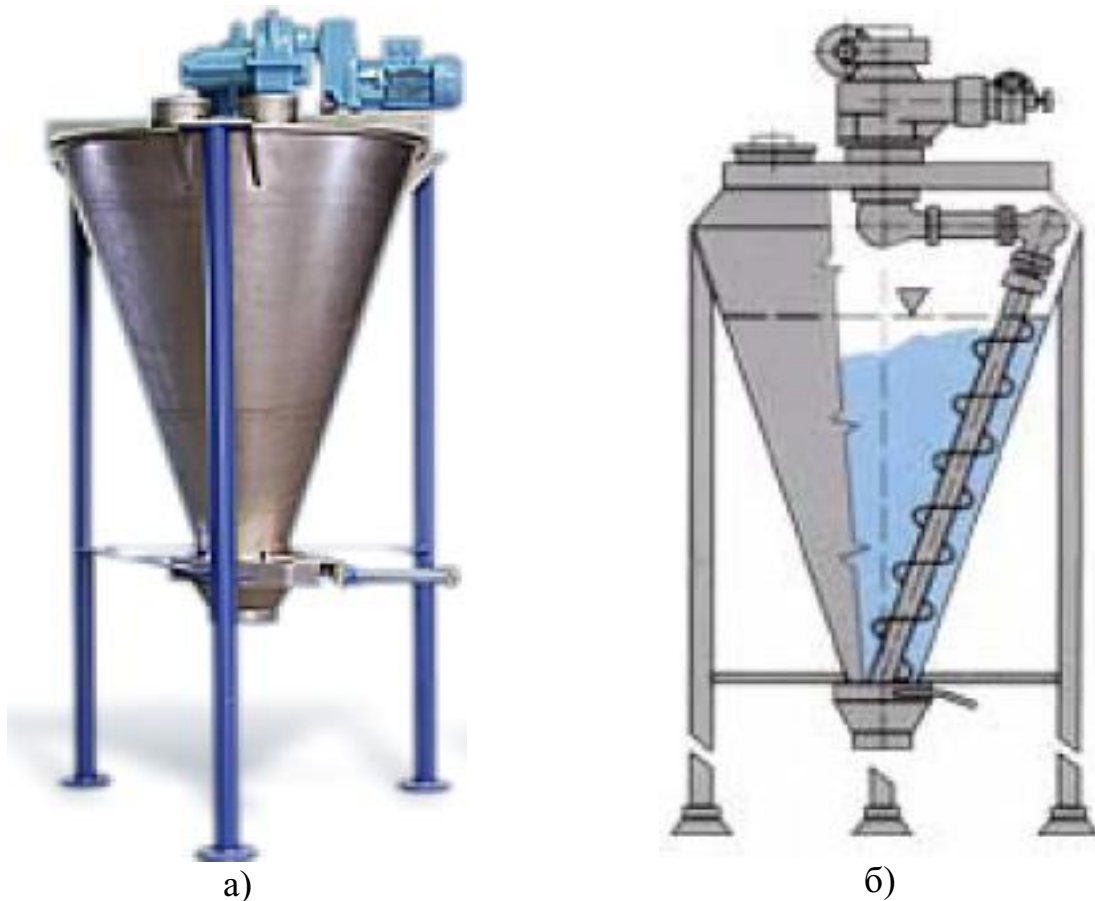


Рис 1.9. Вертикальний шнековий змішувач фірми ТОВ «Сайленс» [19]:
а) загальний вигляд; б) конструктивна схема

Дещо досконалішу конструкцію такого типу змішувачів пропонує компанія Shanghai Shenyin Machinery Group Co [20] (змішувачі серії VSH з об'ємом від 100 до 3000 літрів) На рис. 1.10 а представлений конструкція Stand Mixer (VSH-A), а на рис. 1.10 б Vertical Ribbon Blender (VJ) компанії Shanghai Shenyin Machinery Group Co [20].

Змішувач, зображений на рис. 1.10 а, складається з конічного корпусу, у верхній частині якого встановлено електродвигун, що приводить через водило в

обертний рух два шнеки. Ці шнеки розташовані один на проти одного і є більшої довжини (з меншим кроком і зовнішнім діаметром) та меншої довжини (з більшим кроком і зовнішнім діаметром), і аналогічно, як і в попередньому випадку (рис. 1.9), здійснюють два рухи - обертання навколо своєї осі та обертний рух по внутрішній поверхні конічного корпусу змішувача.

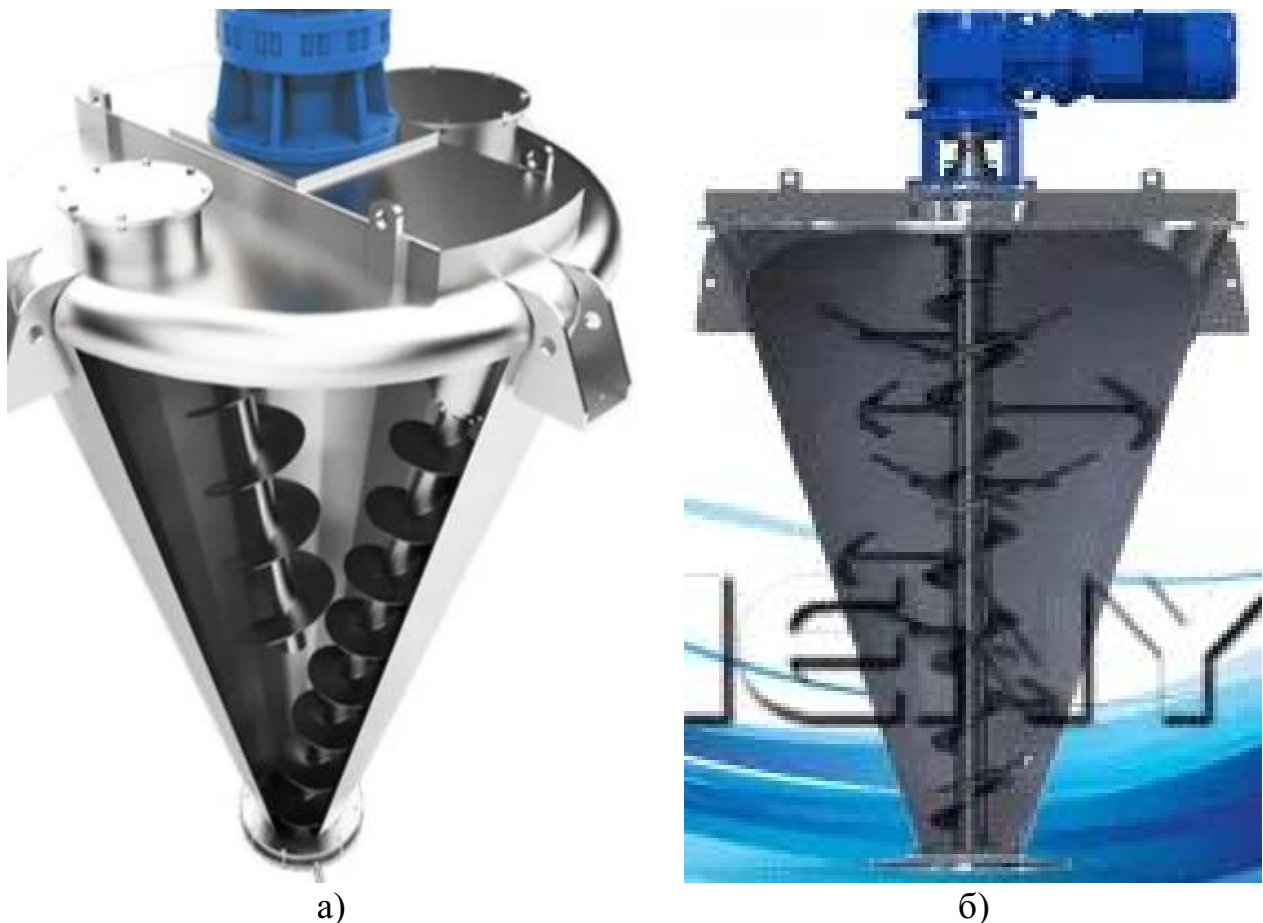


Рис 1.10. Вертикальний шнековий змішувач фірми ТОВ «Сайленс» [20]:
а) загальний вигляд; б) конструктивна схема

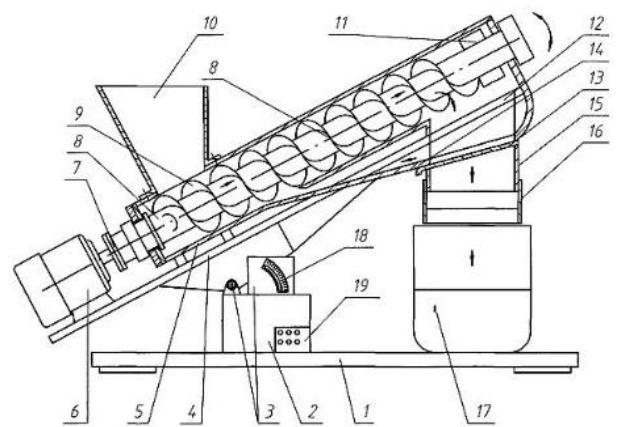
Змішувач, зображений на рис. 1.10 б, містить шнек досить складної конфігурації (лопатевий з вирізами), який приводиться в рух електродвигуном, який встановлено у верхній частині конічного корпусу.

Недоліком даних змішувачів (рис. 1.10) є висока металоємність і складність конструкцій (механізму в цілому та шнекових робочих органів зокрема), що призводить до їх значної ремонтоскладності, собівартості та ненадійності в роботі.

У нахилених гвинтових змішувачів (рис. 1.11) кожух з шнеком розміщуються під певним кутом до горизонту. Кут нахилу змішувача регулюється в залежності від можливості забезпечення високих якісних показників виконання процесу змішування та конструктивних особливостей. Загалом при зростанні кута нахилу змішувача якість процесу підвищується, що пояснюється частковим зсипанням змішуваних компонентів в процесі їх переміщення та додатковим перемішуванням. Проте занадто високий кут нахилу негативно впливає на продуктивність процесу. На рис. 1.11 представлено конструкцію гвинтового змішувача з пересипом [21, 22], який виконано у вигляді підставки 1 з опорою 2 та механізмом регулювання кута нахилу 3, до якого закріплено корпус 4 з кожухом 5 та електродвигуном 6. Електродвигун 6 через запобіжну муфту 7 з'єднаний з валом 8, на якому закріплено шнек 9, а у верхній частині якого закріплено лопатки 11, що забезпечують вивантаження змішаних сумішей через патрубок 12, який перекривається шибером 13. Зверху на кожусі 5 встановлено бункер 10. Верхня частина кожуха виготовлена бочкоподібної форми 14, що забезпечує просипання матеріалу при змішуванні у в нижню частину при закритому шибері.



а)



б)

Рис. 1.11. Гвинтовий змішувач з пересипом [21, 22]:
а) загальний вигляд; б) конструктивна схема

Відтак операція змішування гвинтовим змішувачем з пересипом (рис. 1.11) при відкритому чи закритому (циклічний режим роботи) шибері здійснюється як супутня, при транспортуванні вантажів, або як головна, коли шнековий механізм використовується лише для перемішування суміші.

Дещо іншим у конструктивному виконанні є гвинтовий змішувач з замкнутим циклом роботи (рис. 1.12) [23], який складається з двох спарених шнеків 6 із протилежним напрямком витків, що приводяться в рух від одного електроприводу 8 за допомогою ланцюгової чи іншої передачі 14. Шнеки 6 розташовано у двох спарених кожухах 3, які на краях між собою з'єднані перевантажувальними вікнами 4 і 5. Операція змішування змішувачем з замкнутим циклом роботи (рис. 1.12) [23] здійснюється аналогічно, як і у попередньо проаналізованому змішувачі (може виконуватись періодичної і неперервної дії) Вона передбачає кругову подачу і змішування окремих матеріалів або по замкнутому циклу (періодичної дії), до настання відповідної однорідності суміші, або в неперервному режимі, коли шибери 17 і 19 бункера 16 і вивантажувального вікна 18 постійно відкриті.

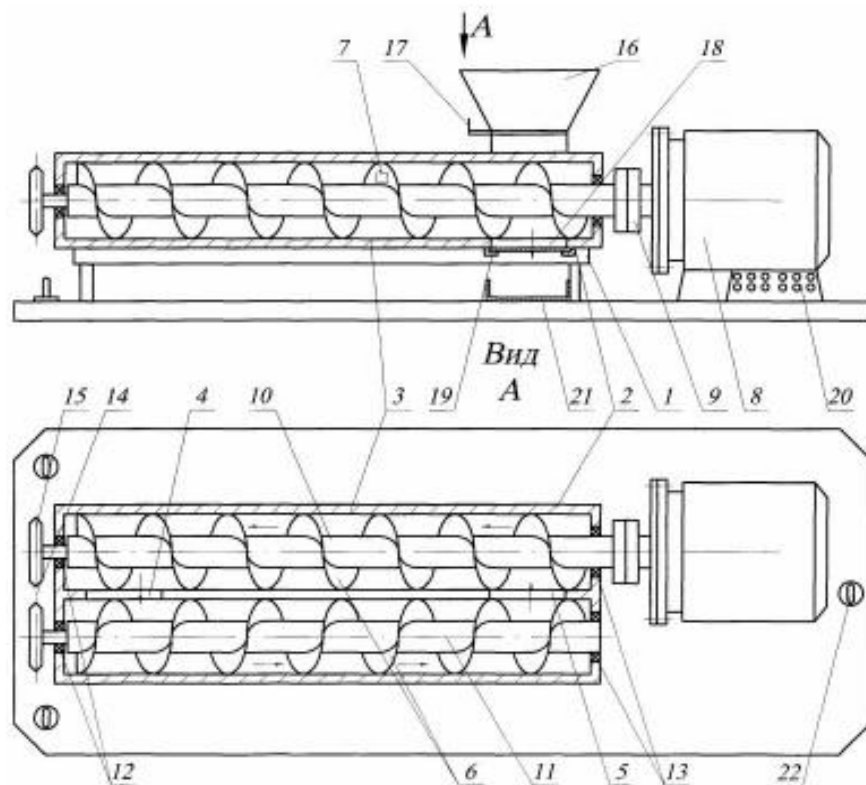


Рис. 1.12. Гвинтовий змішувач з замкнутим циклом роботи [23]

До недоліків розглянутих конструкцій гвинтових змішувачів з замкнутим циклом роботи (рис. 1.11 і рис. 1.12) слід віднести високу металоємність і собівартість, а до позитивного фактору, який відрізняє їх від попередньо розглянутих, можливість періодичного і неперервного виконання процесу змішування.

Також існує цілий ряд гвинтових змішувачів з вібраційною складовою [24-27]. Вони забезпечують високу степінь змішування компонентів, проте є ненадійними в роботі і потребують частих ремонтів через значну кількість поломок за рахунок частих ударних навантажень.

Провівши аналіз, можна зробити висновок, що на практиці для виконання операції змішування шнековими змішувачами в залежності від типу змішувача і змішувальних компонентів використовують як суцільні (стандартні) шнеки, так і гвинтові робочі органи стрічкові, лопатеві, конусоподібні, з вирізами та загинами [2, 3, 5-11, 13-15, 18, 20].

1.2. Аналіз результатів досліджень гвинтових транспортно-технологічних механізмів з функцією змішування

Дослідженню гвинтових транспортно-технологічних механізмів, у тому числі з функцією змішування, присвячені праці багатьох вчених, зокрема С. Бабарики [28-31], В. Барановського [32-34], В. Богацького [35], А. Бойка М. [36, 37], Брагінця [38], В. Васильківа [39-45], А. Вітрового [46-49], Б. Гевка [1, 41, 50-54], І. Гевка [3-5, 21, 54-73], Р. Гевка [49, 73-79], Гриця Ю.В. [80, 81], Р. Грудового [83-84], В. Гудя [2, 6, 85-89], О. Гурика [55, 90-92], Д. Дмитріва [88, 93, 94], А. Дячуна [3, 5, 58, 70, 95-98], С. Залуцького [73, 99, 100], Ф. Іванченка [101], Ю. Капаціли [56, 102], В. Куликівського [102], Р. Лещука [57, 63, 104, 105], В. Ловейкіна [105, 106], О. Ляшука [3, 61, 65-68, 73, 85, 108-110], М. Клендія [111], В. Паньківа [112, 115], А. Піка [49, 61, 62, 113], М. Пилипця [1, 29, 41, 43, 48, 114, 115], І. Ревенка [38], О. Рогатинської [4, 106, 107, 116], Р. Рогатинського [1, 3-5, 88, 121-125], А. Станька [60, 73, 126, 127] та значної

кількості інших. Вони проводили дослідження багатьох аспектів функціонування різнотипових шнекових механізмів у розрізі їх взаємодії із різними середовищами з визначенням їх оптимальних режимів роботи та раціональних конструктивних параметрів.

Зокрема, Гевком Б.М. запропоновано визначення продуктивності шнекових механізмів [50]:

$$Q = \psi \varphi_0 \left(1 + \sqrt{1 - \varphi_0}\right) \pi D_{\text{жс}}^3 \omega \frac{0.5 \pi D_{\text{жс}} P \left(1 + \sqrt{1 - \varphi_0}\right) - \mu_1 P^2}{16 \left[T^2 + 0.2 \pi^2 D_{\text{жс}} \left(1 - \sqrt{1 - \varphi_0}\right)\right]}, \quad (1.1)$$

де ψ - коефіцієнт швидкості потоку з врахуванням ступеня перекриття жолоба шнековою спіраллю; φ_0 - коефіцієнт завантаження; $D_{\text{жс}}$ - прохідний діаметр кожуха; P - крок шнекової спіралі; ω - частота обертання шнекової спіралі; μ_1 - коефіцієнт тертя матеріалу по гвинтовій поверхні шнекової спіралі.

Рогатинським Р.М. виведено аналітичні залежності визначення швидкості транспортування та питомих енерговитрат при переміщенні сільськогосподарських вантажів гвинтовими механізмами [121]:

$$v_z = \frac{\omega p}{2\pi} \left[\frac{\text{tg}\beta_1}{\text{tg}\alpha + \text{tg}\beta_1} + \frac{\text{tg}\beta_2}{\text{tg}\alpha + \text{tg}\beta_2} \right]; \quad (1.2)$$

$$w = \frac{N}{QL} = g \sin \alpha + \frac{\mu_2 r_0 \omega_0^2}{\sin \beta} \left[1 + \frac{\mu_1 \sin 2\beta_0}{\sin^2 \alpha + \mu_1 \cos 2\alpha} \right] + \xi(P), \quad (1.3)$$

де ω - кутова швидкість гвинта; p - крок гвинта; β_1 та β_2 - крайні значення кута підйому траси; α - кут нахилу спіралі; N - розрахункова потужність; Q - ваговий розхід; L - довжина траси транспортування; μ_1 і μ_2 - коефіцієнти тертя вантажу до поверхонь спіралі і жолоба; ω_0 - кутова швидкість центру поперечного потоку матеріалу в жолобі конвеєра в переносному русі; r_0 - насипна густина вантажу; β - кут нахилу гвинтової траси; $\zeta(P)$ - дисипативна функція, що враховує витрати на перемішування.

Іванченком Ф.К. швидкість переміщення вантажу гвинтовим робочим органом запропоновано визначати за формулою [101]:

$$v = p \cdot n_g / 60, \quad (1.4)$$

де p – крок гвинтового робочого органа, мм; n_g - частота обертання гвинтового робочого органа, об/хв.

Дерев'янком Д.А. виведено залежність швидкості руху сільськогосподарських (зернових) матеріалів між витками шнека [128]:

$$V_n = \frac{t_{pn} \cdot n \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\alpha + \varphi)}{60 \cdot \cos \varphi}, \quad (1.5)$$

де α – кут підняття на гвинтовій кромці, град; φ – кут обвалення насіння з гвинта при русі, град.; n – частота обертання шнека, хв.⁻¹.

Також дослідженню процесів транспортування зерна гвинтовими робочими органами займався Грудовий Р.С. [83], який пропонував визначати довжину і діаметр робочої частини шнека за формулами:

$$L = D \cdot k_{T1} \left(i + \frac{k_{T2} - k_{T1}}{k_{T1}(i-1)} \sum_{i=1}^i (i-1) \right). \quad (1.6)$$

$$D = D_b \cdot s_1, \quad (1.7)$$

де D_b – діаметр шнека, м; k_{T1} - співвідношення діаметрів патрубку та шнека.

Проте у цих працях основна увага була сконцентрована на продуктивності шнекових механізмів та швидкості переміщення матеріалів шнековими спіралями, а процесам змішування не приділялось достатньо уваги. Більш глибоко ці процеси опрацьовані Рогатинським Р.М. [3-5, 88, 122], Гевком І.Б. [3-5, 21, 55-61, 70, 88], Ляшуком О.Л. [3, 61, 110], Гудьом В.З. [2, 6, 57, 59, 88], Братішком В.В. [129], Гуриком О.Я [55, 90] і Дмитрівим Д.В. [93], Грицаєм Ю.В. [80], Марунічем О.П. [61, 130] та багатьма іншими.

Зокрема Братішком В.В. встановлено [138], що процеси змішування при виготовленні гранульованих комбікормів відносяться до процесів, де показник якості виконання процесу асимптотично наближається до певного значення при зростанні тривалості операції, а також те, що інтенсивність зміни показника якості змішування знижується зі зростанням тривалості процесу.

Часовим Д.Л. [140] виведено залежність для визначення мінімальної кутової швидкості полого нахилених гвинтових робочих органів оснащених лопатями, які використовуються для змішування компонентів сумішей, при якій можливе переміщення сумішей при різних коефіцієнтах заповнення кожуха:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{-g \cos\left(\frac{\beta}{0,75} + \alpha + \rho_v\right)}{r\mu_k \cos(\alpha + \rho_v)}}, \quad (1.8)$$

де $\beta \leq 45^\circ$ – кут нахилу шнека з лопатями до горизонту, град.; α – кут підйому гвинтової лінії, град.; ρ_v – кут тертя між транспортованим матеріалом та гвинтовою поверхнею, град.; r – зовнішній радіус спіралі, мм; μ_k – коефіцієнт тертя між транспортованим матеріалом та кожухом.

Маруничем О.П. [130] було проведено дослідження багатофункціонального гвинтового конвеєра, який застосовувався як для транспортування, так і для змішування сипких матеріалів. Ним отримано аналітичні залежності [130] для визначення зміни зовнішнього радіуса конусоподібного шнека та внутрішнього радіуса кожуха з врахуванням поступового їх зростання по усій довжині. Було встановлено [130], що приріст радіуса переміщення транспортованого матеріалу на кожному витку конусоподібного шнека має суттєвий вплив на зростання швидкості його переміщення, що, в свою чергу, значно покращує процес змішування багатокомпонентних сумішей. Маруничем О.П. встановлено [130], що збільшення приросту радіуса переміщення суміші на окремому витку в межах

від 1 мм до 5 мм призводить до зростання швидкості її переміщення в межах від 1,28 разів до 2,44 рази. Також при проведенні експериментів було встановлено [130], збільшення кроку, зростанні конусності гвинтового робочого органу та зменшенні частоти його обертання, максимальний коефіцієнт неоднорідності змішування становив 11,8 %. При збільшенні частоти обертання конусоподібного гвинтового робочого органу від 200 об/хв. до 500 об/хв. відбувалося зростання коефіцієнта неоднорідності змішування суміші в 1,07 рази [130]. При цьому збільшення конусності гвинтового робочого органу від 1 до 2 градусів призводило до зменшення коефіцієнта неоднорідності суміші в 1,12 рази. Також зміна приросту кроку шнека на кожному послідовному витку до 0,01 м забезпечила зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,04 рази [130]. Було встановлено [130], що коефіцієнт неоднорідності змішування суміші конусоподібним гвинтовим робочим органом є в 1,38 рази вищим, ніж коефіцієнт неоднорідності змішування суміші при її змішуванні гофрованим конусним шнеком при частоті обертання від 200 до 270 об/хв., що доводить ефективність використання гофрованих поверхонь при змішуванні шнеками.

Гевком І.Б. було проведено ряд експериментальних досліджень якості змішування сільськогосподарських матеріалів (ключовий компонент - зерно вики (20%) умовний компонент - зерно вівса (80%)) окремими типами шнекових змішувачів з різними гвинтовими робочими органами з коефіцієнтом завантаження патрубків від 0,3 до 0,5 [21]. Встановлено, що при використанні стрічкових шнеків у жорсткому транспортері-змішувачі найкраща неоднорідність суміші (10,5 %) досягається при мінімальному коефіцієнті завантаження (0,3) та величині зазору між валом і витком 16 мм (зовнішній діаметр шнека 150 мм), а зростання коефіцієнта завантаження і зменшення величини зазору призводить до погіршення її якості [21]. При використанні змішувача з пересипом на покращення процесу змішування суттєвий вплив має збільшення часу виконання операції та зменшення коефіцієнта завантаження кожуха, але при тривалому виконанні операції змішування (до 3 хв.)

неоднорідність суміші стабілізується [21]. Також Гевком І.Б. було встановлено, що змішування компонентів гнучкими шнеками забезпечує дещо кращий результат у порівнянні із жорсткими [21]. Проте на якість змішування гнучкими шнеками впливає значно впливає довжина магістралі конвеєра.

Дослідженням змішування сільськогосподарських матеріалів гвинтовими транспортерами-змішувачами займались Гурик О.Я [90] та Дмитрів Д.В. [93], які розробили дифузійну і коміркову математичні моделі для визначення параметрів процесу змішування і транспортування компонентів у таких змішувачах. Гуриком О.Я [90] і Дмитрівим Д.В. [93] визначено коефіцієнти поздовжнього змішування із впливом окремих факторів на якість змішування при транспортуванні гвинтовими робочими органами, включаючи лопатеві. До недоліків розроблених ними конструкцій можна віднести значну матеріаломісткість і габаритні розміри, та неспроможність забезпечення високої результативності за один цикл змішування.

На основі розробленої і дослідженої дифузійної моделі процесів змішування Гуриком О.Я [90] було визначено коефіцієнт поздовжнього змішування (знаходиться в межах 900-2000). Було встановлено, що його ріст зумовлюється збільшенням просипання компонентів. Це дозволило отримати теоретичні залежності для визначення необхідної довжини шнекового змішувача, тривалості операції змішування тощо. Так, з умови заданої дисперсії часу перебування частинок у змішувачі, довжини шнекового змішувача визначається за формулою [90]:

$$L = \frac{\sqrt{2\bar{D}_{L_0}\bar{t}}}{S'}, \quad (1.9)$$

де \bar{D}_{L_0} - коефіцієнт поздовжнього змішування при відсутній зазору між валом і шнековою спіраллю; \bar{t} - середній час перебування частинок у змішувачі; $S' = 0,43S$, S - відносна дисперсія логарифму часу перебування частинок матеріалу у змішувачі.

Зменшенню довжини гвинтового робочого органу змішувача сприяє збільшення величини дисперсії S' та значення коефіцієнта поздовжнього змішування \bar{D}_L [90]:

$$L = \frac{T^3 \cdot \omega^3}{32 \cdot \pi^4 \mu_D^2 \cdot \bar{D}_{L0}}, \quad (1.10)$$

де T - крок спіралі; ω - кутова швидкість обертання спіралі; $\mu_D = \frac{Mc(t)_{\max}}{m}$ - коефіцієнт згладжування, який характеризує відношення вхідного збурення до відповідної вихідної величини; \bar{D}_{L0} - теоретичний коефіцієнт поздовжнього змішування.

Гуриком О.Я [90] розроблено теоретичні основи проектування лопатевого змішувача та проведено експериментальні дослідження ефективності його роботи. Було встановлено [90], що якість змішування стрічковими спіралями залежить від величини зазору між валом і внутрішньою торцевою поверхнею стрічкової спіралі, і при її збільшенні зростає. Також було встановлено [90], що стабільність процесу змішування залежить від коефіцієнту завантаження апарату та кроку спіралі, і при невисоких значеннях цих параметрів якість отриманої суміші покращується.

Гудьом В.З. були проведені дослідження процесів змішування сільськогосподарських матеріалів гвинтовим завантажувачем-змішувачем [6]. Зокрема було проведено дослідження згинальних та резонансних коливань шнека гвинтового транспортера-змішувача і моделювання змішування компонентів сипких сумішей у них [6]. Встановлено, що час тривалості операції змішування при проходженні довжини робочої магістралі L гвинтового транспортера-змішувача визначатиметься по формулі [6]:

$$t_L = \frac{\psi L}{\sqrt{gRP \operatorname{tg} \alpha}}, \quad (1.11)$$

де ψ - коефіцієнт просипання; L - довжини робочої магістралі; P - коефіцієнт

швидкохідності гвинтового транспортера-змішувача; R – радіус кожуха гвинтового транспортера-змішувача; α - кут підйому гвинтової поверхні, для змішувачів, $\alpha = 20 - 30^\circ$.

Розроблена модель процесу змішування сипких матеріалів забезпечила створення конструкції гвинтового транспортера-змішувача із лопатевим гвинтовим робочим органом, що дало можливість у 1,5 рази зменшити коефіцієнт неоднорідності суміші при зменшенні енерговитрат і металоємності конструкції, яка відбулася за рахунок скорочення довжини робочої магістралі в 1,5-2 рази у порівнянні з традиційними зразками гвинтових транспортерів-змішувачів [6].

Також Гудьом В.З. в результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено [6], що неоднорідність сумішей зростає прямопропорційно до частоти обертання лопатевих шнеків, а найвища неоднорідність існує при використанні класичних спіральних шнеків. Використання різнонаправлених лопатей із значним кутом відхилення у лопатевих шнеках забезпечує найменшу неоднорідність.

Оцінку якості змішування проводять за використання певних методів. Таких методів оцінки однорідності (неоднорідності) сумішей є досить багато. Найбільш розповсюджені проводять оцінку якості змішування за вмістом ключового компонента при умовному її поділі на два компоненти. Прийнято вважати, що головним критерієм оцінювання якості змішування суміші є коефіцієнт неоднорідності [38]:

$$V_C = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (1.12)$$

де \bar{c} - середнє арифметичне значення концентрації головного компонента в усіх n пробах суміші, %; c_i - концентрація головного компонента в i -й пробі суміші, %.

За різними оцінками ефективність операції змішування оцінюється

наступними показниками [5, 38]: «відмінно» - $V_c < 3,0\%$; «добре» - $3,0\% < V_c < 7,0\%$; «задовільно» - $7,0\% < V_c < 15,0\%$; «незадовільно» - $15,0\% < V_c$.

Аналіз результатів досліджень гвинтових транспортно-технологічних механізмів з функцією змішування показав, що існують широкі не використані можливості щодо створення ефективніших шнекових змішувачів, які можуть забезпечувати вищу однорідність сумішей за рахунок використання прогресивних конструктивних рішень.

1.3. Специфіка проектування шнекових змішувачів та їх робочих органів з використанням сучасних методів моделювання та синтезу

Специфіка проектування шнекових змішувачів та їх робочих органів базується на певних напрацюваннях і методиках, які були отримані у результаті теоретичних та експериментальних досліджень багатьох науковців і розробників [1-6, 21, 28-130]. Вихідними даними при проектуванні шнекових змішувачів є продуктивність та інші технологічні характеристики, функціональне призначення (транспортування і змішування чи лише змішування), якість виконання операції (отриманої однорідності суміші), конструктивні характеристики (габаритні розміри, довжина магістралі змішувача, розташування відносно горизонту робочого органу змішувача, маса, рухомість окремих частин змішувача тощо), особливості змішувальних компонентів (вологість, фракційність, густина, коефіцієнти тертя змішувальних компонентів тощо).

До основних конструктивних характеристик гвинтових змішувачів доцільно віднести:

- об'єм робочої камери (V), м²;
- зовнішній діаметр гвинтового робочого органу змішувача (D), мм;
- крок гвинтового робочого органу змішувача (p), мм;
- діаметр вала (внутрішній діаметр для стрічкових) гвинтового робочого органу змішувача (d), мм;

- частоту обертання гвинтового робочого органу змішувача (n) і можливість її зміни, об/хв.;
- довжину гвинтового робочого органу змішувача (L), м;
- коефіцієнт кроку гвинтового робочого органу змішувача (k), $k = p/D$;
- допустимий коефіцієнт заповнення змішувача (міжвиткового простору гвинтового робочого органу φ);
- величину зазору між зовнішньою поверхнею гвинтового робочого органу змішувача та внутрішньою поверхнею робочої камери, (Δ), мм;
- специфіку гвинтового робочого органу змішувача (кількість, кут розташування до горизонту; наявність і конфігурація лопатей, гофр, ножів-подрібнувачів, напрям спіралей гвинтового робочого органу змішувача і їх кількість, наявність і величина зазору між спіралями гвинтового робочого органу змішувача та валом, відсутність вала тощо).

Розробці різноманітних методів та моделей пошуку нових ідей технічного спрямування присвячені праці багатьох дослідників і зокрема Альтшуллера Г.С., Андрейчікова А.В., Белого І.В., Бірюкова Б.В., Буша Т.Я., Васильківа В.В., Григорєва Г.Р., Душинського В.В., Кіндрацького Б.І., Кузнецова Ю.М., Половінкіна А.І., Роках А.Г., Чуса А.В., Фінана І., Вонга Ф. та багато інших [39, 45, 131-138]. Пошук нових ідей при сучасному розвитку штучного інтелекту поки що належить людині. Це її творча діяльність найвищого рівня, яка немає чіткої систематизації та формалізації, і в основному базується на інтелекті, розумовій праці та інтуїції людини.

Загалом існує більше ста методів та моделей пошуку технічних рішень [134-136], спрощено їх розділяють на дві групи, а саме евристичні методи та методи з використанням машинної обробки інформації (ком'ютерні методи). Кузнецов Ю.М. [136] проводить поділ методів пошуку нових технічних ідей на чотири групи, а саме методи, які передбачають:

- перебір усіх можливих альтернативних варіантів рішень з аналізом особливостей конструкції технічного об'єкта (системні методи);
- генерування альтернативних варіантів рішень базуючись на асоціаціях,

активізації творчості, подолання парадигми тощо (асоціативні методи);

- виявлення технічних суперечностей у наявних технічних об'єктах і пошук можливих варіантів їх усунення (алгоритмічні або програмні методи);

- комбіноване використання системних, асоціативних та програмних методів (комбіновані методи).

В основному до цих груп входять евристичні методи. Але враховуючи те, що в останні роки відбувається швидкий розвиток штучного інтелекту, методи з використанням машинної обробки інформації будуть лише розвиватися і вдосконалюватися.

Коротко розглянемо існуючі методи пошуку нових технічних ідей. До формалізованих методів генерування технічних рішень відносять методи морфологічного аналізу. Також генерування структурних моделей технічного об'єкта проводять за допомогою типових математичних моделей, які використовують структурно-схемний та параметричний синтез [21, 34-36]. Ці методи передбачають перебір варіантів рішень з використанням різноманітних математичних моделей та методів [36], які в останні роки з розвитком програмування використовують повне перебирання цих варіантів з врахуванням накладених обмежень і забезпечення ефективності кінцевого результату. Вперше морфологічний аналіз був застосований у 1942 році швейцарцем Цвікі для побудови морфологічної матриці і перебору та аналізу усіх можливих варіантів скомбінованих із неї рішень при розробці ракет. Перевагою методу є багатоваріантність ідей, проте вона є також і його недоліком, позаяк створюється значна кількість несумісних варіантів технічних рішень, які потребують значних часових витрат на їх аналіз і відкидання. Загальна кількість згенерованих рішень при використанні морфологічного методу визначається за формулою [36]:

$$N = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_j = \prod_{j=1}^n K_j, \quad (1.13)$$

де n – характеристика; K_j – число альтернатив характеристики.

Для зменшення неефективних варіантів згенерованих за морфологічним методом рішень та скорочення часу на їх перебір метод синтезу ієрархічних груп було вдосконалено за рахунок їх розбивки на підгрупи. В цьому випадку кількість згенерованих рішень визначається за формулою [21]:

$$N = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1.14)$$

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.

До евристичних методів генерування технічних рішень відносять велику кількість методів, окремі з яких наведено нижче [135, 139]:

- «прямої мозгової атаки», який у 1939 році розробив американець Осборн для групового генерування значної кількості ідей;
- «зворотної мозгової атаки», розроблений Осборном для групового аналізу та відбору кращих із значної кількості ідей згенерованих завчасно методом «прямої мозгової атаки»;
- «ключових питань» (метод Сократа), який за допомогою набору спеціально складених питань в умовах невизначеності направляє пошукувача на пошук додаткової чи або впорядкування існуючої інформації для подальшого її аналізу та вироблення ефективного рішення;
- вільних асоціацій, аналогії, інверсії, які використовуються при мінімальній інформаційній підготовці і направлені на пошук ідей та рішень в залежності від асоціативних можливостей, аналізом та використанням в якості аналогів подібних технічних об'єктів, пошуку технічних рішень із аналізом зворотного ефекту тощо.

До методів заснованих на комбінаторному підході відносять [135]:

- метод організуючих понять (розроблений Ф. Ханzenом), який поетапно передбачає: встановлення організуючих понять і їх відмітних ознак; їх класифікація по ступеню важливості; порівняння організуючих понять з їх відмітними ознаками; оцінка ознак у відповідності до їх спеціальних вимог; комбінаторика цих ознак з метою створення кращих технічних варіантів;

- метод «матриць відкриття» (розроблений А. Модем), який передбачає синтез технічних варіантів при використанні морфологічної матриці, де також використовуються характеристики, що безпосередньо не стосується особливостей розроблюваної технічної системи;

- метод десяткових матриць пошуку (розроблений Р.П. Повилейко), який передбачає побудову десяткової матриці пошуку з характеристиками розроблюваної технічної системи і групами евристичних прийомів з подальшим її аналізом та генеруванням ефективних рішень. Причому до евристичних прийомів відносять адаптацію, неологію, мультиплікацію, інтеграцію, інверсію, диференціацію, динамізацію, аналогію, імпульсацію, ідеалізацію, а до показників характеристики фізико-механічні, геометричні, конструкційно-технологічні, енергетичні, економічні, експлуатаційні, безпеки, надійності і довговічності, стандартизації ті уніфікації, художньо-конструкторські (дизайну) і зручності при обслуговуванні.

До недоліків евристичних методів відносять їх не чітко визначений характер і часто хаотичність процесу дії. Але ці методи у повній мірі дозволяють використовувати людський інтелект, інтуїцію та набуті знання.

Для ефективнішої формалізації інформації використовують методи машинного пошуку рішень, які загалом передбачають чіткий алгоритм дії з використанням евристичних прийомів та автоматизацією дій з базами даних. На даний час такі методи бурно розвиваються і їх подальший прогрес напряму пов'язаний із розвитком штучного інтелекту.

1.4. Висновки

На основі проведеного аналізу зроблено наступні висновки:

1. Гвинтові шнекові змішувачі мають значне застосування у галузях сільськогосподарського виробництва, харчовій і переробній, будівництві, фармацевтичній, хімічній тощо. Часто операцію змішування при їх використанні реалізують як додаткову при переміщенні матеріалів, а також їх використовують лише за основним призначенням - змішування сипких, в'язких або напіврідких компонентів. До переваг гвинтових шнекових змішувачів відзначають їх конструктивну простоту, значну надійність при виконанні процесу, високу придатність для забезпечення показників екології та охорони праці, можливість виконання супутніх операцій, таких як подрібнення, дозування тощо.

2. Існує значне різноманіття гвинтових робочих органів шнекових змішувачів і часто вони визначають тип їх конструкцій. На практиці найбільше використовуються змішувачі з горизонтальним та вертикальним розташуванням шнеків, але також є часте використання з нахиленим розташуванням, з одно- та різнонаправленими спіралями, із спареними шнеками, шнекові змішувачі циклової дії тощо. Основними типами гвинтових робочих органів шнекових змішувачів є шнеки з валом і безвальні, стрічкові і лопатеві спіралі, конусоподібні шнеки, спіралі з вирізами та загинами, а також шнеки оснащені ножами-подрібнювачами.

3. Аналіз результатів досліджень гвинтових змішувачів показав, що існують широкі не використані можливості для створення ефективніших шнекових змішувачів, які можуть забезпечувати вищу однорідність сумішей за рахунок використання прогресивних конструктивних рішень. До таких конструкцій можна віднести шнекові змішувачі із обертовими кожухами, де відбувається різнонаправлений рух шнекової спіралі і кожуха, що забезпечує пригальмовування, перекидання і краще перемішування багатокomпонентних сумішей.

4. Дослідження гвинтових змішувачі із обертовими кожухами, де відбувається різнонаправлений рух шнекової спіралі і кожуха, не проводились, а тому подальший пошук доцільно спрямувати на проектування і вивчення таких конструкцій з їх теоретичним обґрунтуванням і експериментальним дослідженням, що дозволить отримувати вищу однорідність сумішей при їх створенні та використанні.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ГВИНТОВИМИ КОНВЕЄРАМИ-ЗМІШУВАЧАМИ З РЕГУЛЬОВАНОЮ ПОДАЧЕЮ

2.1. Дослідження горизонтальних гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом

Висока надійність, екологічність, можливість роботи в потокових виробничих системах та порівняно низька вартість прямоточних гвинтових конвеєрів-змішувачів є причиною широкого їх використання в агровиробництві, харчовій, хімічній, фармацевтичній промисловості та інших галузях виробництва для виготовлення сумішей [140]. Перевагою прямоточних шнекових змішувачів неперервної дії є те, що процес проходить безперервно, що забезпечує високу продуктивність змішування компонентів суміші та його легку автоматизацію. Проте інтенсивність перемішування у таких змішувачів, порівняно із періодичними, невисока і досягнення високих показників однорідності суміші досягається збільшенням часу перебування суміші у робочій зоні, що, як правило, призводить до збільшення довжини змішувачів, їх матеріало- та енергоємності. Зменшення вказаних показників забезпечується вибором раціональних параметрів та режимів роботи гвинтових конвеєрів-змішувачів, при яких реалізується зрив гвинтового потоку суміші та інтенсифікується її перелопачування. Проте, для зменшення довжини гвинтових змішувачів і, відповідно, їх матеріало- та енергоємності, необхідно розв'язати протиріччя, що полягає у забезпеченні належної кількості перелопачувань суміші при низькій осьовій швидкості потоку і, відповідно, малій довжині гвинтового конвеєра змішувача неперервної дії. Але через складність процесу, зокрема наявності обертових рухів, як спіралі шнека так і кожуха, та різних фаз переміщення суміші в робочому просторі, і, відповідно, зривів однорідних потоків, процес змішування у гвинтових конвеєрах-

змішувачах мало вивчений і потребує подальшого дослідження кінематики й динаміки транспортування та змішування, а також вибору оптимальних режимів роботи.

Розглянемо горизонтальний прямоточний гвинтовий конвеєр-змішувач із трубчатою циліндричною камерою діаметром D_0 та довжиною L , в якому суміш транспортується гвинтовим робочим органом (шнеком) зовнішнім діаметром D та кроком T . Виберемо циліндричну систему координат $O\rho\varphi z$, в якій вісь $O\rho$ на початку спрямована в напрямку дії земного тяжіння (вниз), вісь Oz спрямовано по осі гвинта, а розміщення довільної частинки суміші визначається радіальним ρ , кутовим φ та осьовим z параметрами.

Рівняння гвинтової поверхні (з лівою навивкою) в полярній системі координат в параметричному вигляді, згідно [3, 50], буде:

$$\rho_1 = u_1; \varphi_1 = v_1; z_1 = -Tv_1/(2\pi) = -cv_1. \quad (2.1)$$

Аналогічне рівняння циліндричної поверхні кожуха [140]:

$$\rho_2 = D_0/2; \varphi_2 = v_2; z_2 = u_2. \quad (2.2)$$

де u_i та v_i - відповідно лінійний і кутовий незалежні параметри кожної із поверхонь; $c = T/(2\pi)$ - параметр кроку гвинтової поверхні робочого органу.

Відповідно рівняння обертвих гвинтової поверхні транспортуючого гвинта та циліндричної поверхні кожуха [140]:

$$\rho_1 = u_1; \varphi_1 = v_1 + \omega_1 t; z_1 = -Tv_1/(2\pi) = -cv_1. \quad (2.3)$$

$$\rho_2 = D_0/2; \varphi_2 = v_2 + \omega_2 t; z_2 = u_2. \quad (2.4)$$

де ω_1 та ω_2 - відповідно кутова швидкість гвинтового робочого органу (спіралі) та трубчатого кожуха.

Для випадку тихохідних змішувачів із нерухомим кожухом і низьким коефіцієнтом заповнення φ_V робочого об'єму змішувача, основна частина вантажу (суміші) масою m під дією сили земного тяжіння буде ковзати вниз по

гвинту і транспортуватиметься в режимі тихохідного конвеєра із швидкістю $v_Q = c\omega_1$. Обертний кожух спричинятиме захват тіла волочиння в обертний рух та його перекидання через вал, що сприятиме перемішуванню суміші та підвищенню згладжувальної здатності змішувача, тобто підвищенню рівномірності розподілу компонентів як по об'єму так і в часі. Позначимо ймовірність захоплення шнеком довільного виділеного об'єму суміші як p . Тоді, ймовірність того, що виділений об'єм перекинеться через вал і не просунеться вперед, буде $q = 1 - p$. В зв'язку із перекиданням частини вантажу через вал весь потік матиме гвинтове переміщення і опосередкований кут підйому β лінії потоку до площини поперечного перетину гвинтового змішувача становитиме $\beta = \text{arctg}(p/q)$.

Розхід вантажу у такому змішувачі визначатиметься аналогічно гвинтовим конвеєрам [1, 3, 50, 141]:

$$Q = 0,25\pi\varphi_V\psi c\omega_1(D^2 - d^2), \quad (2.5)$$

де d - діаметр валу шнека; ψ - коефіцієнт, що враховує пересипання суміші через вал шнека та в зазорах між шнеком та кожухом, $\psi = p$.

При переході до гвинтового транспортування суміш зтягується у гвинтовий рух. В цьому випадку кожний виділений i -ий елемент (частинка суміші) об'ємом ΔV_i матиме швидкість [140]:

$$\bar{v}_i = \bar{v}_{\rho_i} + \bar{v}_{\alpha_i} + \bar{v}_{z_i} = \frac{d\rho_i}{dt} \bar{e}_\rho + \frac{\rho d\varphi_i}{dt} \bar{e}_\tau + \frac{dz_i}{dt} \bar{e}_z. \quad (2.6)$$

де \bar{e}_ρ , \bar{e}_τ , та \bar{e}_z - відповідно, радіальний, коловий та осьовий орти циліндричної системи координат $O\rho\tau z$.

Приймемо гіпотезу пошарового руху частинок (виділених об'ємів ΔV_i), при якому для довільної частинки з біжучим кутовим параметром $\varphi = \theta_i$ зберігатиметься постійний радіальний параметр, $\rho_i = \text{const}$, звідки $d\rho_i/dt = 0$.

Розглянемо рух частинки (виділеного об'єму ΔV_i) по нерухомій циліндричній поверхні (по кожуху $\rho_i \approx R$) під дією гвинта, що накладатиме в'язь на параметри частинки z та φ , яка задається залежністю $z_i = c \cdot \varphi_i$. Тоді траєкторію частинки можна однозначно описати біжучим кутовим параметром $\beta_i = \beta_i(t)$ - кутом підйому траєкторії до площини поперечного перерізу [140]:

$$\operatorname{tg}[\beta_i(t)] = dz_i / (c d\varphi_i) = v_{zi} / v_{\varphi_i}. \quad (2.7)$$

де v_{zi} та v_{φ_i} - відповідно осьова та колова складові швидкості гвинтового руху частинки.

За умови, що на виділений елементарний об'єм суміші ΔV_i накладаються відповідні в'язі від гвинта та кожуха, він матиме тільки одну ступінь вільності. За незалежний параметр приймемо кутове розміщення θ_i виділеного елементарного об'єму, $\theta_i = \nu_{li} + \omega_1 t$, де ν_{li} - кутовий параметр точки гвинтової поверхні, яка з ним контактує.

Із врахуванням накладених в'язей координати виділеного об'єму будуть $\rho_i = R$, $\varphi_i = \theta_i$, $z_i = z_i(\theta) = c(\omega_1 t - \theta)$. За умови постійної кутової швидкості гвинта, залежність (2.6) для визначення повної швидкості виділеного об'єму ΔV_i , буде $\bar{v}_i = R \dot{\theta}_i \cdot \bar{e}_r + c(\omega_1 - \dot{\theta}_i) \cdot \bar{e}_z$, де $\dot{\theta}_i$ - кутова швидкість гвинтового руху частинки.

Диференціальні рівняння руху частинки для гвинтового конвеєра наведено в [1, 3, 50]. Аналогічні рівняння руху можна записати для виділеного елементарного об'єму ΔV_i , який переміщається по поверхнях кожуха та гвинта під обертанням останнього. Для забезпечення зв'язків частинки із кожною поверхнею приймаємо, що $D = D_0$.

З використанням принципу Д'Аламбера рівняння руху для виділеного елементарного об'єму [140]:

$$\bar{N}_{1i} + \bar{F}_{1i} + \bar{N}_{2i} + \bar{F}_{2i} + \Sigma \bar{P}_{ij} + \bar{G}_i - m_i \bar{a}_i = 0, \quad (2.8)$$

де \bar{N}_{1i} , \bar{N}_{2i} та \bar{F}_{1i} , \bar{F}_{2i} - відповідно вектори сил нормальних реакцій поверхонь спіралі шнека та кожуха і сил тертя від їх дії (рис. 2.1), $F_{1i} = \mu_1 N_{1i}$, $F_{2i} = \mu_2 N_{2i}$; m_i - маса частинки; \bar{a} - абсолютне прискорення частинки; \bar{G}_s - вектор сили земного тяжіння; ΣP_{ij} - сума зовнішніх впливів зі сторони суцільного вантажу на поверхні виділеного об'єму. Тут μ_1 та μ_2 - коефіцієнти тертя ковзання частинки по поверхнях, відповідно, гвинта та кожуха.

Вектори \bar{N}_{1i} та \bar{N}_{2i} направлені перпендикулярно поверхонь, відповідно, гвинта та обертового кожуха, а вектори \bar{F}_{1i} та \bar{F}_{2i} розміщені в площинах, дотичних до поверхонь, відповідно, спіралі та кожуха в точці їх контакту із частинкою і направлені протилежно векторам відносної швидкості частинки щодо кожної із поверхонь, рис. 2.1. Вектор \bar{G} сили тяжіння на орти системи $O\rho\varphi z$ для горизонтального розміщення конвеєра розкладеється на складові $\bar{G}_i = m_i g (\cos \theta_i \cdot \bar{e}_\rho - \sin \theta_i \cdot \bar{e}_\tau)$.

Вектори рівнодійної нормальних реакцій кожної із поверхонь та їх складових від тертя в циліндричних координатах $O\rho\varphi z$ будуть $\bar{R}_i = \bar{N}_i + \bar{F}_i = \{\alpha_{\rho i}; \alpha_{\theta i}; \alpha_{z i}\}$, де $\alpha_{\rho i}$, $\alpha_{\theta i}$ та $\alpha_{z i}$ - відповідні коефіцієнти (суми направляючих косинусів векторів \bar{N}_i та \bar{F}_i , до ортів координатної системи) [140].

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \{\alpha_{\rho 1}; \alpha_{\theta 1}; \alpha_{z 1}\} = \{0; \sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha; \cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha\}; \\ \alpha_2 &= \{\alpha_{\rho 2}; \alpha_{\theta 2}; \alpha_{z 2}\} = \{1; -\mu_2 \cos \beta_{i2}; -\mu_2 \sin \beta_{i2}\}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де α - кут підйому гвинтової лінії спіралі при $\rho = R$; β_{2i} - кут нахилу траєкторії відносного руху частинки (вектора відносної швидкості \bar{v}_p) по поверхні обертового кожуха [140].

$$\begin{aligned} \sin \beta_{2i} &= c(\omega_1 - \dot{\theta}_i) / v_p; & \cos \beta_{2i} &= \rho(\dot{\theta}_i - \omega_2) / v_p; \\ \operatorname{tg} \beta_{2i} &= [(\omega_1 - \omega_2) / (\dot{\theta}_i - \omega_2) - 1] \cdot \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Відповідно, кут нахилу траєкторії β_i (рис. 2.2) в абсолютній системі координат $O\rho\varphi z$ визначається аналогічно гвинтовому конвеєру з нерухомим кожухом [1, 3, 50] за відомою кутовою швидкістю частинки $\dot{\theta}$ [140].

$$\sin \beta_i = c(\omega_1 - \dot{\theta}_i) / v; \quad \cos \beta_i = \rho \dot{\theta}_i / v_i; \quad \operatorname{tg} \beta_i = (\omega_1 / \dot{\theta}_i - 1) \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.11)$$

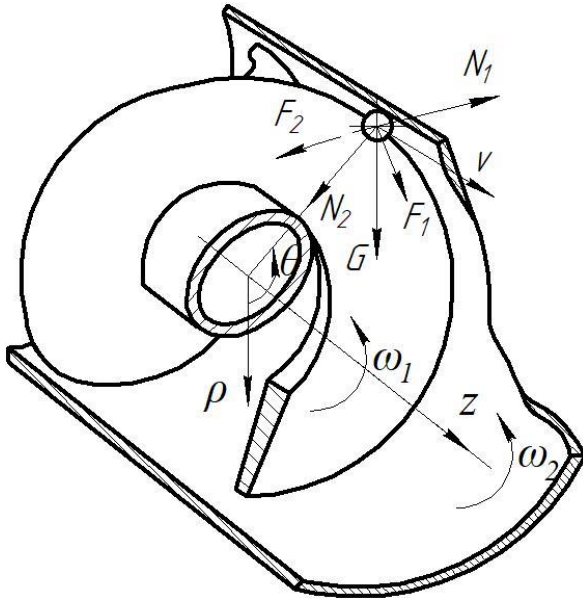


Рис. 2.1. Схема до розрахунку рівняння руху частинки у гвинтовому конвеєрі-змішувачі з обертовим кожухом

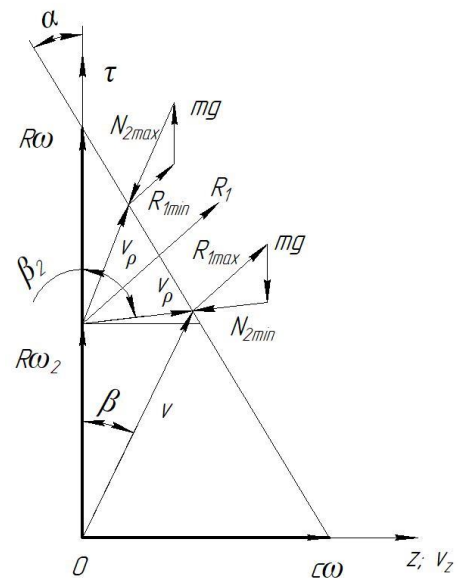


Рис. 2.2. Розрахункова схема до визначення кінематичних параметрів гвинтового конвеєра змішувача із обертовим кожухом

Вектор абсолютної швидкості частинки визначається як $\bar{v} = \bar{v}_T + \bar{v}_p$ частинки, де \bar{v}_T переносна швидкість, що відповідає коловій швидкості кожуха; $\bar{v}_T = \bar{v}_\tau = R\omega_2 \cdot \bar{e}_\tau$.

Для моделі однієї матеріальної частинки для тихохідних конвеєрів з нерухомим кожухом можливий стаціонарний її рух із параметром $\beta_i = \pi/2$, кутовою швидкістю $\dot{\theta} = 0_i$, лінійною швидкістю $v_{zi} = c\omega_1$ та постійним кутом θ_i , який у вибраній системі координат буде [140]:

$$\theta_i = \operatorname{arctg}[\mu_2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{\mu 1})], \quad (2.12)$$

де $\varphi_{\mu 1}$ - кут тертя частинки по поверхні спіралі $\varphi_{\mu 1} = \arctg \mu_1$.

Складові абсолютного прискорення частинки при її русі по поверхні обертового кожуха під дією спіралі будуть [140]:

$$a_{\rho i} = -\rho \dot{\theta}_i^2; \quad a_{\varphi i} = \rho \ddot{\theta}_i; \quad a_{zi} = \ddot{z}_i = T(\omega_1 - \dot{\theta}_i)' / (2\pi) = c(\dot{\omega}_1 - \ddot{\theta}_i), \quad (2.13)$$

де ρ - радіальний параметр частинки, $\rho = D/2$; θ , $\dot{\theta}$ та $\ddot{\theta}$ - відповідно кутові параметр, швидкість та прискорення частинки в системі $O\rho\varphi z$.

Розкладом векторного рівняння (2.8) руху частинки на координатні осі отримуємо систему рівнянь, що має вид, аналогічний як для гвинтових конвеєрів [3]:

$$\begin{aligned} -N_{2i} + m_i g \cos \theta_i + mR\dot{\theta}_i^2 &= 0; \\ (\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha) \cdot N_{1i} - \mu_2 \cos \beta_{2i} \cdot N_{2i} + \Sigma P_{\varphi i} + m_i g \sin \theta_i - m_i R \ddot{\theta}_i &= 0; \\ (\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha) \cdot N_{1i} - \mu_2 \sin \beta_{2i} \cdot N_{2i} + \Sigma P_{zi} - m_i c(\dot{\omega}_1 - \ddot{\theta}_i) &= 0. \end{aligned} \quad (2.14)$$

де $\Sigma \bar{P}_i$ - сумарна дія зовнішніх впливів від інших частинок, для випадку руху однієї частинки $\Sigma \bar{P}_i = 0$, для випадку багатьох частинок внутрішні сили врівноважуються в центрі ваги.

Для випадку стаціонарного процесу можна прийняти $\dot{\omega}_1 = 0$, $\dot{\omega}_2 = 0$, $\ddot{\theta}_i = 0$.

Тоді [140]:

$$\begin{aligned} N_{2i} &= m_i (R\dot{\theta}_i^2 + g \cos \theta_i); \\ \mu_2 N_{2i} \cos(\alpha + \varphi_1 + \beta_{2i}) &= m_i g \sin \theta_i \cos(\alpha + \varphi_1); \\ N_{1i} &= \frac{\mu_2 \sin \beta_{2i} \cdot N_{2i}}{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Із другого рівняння системи (2.15) [140]:

$$\beta_{2i} = \arccos \left[\frac{g \sin \theta_i \cos(\alpha + \varphi_1)}{\mu_2 (R\dot{\theta}_i^2 + g \cos \theta_i)} \right] - \alpha - \varphi_{\mu 1}, \quad (2.16)$$

В нижній частині конвеєра-змішувача ($\theta_i = 0$), вектор сили тяжіння спрямований по осі $O\rho$ і кут $\beta_{2i} = \pi/2 - \alpha - \varphi_{\mu 1}$. По мірі повороту кожуха і збільшення кута θ_i , значення кута β_{2i} зростає до 90° , коли частинка переміщається по твірній обертового кожуха (рис. 2.2 і рис. 2.3), а при дальшому зростанні кута θ_i , кут β_{2i} збільшуватиметься до тих пір, поки кут β_i в базовій системі координат не досягне значення $\beta_i \rightarrow \pi/2$ і окрема частинка не буде затягуватися кожухом в обертовий рух (рис. 2.3), а буде рухатись горизонтально.

З метою оцінки взаємовпливу частинок на процес їх переміщення, як системи, розглянемо два, поряд розміщених елементи вантажу (частинки) однакової маси $m_1 = m_2$ із кутовими параметрами, відповідно, φ_1 та φ_2 , і представимо їх як $\varphi_1 = \theta + \Delta_1$ та $\varphi_2 = \theta - \Delta_2$; де θ - кутовий параметр проміжної (серединної) точки розміщеної на кожусі між частинками; Δ_1 та Δ_2 - кутове зміщення кожної із частинок відносно проміжної точки, прийнемо $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$.

Розглянемо систему координат $O_c n t u$, центр якої розміщений в центрі мас C системи із двох частинок масою $m = m_1 + m_2$, вісь $O_c n$ проходить нормально до поверхні кожуха, вісь $O_c t$ - дотична до кола, проведеного через C , а вісь $O_c u$ колінеарна осі $O_c z$ системи $O\rho\varphi z$. Відповідно, кутовий параметр центру O_c співпадає з кутовим параметром центру мас θ_c . Для зв'язної суміші кути підйому близьких частинок будуть практично однакові ($\beta_{21} = \beta_{22}$), а тому у рівнянні (2.14) коефіцієнти (2.9) для кожної із двох частинок приймаємо однакові $\alpha_{11} = \alpha_{12}$ та $\alpha_{21} \approx \alpha_{22}$. Відцентрове прискорення кожної частинки $a_{\rho 1} = a_{\rho 2} = -\rho\dot{\theta}_i^2$. Для стаціонарного процесу прийнемо $a_{\dot{\theta}_i} = a_{\dot{\theta}_i} = 0$, а також для суміжних частинок $N_{11} = N_{12}$, $N_{21} = N_{22}$.

Тоді для системи двох частинок ($i \in \{1, 2\}$) рівняння руху буде [140]:

$$-N_{2i} \cos(\pm\Delta) + m_i g [\cos(\theta \pm \Delta)] + m_i R (\dot{\theta} \pm \dot{\Delta})^2 \cos(\pm\Delta) = 0;$$

$$\begin{aligned}
 (\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha)N_{1i} - \mu_2 \cos \beta_{i2} \cdot N_{2i} \pm P_i \sin \alpha + m_i g \sin(\theta \pm \Delta) &= 0; \\
 (\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha)N_1 - \mu_2 \sin \beta_{2i} \cdot N_2 \mp P_i \cos \alpha &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

Просумуємо по відповідних координатах складові системи рівнянь кожної із частинок $i=1$ та $i=2$ і позначимо рівнодійні реакцій спіралі та кожуха на систему як $N_1 = N_{11} + N_{12}$, $N_2 = N_{21} + N_{22}$. Приймаємо, що $\Delta \rightarrow 0$, і об'єднана система (із двох рівнянь (2.17) при $i=1$ та $i=2$) стає тотожною системі (2.15) відносно невідомих N_1 і N_2 та $\theta = \theta_C$. Виключенням N_1 і N_2 із системи (2.15) отримаємо рівняння стаціонарного руху системи двох (і більше) частинок, що задається параметром кута підйому $\beta_2 = \beta_{2C}$ траєкторії центра їх мас, і в якій замість маси однієї частинки ставиться маса системи m , а замість координат частинки приймаються координати центра мас $C(R_C; \theta_C; z_C)$ системи.

Аналіз (2.15) та (2.17) показує, що залежність (2.15) справедлива також для масиву із багатьох частинок, тобто виділеного потоку (тіла волочіння), де координати частинки відповідають координатам центру ваги тіла волочіння в умовах перехідних режимів із введенням відповідного коригуючого коефіцієнта. Відповідно, отримані результати для матеріальної частинки можна поширити на переміщення у гвинтовому змішувачі зв'язної суміші, де замість координат частинки використовують координати центра мас $C(R_C; \theta_C; z_C)$ системи. Тут R_C , θ_C та z_C - відповідно, радіальний, кутовий та осьовий параметри розміщення центра мас тіла волочіння з приведеними параметрами (рис. 2.4) та відповідними коригуючими коефіцієнтами, які визначаються експериментально.

Тоді порядок розрахунку кінематичних параметрів гвинтового транспортера-змішувача на ділянці безвідривного переміщення тіла волочіння буде наступним. Згідно (2.16), при рості кутового параметру $\theta = \theta_C$ тіла волочіння до певного значення, кут β_2 буде наближатись до $\beta_{20} \rightarrow \pi/2$ (рис. 2.2), де суміш рухатиметься по твірній кожуха. Згідно вибраного коефіцієнта заповнення φ_V конвеєра-змішувача визначають очікуване значення кутового

параметру розміщення центра тіла волочиння, і за графіком рис. 2.2 побудованого для конкретної кутової швидкості кожуха згідно заданого $\theta = \theta_C$ визначають значення $\beta_{20} = \pi/2$, як одне із можливих, яке використаємо для визначення уточненого значення β_2 як першу ітерацію. В цьому випадку $\dot{\theta} = \omega_2$ і значення зміни кута $\beta_{20}(\theta)$ як функції від кута θ визначається за залежністю, в яку входить радіус розміщення центра мас частинок тіла волочиння та поправочний коефіцієнт k_C , який враховує відмінності транспортування тіла волочиння та матеріальної частинки і визначається експериментально [140]:

$$\beta_{20}(\theta) = \arccos \left[\frac{\operatorname{tg} \theta \cos(\alpha + \varphi_1)}{\mu_2 \left(\frac{k_C R_C \omega_2^2}{g \cdot \cos \theta} + 1 \right)} \right] - \alpha - \varphi_{\mu 1}. \quad (2.18)$$

Тоді порядок розрахунку кінематичних параметрів гвинтового змішувача на ділянці безвідривного переміщення сипучого матеріалу буде наступним.

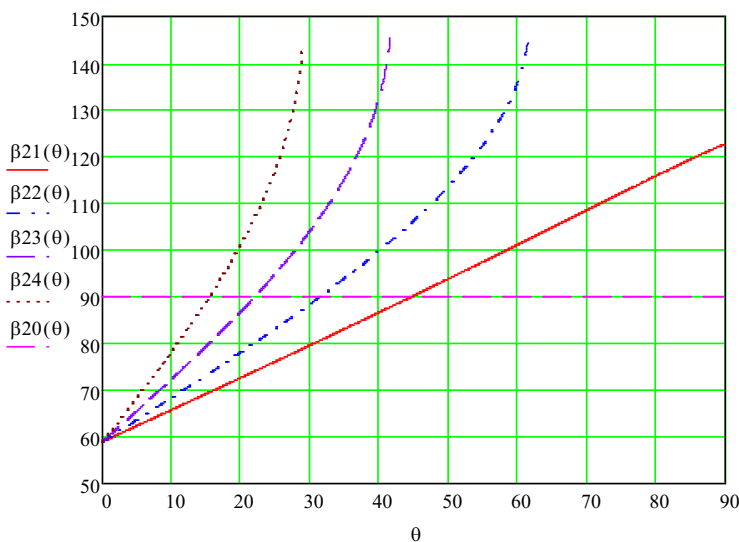


Рис. 2.3. Зміна кутів параметру β_2 підняття траєкторії частинки відносно обертового кожуха залежно від кута її розміщення θ для : 1 - $\omega_2 = 25,0 \text{ c}^{-1}$; 2 - $\omega_2 = 20,0 \text{ c}^{-1}$; 3 - $\omega_2 = 15,0 \text{ c}^{-1}$; 4 - $\omega_2 = 10,0 \text{ c}^{-1}$

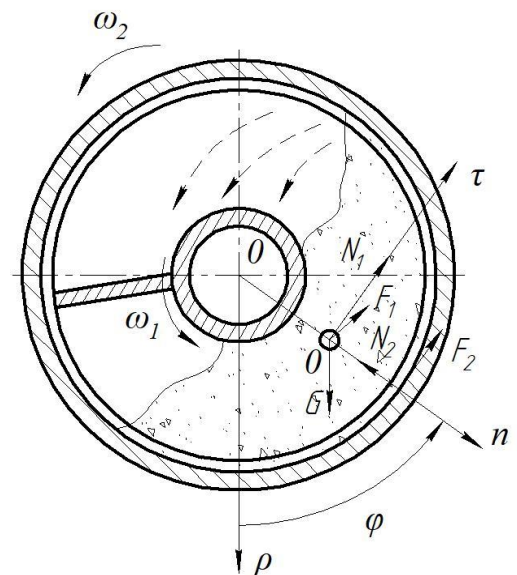


Рис. 2.4. Розміщення тіла волочиння сипучого вантажу в робочому просторі гвинтового конвеєра-змішувача

Із врахуванням (2.10), уточнена кутова швидкість центра ваги буде [140]:

$$\dot{\theta}_C = \frac{\omega_2 + \omega_1 \operatorname{ctg} \beta_{20} \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{ctg} \beta_{20} \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.19)$$

Підставляючи це значення замість ω_2 із залежності (2.18), отримуємо значення наступної ітерації $\beta_{2(j+1)} = \beta_{21}$. У випадку, коли $\beta_{21} > \pi/2$, рекомендується збільшити кутову швидкість обертання кожуха і знову повторити розрахунки для нового значення ω_2 (рис. 2.2).

За відомими кутовими швидкостями ω_1 і ω_2 та кутом підйому траєкторії центра тіла волочіння $\beta_2 = \beta_{21}$ визначаємо всі кінематичні параметри процесу (рис. 2.3). Так, відносна швидкість тіла волочіння із координатами центра $C(R_C; \theta_C; z_C)$ згідно (2.19) визначається за залежністю [140]:

$$v_p(\theta_C) = \frac{R_C(\omega_1 - \omega_2) \sin \alpha}{\sin[\alpha + \beta_2(\theta_C)]}; \quad (2.20)$$

Колова складова відносної швидкості становить [140]:

$$v_{p\varphi}(\theta_C) = \frac{R_C(\omega_1 - \omega_2) \sin \alpha \cos[\beta_2(\theta_C)]}{\sin[\alpha + \beta_{20}(\theta_C)]}. \quad (2.21)$$

Відповідно колова складова абсолютної швидкості тіла волочіння, від якої залежить ефективність змішування, буде функцією кутового параметру θ_C центра мас O_C [140]:

$$v_\varphi(\theta_C) = R_C \omega_2 + v_{p\varphi}(\theta_C) = R_C \omega_2 + \frac{R_C(\omega_1 - \omega_2) \sin \alpha \cos[\beta_2(\theta_C)]}{\sin[\alpha + \beta_2(\theta_C)]}. \quad (2.22)$$

Осьова складова швидкості тіла волочіння (відносна, вона ж абсолютна) [140]:

$$v_z(\theta_C) = \frac{R_C(\omega_1 - \omega_2) \sin \alpha \sin[\beta_2(\theta_C)]}{\sin[\alpha + \beta_2(\theta_C)]}. \quad (2.23)$$

Значення кута підйому β_0 гвинтової траєкторії суміші (за умови контакту із кожухом) в нерухомій системі координат буде [140]:

$$\beta_0 = \beta_0(\dot{\theta}) = \arctg[(\omega_1 / \dot{\theta} - 1) \operatorname{tg} \alpha] \quad (2.24)$$

Таке регулювання проводиться із врахуванням того, що тіло волочіння займає, залежно від коефіцієнту заповнення гвинтового-конвеєра змішувача, біля третини його робочого простору (рис. 2.4). Оскільки тіло волочіння суміші займає певний об'єм, то верхні його точки зміщені від осі On , яка проходить через центр мас O_C на кут $\Delta\theta_2$. Відповідно, в системі $O\rho\theta z$ ця точка матиме кутову координату $\varphi = \theta_2 = \theta_C + \Delta\theta_2$. Враховуючи те, що коловий рух робить весь масив суміші, то кутова швидкість кожної частинки буде практично однаковою $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_C$. Умовою відриву такої частинки масою Δm_2 від кожуха є переважання складової сил тяжіння частинки над складовою від відцентрових сил $N_2 \leq \Delta m_2 g$ і після спрощень - $R\dot{\theta}_2^2 / g \leq 1$. Із врахуванням (2.19) [140]:

$$\left(\frac{R_C \omega_2^2}{g} \right) \left[1 + \frac{(\omega_1 / \omega_2 - 1) \sin \alpha \cos[\beta_2(\theta_C)]}{\sin[\alpha + \beta_2(\theta_C)]} \right]^2 = \frac{k_\omega R_C \omega_2^2}{g} \leq 1 \quad (2.25)$$

де k_ω - коефіцієнт, що враховує рекомендований нахил траси суміші по обертовому кожуху, який задається кутом $\beta_2(\theta_C)$. Із залежності (2.25) визначають кутову швидкість кожуха ω_2 . Для забезпечення відриву частини тіла волочіння у заданій пропорції суміші, що перекидається через вал і суміші, яка залишається у попередній комірці, кутовий діапазон перекриття тіла волочіння, у якому $N_2 < 0$ розраховується за залежністю (2.25) із умови, що до 50% суміші має пересипатись через вал. Із умови забезпечення рівномірності змішування задається кількість циклів перелопачування n_u та визначається час проходження суміші у змішувачі $t_L = 2\pi n_u / \omega_2$. За відомою довжиною

змішувача L та часом t_L проходження суміші визначається максимальна лінійна швидкість проходження частини суміші [140]:

$$v_{max} = L_0 \omega_2 / (2\pi n_u). \quad (2.26)$$

Згідно (2.23) визначається кутова швидкість робочого органу $\omega_1 = \omega_2 + 2\pi v_{max} / T$. Розхід поточного гвинтового змішувача, аналогічно (2.5), буде [140]:

$$Q = 0,125 \varphi_V \psi T (\omega_1 - \omega_2) (D^2 - d^2). \quad (2.27)$$

Згідно [3, 88] нерівномірність змішування залежно від кількості циклів n_u перелопачування можна апроксимувати експоненціальною залежністю, складові (коефіцієнти та параметри моделі) якої визначаються експериментально [140]:

$$\xi = A(\varphi_0, \psi) e^{-kn_u} + \zeta. \quad (2.28)$$

де $A(\varphi_0, \psi)$ - складова що залежить від заповнення змішувача та ступеня пересипання суміші; k - коефіцієнт, що враховує реологічні властивості компонентів суміші, їх зв'язність; ζ - складова, що враховує часткове розділення компонентів суміші (сепарацію) під дією сили тяжіння та інших факторів.

Проведені дослідження показали, що використання прямоточних гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами дозволяє суттєво покращити основні характеристики процесу змішування та розширити сферу їх використання, зокрема у автоматизованих системах. Це обґрунтовується тим, що вказані конвеєри змішувачі дозволяють забезпечувати та регулювати всі основні параметри процесу змішування на одному обладнанні для сумішей різного компонентного складу з різними реологічними властивостями [140].

Встановлено [140], що ефективність перемішування суміші у прямоточних гвинтових конвеєрах-змішувачах визначається кількістю перелопачувань суміші

та співвідношенням частини суміші, що перекинулася через вал до частини, що зсунулась по гвинту. Показано, що стабільність процесу гвинтового переміщення суміші із подальшим зривом потоку та перелопачуванням забезпечується обертанням кожуха, яке запобігає переходу потоку до горизонтального транспортування. Зокрема, регулювання кутової швидкості обертання кожуха дозволяє забезпечити оптимальний відрив суміші від поверхні кожуха в заданій його зоні та ефективно її перелопачування, залежно від коефіцієнта заповнення конвеєра та реології сипкої суміші [140].

Вибір режиму переміщення (випередження чи відставання) суміші відносно обертового кожуха регулюється вибором кроку спіралі та кутової швидкості кожуха, залежно від реологічних властивостей суміші. Якість змішування суміші та стабільність її складу в часі забезпечується кількістю її перелопачувань та часом знаходження у робочій зоні конвеєра, що регулюється різницею кутових швидкостей гвинта та кожуха [140].

Регулювання швидкісного режиму та часу знаходження суміші в робочій зоні забезпечує ефективно змішування суміші в режимі потокового транспортування та дозволяє зменшувати довжину прямоточних гвинтових конвеєрів змішувачів і, відповідно, їх матеріалоемність, а також їх енергоємність, завдяки зменшенню енерговитрат на пересипання суміші та зменшенню робочої зони змішувача [140].

2.2. Модель функціонування похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом

Похилий прямоточний гвинтовий конвеєр-змішувач відрізняється від такого ж горизонтального, наведеного в [140], тільки керованим кутом його нахилу до горизонту [142]. Гвинтовий конвеєр-змішувач довжиною L , складається із обертового трубчатого кожуха діаметром D_0 , що обертається із кутовою швидкістю ω_2 і в якому розміщений гвинтовий обертовий робочий органом зовнішнім діаметром D та кроком, який обертається із швидкістю ω_1 в

тому же напрямку, що і кожух, причому $\omega_1 \geq \omega_2$. Режим $\omega_1 = \omega_2$ реалізується тоді, коли потрібно призупинити подачу суміші без переривання технологічного процесу змішування. В результаті аналізу літературних джерел та згідно попередніх експериментальних досліджень встановлено, що інтенсивність змішування та згладжувальна здатність гвинтових конвеєрів-змішувачів зростають із зростанням кількості перелопачувань суміші [142]. Зокрема, згідно [140], якість змішування у гвинтовому конвеєрі-змішувачі та його згладжувальна здатність досягає максимального значення при коефіцієнті пересипання суміші через вал $\psi = 0,5$, тобто коли половина суміші захвачується гвинтом, а половина пересипається і захвачується наступним витком гвинта. У похилому конвеєрі-змішувачі режим роботи забезпечується вибором відповідних кутових швидкостей обертання гвинтового робочого органу ω_1 та кожуха ω_2 , кута нахилу конвеєра-змішувача до горизонту γ , коефіцієнтів тертя суміші до гвинта μ_1 та кожуха μ_2 , коефіцієнта наповнення конвеєра-змішувача ϕ та коефіцієнта кроку гвинта, $k_T = T/D$, де T - крок гвинта, [1, 3, 141, 143, 144]. В моделі зовнішній діаметр гвинта прийнятий $D = D_0$ [142].

Виберемо циліндричну систему координат $O\rho\varphi z$ таким чином, щоб вісь Oz була спрямована по осі конвеєра в напрямку транспортування суміші, позитивний відлік кутового параметру φ відповідав напрямкам обертання гвинта ω_1 та кожуха ω_2 , а вісь $O\rho$, при $\varphi=0$, була спрямована вниз і з вектором земного тяжіння утворювала кут γ (кут нахилу осі конвеєра до горизонту) [142]. На першому етапі суміш піднімається кожухом (та гвинтом), до зони відриву від кожуха, де одні частинки, залежно від розміщення та набутої швидкості, перекидаються через вал без подальшого осьового зміщення, частина суміші сповзає по гвинтовому укосі та жолобу і транспортуються, як і в тихохідному гвинтовому конвеєрі із швидкістю $v_z = \omega_1 T / 2\pi$. Основна частина суміші захвачується у гвинтове транспортування з осьовою швидкістю потоку суміші $v_z = (\omega_1 - \omega_2) T / 2\pi$ [142]. Саме різниця кутових швидкостей $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$

дозволяє регулювати осьову швидкість потоку та кількість перелопачувань при обмеженій довжині конвеєра [142].

З метою аналізу дії сил на частинки потоку, розглянемо переміщення довільної i -ої частинки під дією обертових кожуха та гвинтового робочого органу. Траєкторія руху частинки визначатиметься кутом підйому β_i її гвинтового переміщення до нормального перетину шнека та кутом підйому сліду траєкторії на рухомій поверхні кожуха β_{2i} [142].

Залежно від швидкісного режиму змішувача та кутового розміщення частинки на поверхні жолоба $\varphi = \theta_i$, вона може обертатись разом із поверхнею кожуха $\beta_{2i} = \pi/2$, маючи поступальний та обертовий, разом із кожухом рухи, або випереджати обертання кожуха, $\beta_{2i} < \pi/2$, чи відставати від нього, $\beta_{2i} > \pi/2$ [142]. Для тихохідних гвинтових конвеєрів переміщення суміші здійснюється поступально по низу кожуха конвеєра, $\beta_i = \pi/2$; $\beta_{2i} = \pi/2 + \arctg(\omega_2 R / \omega_1 c)$, де R - радіус внутрішньої поверхні обертового кожуха; $c = T / 2\pi$ - параметр кроку гвинтової поверхні робочого органу, рис. 2.5 [142]. Розглянемо кінематичну модель та розрахункову схему похилого гвинтового конвеєра-змішувача (рис. 2.1 і рис. 2.5).

З використанням принципу Д'Аламбера рівняння руху i -ої частинки масою m_i з кутовим параметром $\varphi = \theta_i$ та радіальним $\rho = R = \text{const}$ в похилому конвеєрі-змішувачі буде [1, 3, 141, 143]:

$$\bar{R}_{1i} + \bar{R}_{2i} + \Sigma \bar{P}_{ij} + \bar{G}_i - m_i \bar{a}_i = 0. \quad (2.29)$$

де \bar{R}_{1i} та \bar{R}_{2i} - вектори рівнодійної нормальних реакцій кожної із поверхонь та їх складових від тертя, $\bar{R}_{1i} = \bar{N}_{1i} + \bar{F}_{2i} = \{\alpha_{\rho 1i} N_{1i}; \alpha_{\varphi 1i} N_{1i}; \alpha_{z 1i} N_{1i}\}$; $\bar{R}_{2i} = \bar{N}_{2i} + \bar{F}_{2i} = \{\alpha_{\rho 2i} N_{2i}; \alpha_{\varphi 2i} N_{2i}; \alpha_{z 2i} N_{2i}\}$; \bar{G}_i - вага частинки $\bar{G}_i = \{m_i g \cos \gamma \cos \theta_i; m_i g \cos \gamma \sin \theta_i; m_i g \sin \gamma\}$; \bar{a}_i - вектор прискорення частинки

$\bar{G}_i = \{R\dot{\theta}_i^2; -R\ddot{\theta}_i; T(\dot{\omega}_1 - \ddot{\theta}_i) / 2\pi\}$; $\Sigma \bar{P}_{ij}$ - сумарна дія впливів від інших частинок, для випадку дії на відокремленої частинки по напрямку руху на верхній крайці [142].

Тут $\alpha_{\rho i}$, $\alpha_{\tau i}$ та $\alpha_{z i}$ - відповідні коефіцієнти - суми направляючих косинусів векторів \bar{N}_i та \bar{F}_i до ортів координатної системи,

$$\alpha_{1i} = \{\alpha_{\rho 1i}; \alpha_{\theta 1i}; \alpha_{z 1i}\} = \{0; \sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha; \cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha\},$$

$$\alpha_{2i} = \{\alpha_{\rho 2i}; \alpha_{\theta 2i}; \alpha_{z 2i}\} = \{1; -\mu_2 \cos \beta_{i2}; -\mu_2 \sin \beta_{i2}\};$$

N_{1i} та N_{2i} - відповідно, сили нормальних реакцій, що діють на частинку від поверхонь шнека та кожуха; $F_{1i} = \mu_1 N_{1i}$ та $F_{2i} = \mu_2 N_{2i}$ - сили тертя від цих сил; μ_1 та μ_2 - коефіцієнти тертя ковзання частинки по поверхнях, відповідно, гвинта та кожуха; θ_i , $\dot{\theta}_i$ та $\ddot{\theta}_i$ - відповідно, кутові параметр, швидкість та прискорення частинки в системі $O\rho\tau z$ [142].

Із врахуванням значень складових векторного рівняння руху (2.29) i -ої частинки, розпишемо його координатним способом [142]:

$$\begin{aligned} -N_{2i} + m_i g \cos \gamma \cos \theta_i + \Sigma P_{\rho i} + m_i R \dot{\theta}_i^2 &= 0; \\ (\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha) \cdot N_{1i} - \mu_2 \cos \beta_{2i} \cdot N_{2i} + \Sigma P_{\phi i} - m_i g \cos \gamma \sin \theta_i - m_i R \ddot{\theta}_i &= 0; \quad (2.30) \\ (\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha) \cdot N_{1i} - \mu_2 \sin \beta_{2i} \cdot N_{2i} + \Sigma P_{z i} - m_i g \sin \gamma - m_i T(\dot{\omega}_1 - \ddot{\theta}_i) / 2\pi &= 0. \end{aligned}$$

Для похилого конвеєра-змішувача з обертовим кожухом, як і для горизонтального, рух суміші на дузі її піднімання задається кожухом, що обертається із кутовою швидкістю $\omega_2 = \text{const}$. При усталеній роботі конвеєра

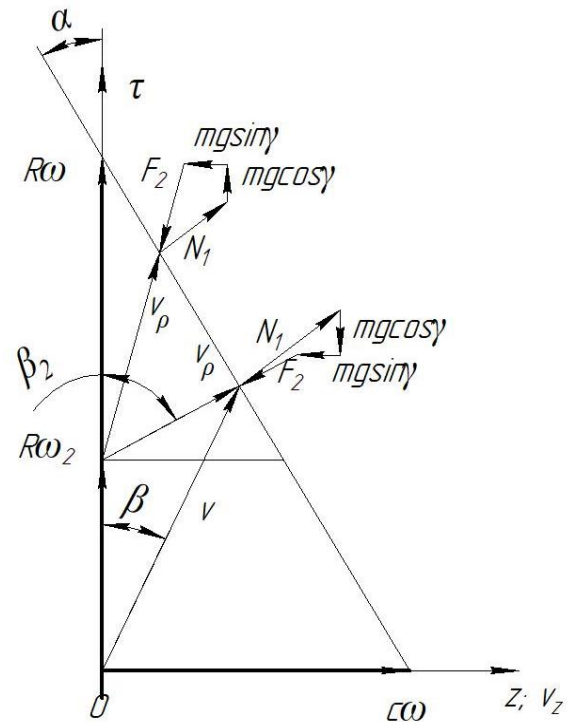


Рис. 2.5. Розрахункова схема до визначення кінематичних параметрів гвинтового похилого конвеєра-змішувача із обертовим кожухом

змішувача постійною також буде кутова швидкість гвинта $\omega_1 = \text{const}$, отже приймаємо $\dot{\omega}_1 = 0_1$. Завдяки складовій $\Sigma \bar{P}_{ij}$ від впливу інших частинок, кутова швидкість $\dot{\theta}_i$ i -ої частинки на дузі піднімання буде практично постійною, $\dot{\theta}_i = \text{const}$, а, відповідно, її кутове прискорення $\ddot{\theta}_i = 0$. Із врахуванням сказаного розглянемо ймовірне елементарне переміщення відокремленої частинки тільки від зовнішніх сил, без врахування впливу суміжних частинок потоку, $\Sigma \bar{P}_{ij} = 0$. Тоді із першого та третього рівнянь системи (2.30) відповідно маємо [142]:

$$\begin{aligned} N_{2i} &= m_i(R\dot{\theta}_i^2 + g \cos \gamma \cos \theta_i); \\ N_{1i} &= \frac{m_i g \sin \gamma + \mu_2 \sin \beta_{2i} \cdot N_{2i}}{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

А із сумісного розв'язку рівнянь 2 і 3 системи (2.30) отримаємо:

$$\mu_2 N_{2i} \cos(\alpha + \varphi_1 + \beta_{2i}) = m_i g [\sin \gamma \sin(\alpha + \varphi_1) - \sin \theta_i \cos \gamma \cos(\alpha + \varphi_1)]. \quad (2.32)$$

де φ_1 - кут тертя ковзання частинки по поверхні гвинта.

З рівняння (2.32) виводимо залежність для визначення кута нахилу β_2 траєкторії руху частинки по рухомому кожуху:

$$\beta_{2i} = \arccos \left[\frac{g[\sin \gamma \sin(\alpha + \varphi_1) - \sin \theta_i \cos \gamma \cos(\alpha + \varphi_1)]}{\mu_2 (R\dot{\theta}_i^2 + g \cos \gamma \cos \theta_i)} \right] - \alpha - \varphi_{\mu 1}. \quad (2.33)$$

Замітимо, що для горизонтальних конвеєрів-змішувачів $\gamma = 0$ і рівняння (2.32) при переходить в рівняння, наведене в [140].

На рис. 2.6 – рис. 2.9 показано зміну кута β_{2i} нахилу траєкторії руху відокремленої частинки по поверхні кожуха від кутового її розміщення θ для різних значень: кутової швидкості кожуха ω_2 ; коефіцієнтів тертя μ_1 та μ_2 ; коефіцієнта кроку k_T ; кута нахилу конвеєра змішувача γ [142].

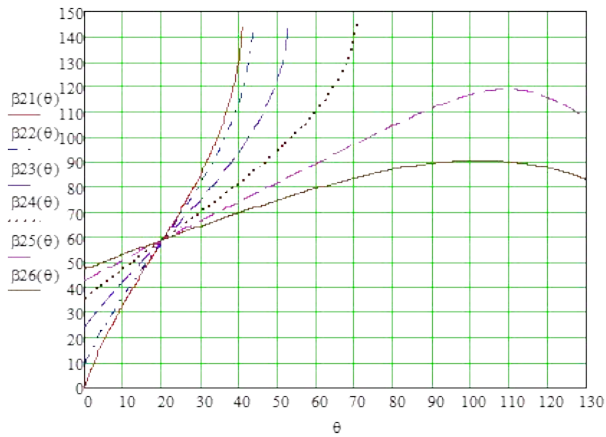


Рис. 2.6. Зміна кута β_2 нахилу траєкторії руху частинки по поверхні кожуха від кутового її розміщення θ при: $\mu_1=\mu_2=0,3$; $k_T=0,8$; $\gamma=30^\circ$ для різних кутових швидкостей кожуха ω_2 (с^{-1}): 1-0; 2-5; 3-10; 4-15; 5-20; 6-25

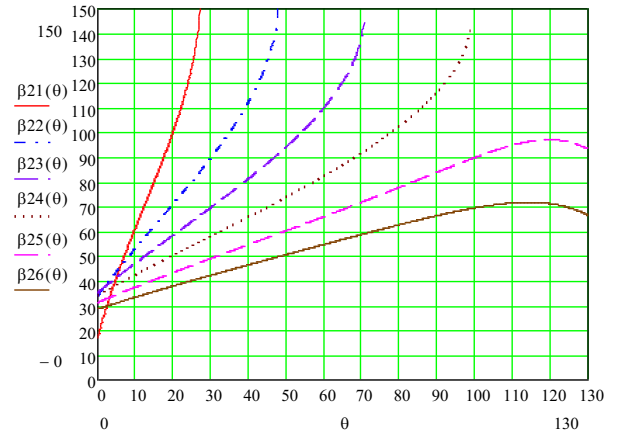


Рис. 2.7. Зміна кута β_2 нахилу траєкторії руху частинки по поверхні кожуха від кутового її розміщення θ при: $k_T=0,8$; $\omega_2 = 15 \text{ с}^{-1}$; $\gamma=30^\circ$ для різних коефіцієнтів тертя $\mu_1=\mu_2$: 1-0,1; 2-0,2; 3-0,3; 4-0,4; 5-0,5; 6-0,6

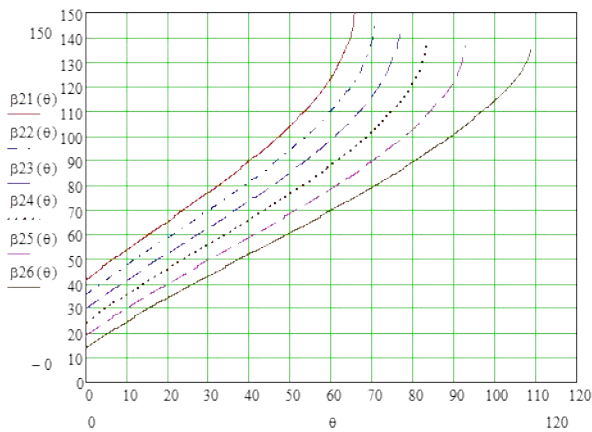


Рис. 2.8. Зміна кута β_2 нахилу траєкторії руху частинки по поверхні кожуха від кутового її розміщення θ при: $\mu_1=\mu_2=0,3$; $\gamma=30^\circ$; $\omega_2 = 15 \text{ с}^{-1}$ для різних коефіцієнтів кроку гвинта k_T : 1-0,6; 2-0,8; 3-1,0; 4-1,2; 5-1,4; 6-1,6

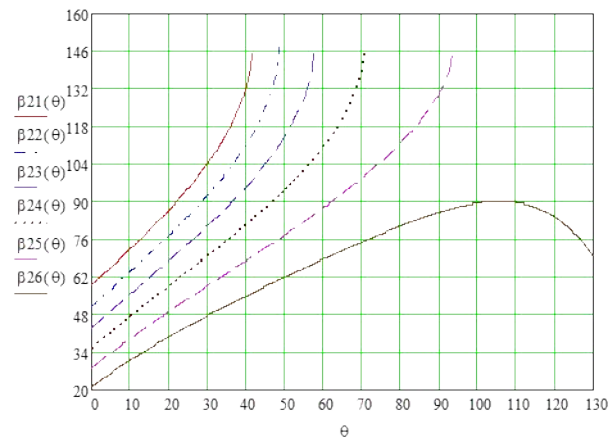


Рис. 2.9. Зміна кута β_2 нахилу траєкторії руху частинки по поверхні кожуха від кутового її розміщення θ при: $\mu_1=\mu_2=0,3$; $k_T=0,8$; $\omega_2=15 \text{ с}^{-1}$ для різних кутів нахилу конвеєра γ (град): 1-0; 2-10; 3-20; 4-30; 5-40; 6-50

Із графіків (рис. 2.6 – рис. 2.9) бачимо, що із ростом кожного із факторів лінії функції стають більш пологими, тобто розширюється кутовий діапазон значень кутового розміщення частинки θ , при яких вона буде втягуватись в обертання. Із наведених залежностей видно, що внизу конвеєра ($\theta = 0 - 30^\circ$) дія сил тертя завжди переважатиме вплив сил тяжіння

($\beta_{2i} < 90^\circ$), і частинка, під дією гвинта, випереджатиме обертовий рух кожуха ($\dot{\theta} > \omega_2$). При $\beta_{2i} = 90^\circ$ кутова швидкість зрівнюється із кутовою швидкістю кожуха $\dot{\theta} = \omega_2$, а при $\beta_{2i} > 90^\circ$ сили тяжіння переважатимуть і частинка зсуватиметься вниз по гвинту і $\dot{\theta} < \omega_2$.

Різке зростання кута $\beta_{2i}(\theta)$ і обрив лінії на графіку означає зрив кругового руху, а неперервні лінії на графіках рис. 2.6, рис. 2.7 та рис. 2.9 відображають стаціонарний процес гвинтового транспортування. Із рис. 2.6 – рис. 2.9 випливає, що залежно від вхідних факторів реалізується біфуркаційний перехід від тихохідного режиму, який характеризується зривом функції зміни кута $\beta_{2i}(\theta)$, до швидкохідного режиму. Такий режим характеризується максимальним збуренням та перемішуванням суміші [142]. За реалізованою моделлю фактори приймають такими, щоб при $\beta_{2i} = 90^\circ$, що відповідає переміщенню суміші по твірній кожуха, кутовий параметр її центра ваги, залежно від коефіцієнта наповнення конвеєра-змішувача, мав значення більше $\theta_C > 45 - 50$. В цьому випадку на дузі піднімання відбуватиметься стаціонарний рух суміші по кожуху по координатах $O\varphi$ та Oz , при якому верхня частина потоку відриватиметься від кожуха і перекидатиметься через вал із належним перелопачуванням суміші.

З метою оцінки взаємовпливу частинок потоку на їх переміщення, розглянемо два поряд розміщених елементи вантажу однакової маси $m_1 = m_2$ із кутовими параметрами, відповідно, $\varphi_1 = \theta + \Delta_1$ та $\varphi_2 = \theta - \Delta_2$, де θ - кутовий параметр проміжної точки яка відповідає координаті центра ваги тіла волочиння; Δ_1 та Δ_2 - кутове зміщення кожного із елементів відносно проміжної точки, прийmemo $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$. Отже, ці елементи розміщатимуться симетрично по відносно радіуса, що проходить через центр мас C (рис. 2.10).

Розглянемо систему координат $O_C n t u$, центр якої розміщений в центрі мас C системи із двох елементів масою $m = m_1 + m_2$, вісь $O_C n$ проходить нормально

Зміна в часі кутового зближення елементів ($\pm \Delta$), в процесі руху суміші по дузі піднімання, буде незначною. Відповідно можна прийняти $\dot{\Delta} = 0$. Відповідно, рух системи точок масою m та кутовим параметром θ_C розміщення їх центра ваги буде:

$$N_2 = m(R_C \dot{\theta}_C^2 + g \cos \gamma \cos \theta_C);$$

$$N_1 = \frac{m_i g \sin \gamma + \mu_2 m_i \sin \beta_2 \cdot (R_C \dot{\theta}_C^2 + g \cos \gamma \cos \theta_C)}{\cos \alpha - \mu_1 \sin \alpha}. \quad (2.36)$$

Відповідно:

$$\beta_2 = \arccos \left[\frac{g[-\sin \theta_C \cos \Delta \cos \gamma \cos(\alpha + \varphi_1) + \sin \gamma \sin(\alpha + \varphi_1)]}{\mu_2 [R_C \dot{\theta}_C^2 + g \cos \gamma \cos \theta_C]} \right] - \alpha - \varphi_{\mu 1}. \quad (2.37)$$

Отже, залежність (2.37) визначає відмінність між транспортуванням матеріальної частинки масою m та масивом вантажу такої ж маси m , яка приведена до центра ваги O_C . Ця відмінність полягає у врахуванні параметру Δ , який впливає на зменшення кута β_2 і, відповідно, на збільшення кутової швидкості ω_2 колового руху суміші. Очевидно, що, із збільшенням коефіцієнта заповнення конвеєра-змішувача φ_V параметр Δ буде зростати. Для випадку $\Delta = 30^\circ$ його вплив на зміну кута для різних значень кутової швидкості кожуха наведено на рис. 2.11, а для різних значень коефіцієнта тертя - на рис. 1.12.

Для попередньої оцінки кута $\beta_2 = \beta_2(\theta_C, \dot{\theta}_C)$ нахилу траєкторії гвинтового руху потоку приймаємо $\dot{\theta}_C = \dot{\theta}_C(t) = \omega_2 = \text{const}$.

Проведений аналіз впливу інших частинок ($\Sigma \bar{P}_i$) в рівняннях (2.30) показав, що можливий перехід від задачі руху частинки до руху потоку суміші, де за параметри частинки приймають параметри центра тіла волочіння суміші. При цьому, залежності для визначення силових параметрів вбудуть ідентичними. Дещо зміниться тільки траєкторія гвинтового переміщення суміші в сторону зменшення кута її підйому, тобто збільшення колової складової швидкості потоку і зменшення швидкості транспортування. Це

означає, що чим більший коефіцієнт наповнення ϕ конвеєра змішувача, тим більші кути розміщення його складових Δ_1 та Δ_2 , тим швидше суміш буде втягуватись в коловий рух, тобто в гвинтове транспортування. При коефіцієнті наповнення конвеєра ϕ середня площа перетину тіла волочиння суміші буде $S_C = \phi \pi R^2$. Довжина хорди, що стягує дугу розміщення суміші в кожусі буде $b = 2k_b R$, де k_b - коефіцієнт, що є функцією коефіцієнта наповнення ϕ конвеєра сумішшю. Кутове зміщення складових тіла волочиння можна прийняти за $\Delta_1 = \Delta_2 = (0,8 - 0,9)k_b$. Центр ваги суміші приймаємо як центр ваги середньої площі тіла волочиння:

$$R_C = R \left(1 - \frac{b^3}{12RS_C} \right) = R \left(1 - \frac{2k_b^3}{3} \right). \quad (2.38)$$

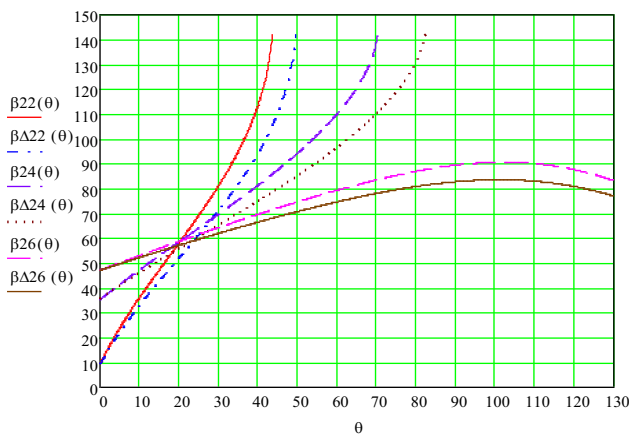


Рис. 2.11. Зміна кута β_2 нахилу траєкторії руху частинки та кута β_{Δ_2} нахилу траєкторії масиву по поверхні кожуха від кутового їх розміщення θ при: $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$; $k_T = 0,8$; $\gamma = 30^\circ$ для різних кутових швидкостей кожуха ω_2 (с^{-1}):
1, 2 - 5; 3, 4 - 15; 5, 6 - 25

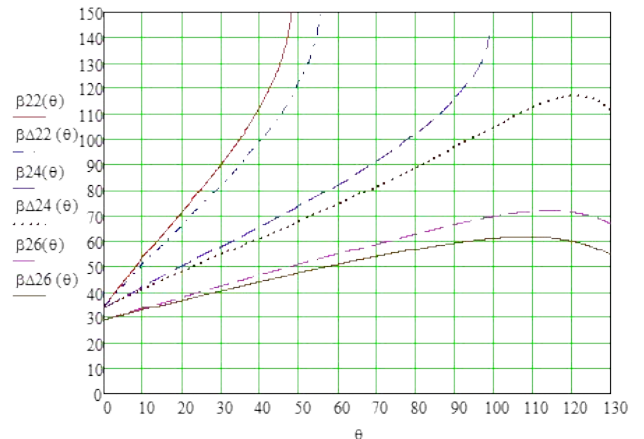


Рис. 2.12. Зміна кута β_2 нахилу траєкторії руху частинки та кута β_{Δ_2} нахилу траєкторії масиву по поверхні кожуха від кутового їх розміщення θ при: $k_T = 0,8$; $\omega_2 = 15 \text{ с}^{-1}$; $\gamma = 30^\circ$ для різних коефіцієнтів тертя $\mu_1 = \mu_2$:
1, 2 - 0,2; 3, 4 - 0,4; 5, 6 - 0,6

Із врахуванням (2.37) уточнена кутова швидкість центра ваги тіла волочиння суміші буде:

$$\dot{\theta}_{C1}(t) = \frac{\omega_2 + \omega_1 \text{ctg} \beta_2 \text{tg} \alpha}{1 + \text{ctg} \beta_2 \text{tg} \alpha}. \quad (2.39)$$

Підставляючи це значення замість $\dot{\theta}_C(t)$ із залежності (2.37), отримуємо значення наступної ітерації $\beta_{2(j+1)} = \beta_{21}(\theta)$. Практично перша ж операція дозволяє отримати значення кута нахилу гвинтової траси потоку, яке дозволяє адекватно визначити кінематику транспортування-змішування, за тими ж залежностями, що і для горизонтального конвеєра-змішувача [140].

Колова складова швидкості центра ваги O_C потоку суміші [140]:

$$v_{\varphi C} = R_C \dot{\theta}_{C1} = \frac{R_C(\omega_2 \operatorname{tg} \beta_2 + \omega_1 \operatorname{tg} \alpha_C)}{\operatorname{tg} \beta_2 + \operatorname{tg} \alpha_C}. \quad (2.40)$$

де α_C - кут підйому витка по радіусу розміщення центру ваги, $\alpha_C = \operatorname{arctg}(T/2\pi R_C)$.

Осьова складова швидкості потоку суміші на дузі піднімання [140]:

$$v_{zC} = \frac{R_C(\omega_1 - \omega_2) \sin \alpha_C \sin(\beta_2)}{\sin(\alpha_C + \beta_2)}. \quad (2.41)$$

Колова складова швидкості потоку по поверхні обертового кожуха радіусом $R = D/2$ буде [140]:

$$v_{p\varphi C} = \frac{R(\omega_1 - \omega_2) \sin \alpha_C \cos(\beta_2)}{\sin(\alpha_C + \beta_2)}. \quad (2.42)$$

Значення кута підйому β_0 гвинтової траєкторії суміші (за умови контакту із кожухом) в нерухомій системі координат буде:

$$\beta_0 = \beta_0(\dot{\theta}) = \operatorname{arctg}[(\omega_1 / \dot{\theta}_C - 1) \operatorname{tg} \alpha]. \quad (2.43)$$

Як уже було сказано, що змішування найбільш інтенсивно проходить в перехідному режимі роботи гвинтового конвеєра змішувача, коли іде відрив потоку у верхній частині кожуха і частина потоку перекидається через вал, а інша затягується у гвинтове транспортування. Умовою відриву частинок від поверхні кожуха є відсутність в цій зоні реакції кожуха, тобто $N_2 = N_2(\theta) < 0$.

Для виконання умови $\psi = 0,5$, тобто поділу масиву частинок пополам, необхідно щоб зрив потоку передував підніманню його до верхньої точки кожуха, тобто відбувався орієнтовно в точці з координатою $\theta \approx 3\pi/4$, рис. 2.13.

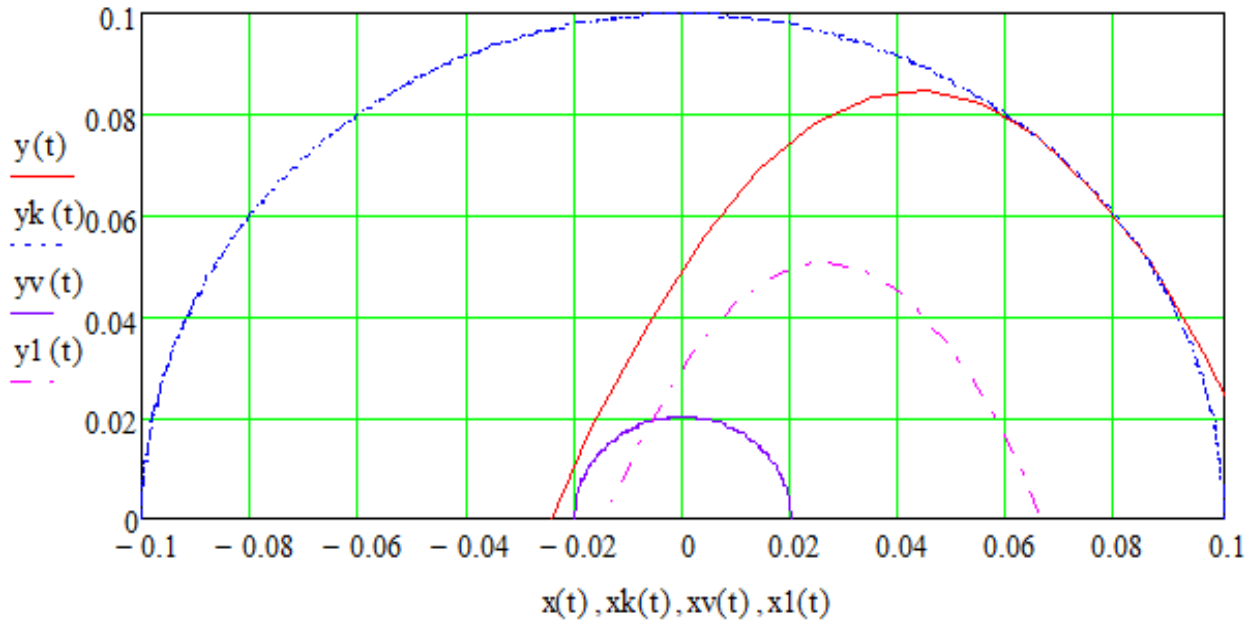


Рис. 2.13. Траєкторії частинок суміші, що відриваються від обертового кожуха

Із врахуванням (2.36) та (2.43) умова відриву потоку від кожуха в заданій точці буде:

$$\omega_2 \approx \dot{\theta}(t) = k_\omega \sqrt{\frac{g \cos \gamma}{R_C}}, \quad (2.44)$$

де k_ω - коефіцієнт, що враховує рекомендоване значення кутового параметру точки відриву θ_C та відставання кутової швидкості $\dot{\theta}_C(t)$ колового руху потоку від кутової швидкості кожуха ω_2 , $k_\omega = 0,8 - 0,85$.

Об'ємний розхід суміші прямоочного гвинтового змішувача, аналогічно [1, 141], буде:

$$Q = 0,25\pi\phi\psi(D^2 - d^2)v_{zC} = \frac{0,125\phi\psi T(\omega_1 - \omega_2) \cos \alpha_C \sin \beta_2 (D^2 - d^2)}{\sin(\alpha_C + \beta_2)} \quad (2.45)$$

Для якісного змішування суміші коефіцієнт заповнення ϕ змішувача рекомендується приймати $\phi_V = 0,3 - 0,35$, а коефіцієнт пересипання суміші через вал для рекомендованих режимів становить $\psi = 0,4 - 0,5$.

Із врахуванням того, що рекомендовані значення кута β_2 близькі до $\beta_2 = \pi/2$, то залежність (2.45) для цього випадку можна представити у спрощеному вигляді:

$$Q = 0,125\phi\psi T(\omega_1 - \omega_2)(D^2 - d^2). \quad (2.46)$$

Залежність Q та спрощена залежність Q_0 об'ємної продуктивності конвеєра-змішувача діаметром $D_0 = 0,1$ м прохідного січення кожуха, що обертається із кутовою швидкістю $n_2 = 150$ об/хв. та кроком $T = 0,8$ м гвинта, від кута його нахилу γ для різних кутових швидкостей обертання гвинта наведені на рис. 2.14.

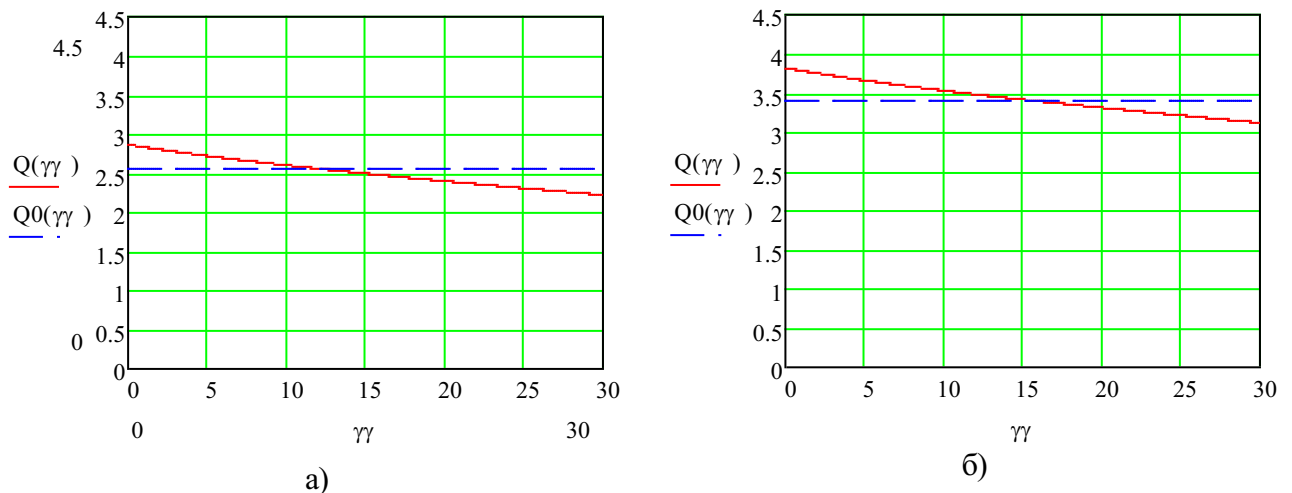


Рис. 2.14. Зміна об'ємної продуктивності $Q = Q(\gamma)$ та $Q_0 = Q_0(\gamma)$ конвеєра-змішувача в $\text{м}^3/\text{год}$. від кута його нахилу $\gamma = \gamma^\circ$ при різних значеннях кутової швидкості гвинта: а) $n_1 = 300$ об/хв.; б) $n_2 = 350$ об/хв.

Момент опору M_I , який чинить по повертанню гвинта буде $M_I = N_{1\phi} R_C$, де $N_{1\phi}$ - колова складова вектора сили тиску суміші на поверхню гвинта $N_{1\phi} = (\sin \alpha + \mu_1 \cos \alpha) N_1$. Звідки:

$$M_I = mgR_C \cdot \text{tg}(\alpha + \phi_1) [\sin \gamma + \mu_2 \sin \beta_2 \cdot (R_C \dot{\theta}_C^2 / g + \cos \gamma \cos \theta_C)], \quad (2.47)$$

де M_{01} - момент опору обертанню гвинта ненавантаженого конвеєра-змішувача.

Маса суміші, якою заповнений змішувач довжиною L буде:

$$m_c = 0,25\pi\varphi_V\rho_c L(D^2 - d^2), \quad (2.48)$$

де ρ_c - насипна густина суміші.

Оскільки складова сили тертя суміші по кожуху $F_{2\varphi} = \mu_2 N_{2\varphi} = -\mu_2 N_2 \cos \beta_2$, то момент опору M_2 , який протидіє повороту повертанню кожуха буде:

$$M_2 = \mu_2 N_2 R_C \cos \beta_2 + m_c g R_C \sin \theta_C \cos \gamma + M_{02}, \quad (2.49)$$

де M_{02} - момент опору обертання кожуха ненавантаженого конвеєра змішувача.

Зміна сумарних сил тиску суміші масою m_c на поверхні, відповідно гвинта N_1 та кожуха N_2 та відповідних моментів їх приводу M_1 та M_2 від кута нахилу конвеєра-змішувача діаметром $D_0 = 0,1$ м прохідного січення кожуха, що обертається із кутовою швидкістю $n_2 = 150$ об/хв/ та кроком $T = 0,8$ м гвинта, що обертається з кутовою швидкістю $n_1 = 300$ об/хв. та відповідних моментів наведена на рис. 2.15.

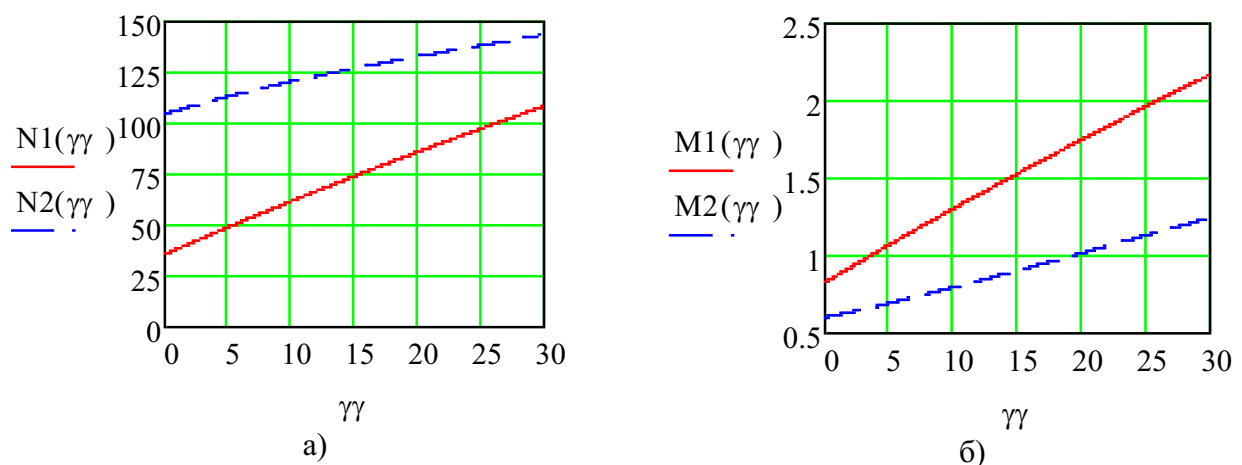


Рис. 2.15. Залежності сил N_1 та N_2 (а), та моментів M_1 та M_2 (б) прикладених до обертових гвинта та кожуха від кута нахилу $\gamma = \gamma$ конвеєра змішувача

Із врахуванням (2.46) біжучу масу вантажу, що заповняє прямоточний змішувач, можна виразити через його продуктивність:

$$m_c = \frac{2\pi\rho_c LQ}{T \psi(\omega_1 - \omega_2)}. \quad (2.50)$$

Потужність на гвинтовому робочому органі буде $P_1 = M_1 \cdot \omega_1$. Відповідно, із врахуванням (2.47) та (2.50) потужність його приводу буде:

$$P_1 = \frac{\rho_c gQL\omega_1 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1) [\sin \gamma + \mu_2 \sin \beta_2 \cdot (R_C \dot{\theta}_C^2 / g + \cos \gamma \cos \theta_C)]}{\eta_1 \psi(\omega_1 - \omega_2) \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.51)$$

де η_1 - коефіцієнт втрат потужності приводу гвинта.

Потужність, яка необхідна для обертання кожуха, становитиме:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 / \eta_2. \quad (2.52)$$

де η_2 - коефіцієнт втрат потужності приводу кожуха.

Із врахуванням (2.49) та (2.50) залежність (2.52) прийме вигляд:

$$P_2 = \frac{\rho_c gQL\omega_2 [\sin \theta_C \cos \gamma + \mu_2 \cos \beta_2 \cdot (R_C \dot{\theta}_C^2 / g + \cos \gamma \cos \theta_C)]}{\eta_2 \psi(\omega_1 - \omega_2) \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.53)$$

На рис. 2.16 наведені графіки залежності потужності приводу гвинта P_1 та P_2 кожуха від кута нахилу гвинтового транспортера-змішувача параметрами $D_0 = 0,1$ м, $T = 0,8$ м, $n_1 = 300$ об/хв., $n_2 = 150$ об/хв.

Оскільки на рух потоку впливає велика кількість факторів (рис. 2.6 – 2.9, 2.11, 2.12), то залежно від складу суміші, її реологічних властивостей, коефіцієнту наповнення тощо, для отримання високої якості змішування та належної згладжувальної здатності змішувача його конструктивне виконання повинне передбачати регулювання кута нахилу конвеєра та автоматичне

регулювання кутових швидкостей обертання кожуха та гвинта. Остання досягається використанням частотних перетворювачів. Також конструкція гвинтового конвеєра-змішувача повинна передбачати регульовану подачу суміші в завантажувальну зону з метою забезпечення рекомендованого коефіцієнту його наповнення ϕ . Таке регулювання проводиться із врахуванням того, що суміш, залежно від рекомендованого коефіцієнту наповнення ϕ гвинтового-конвеєра змішувача, займає біля третини його робочого простору (рис. 2.13).

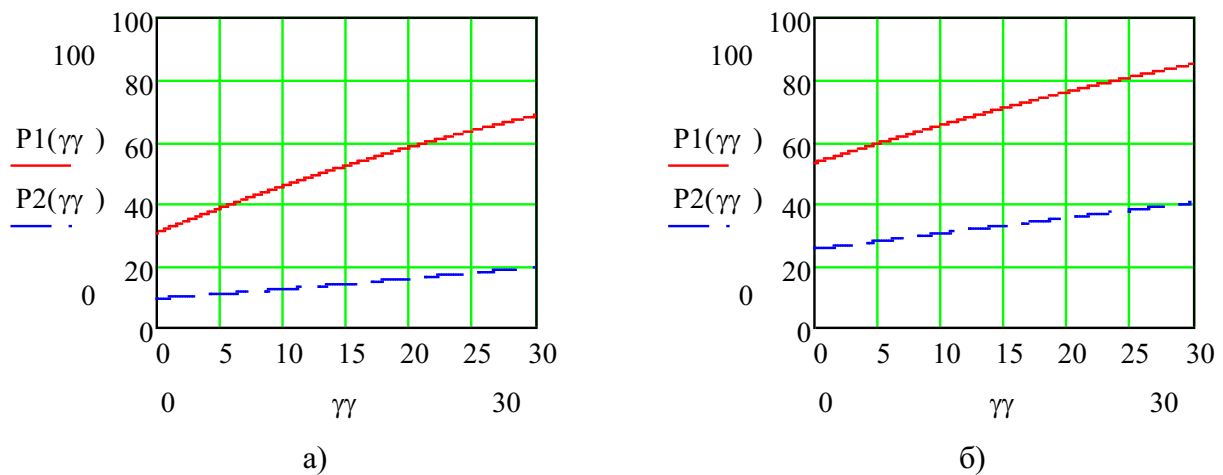


Рис. 2.16. Залежності потужностей приводу гвинта P_1 та кожуха P_2 від кута нахилу $\gamma = \gamma\gamma$ конвеєра змішувача для сумішей із коефіцієнтом тертя до робочих поверхонь $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ (а) та $\mu_1 = \mu_2 = 0,5$ (б)

2.3. Моделювання процесу змішування похилими гвинтовими конвеєрами-змішувачами з обертовим кожухом

Використання похилих конвеєрів-змішувачів із обертовим кожухом дозволяє розв'язати протиріччя, яке полягає у забезпеченні належної кількості перелопачувань суміші конвеєрами-змішувачами малої довжини. Це забезпечується активним впливом обертового кожуха, який сприяє утворенню колових циркуляційних потоків суміші та їх перелопачуванню при відриві потоку від кожуха [140, 142, 145].

Розглянемо встановлений під кутом γ до горизонту гвинтовий конвеєр-змішувач із співвісними обертовими гвинтом та кожухом [145]. Особливостями похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими шнеком та кожухом є те, що на відміну від гвинтових конвеєрів із нерухомим кожухом, обертовий кожух захоплює компоненти суміші в коловий рух, яка, при належних режимах, у верхній точці відривається від обертового кожуха та перемішується внаслідок перелопачування при спаданні (рис. 2.10). При цьому частина суміші захвачується гвинтом у подальший осьовий рух, а частина, після перекидання через вал, спадає на кожух поза витком гвинта і захвачується наступним витком. Таким чином проходить як перерозподіл та перемішування суміші як у поперечному січенні, так і в поздовжньому.

Розглянемо гвинтовий конвеєр-змішувач радіусом кожуха R , із співвісно розміщеним гвинтовим робочим органом діаметрами гвинта D і вала d , кроком T та кутом γ нахилу осі конвеєра до горизонту. Суміш у похилому гвинтовому конвеєрі змішувачі на дузі піднімання буде утворювати динамічне тіло волочіння, яке під дією обертових шнека та кожуха підніматиметься до певного рівня, як квазі суцільне тіло, а далі буде зрушуватись під дією земного тяжіння. Виберемо циліндричну систему координат $O\rho\varphi z$, у якої радіальна вісь $O\rho$ на початку відліку ($\varphi = 0$) кутового параметру φ , спрямована вниз, а вісь Oz розміщена співвісно осі конвеєра в напрямку транспортування суміші. Тоді напрямки кутових швидкостей обертання гвинта ω_1 та кожуха ω_2 , будуть відповідати позитивному відліку кутового параметру φ . Приймемо, що на дузі піднімання потік суміші буде стаціонарний, який утворює динамічне тіло волочіння з усталеними кінематичними параметрами та миттєвим центром ваги з кутовим параметром θ_C [140]. Розміри динамічного тіла волочіння залежать від коефіцієнта заповнення ψ і по довжині його січення має різну площу. В частині, що прилягає до гвинта, дуга обхвату тіла волочіння може наближатись до $\Delta\varphi = (0,9 - 1,2)\pi$, а проекція площі контакту тіла волочіння із гвинтом на площині, розміщена перпендикулярно до осі конвеєра Oz , буде становити

$S_0 = k_{z_0} \pi (D^2 - d^2) / 4$, де коефіцієнт перекриття сумішню площі витка конвеєра для його заповнення $\psi = 0,3$ буде $k_{z_0} \approx 0,45 - 0,6$. На віддалі T площа контакту із попереднім витком буде суттєво меншою: $S_T = k_{z_T} \pi (D^2 - d^2) / 4$. Коефіцієнт перекриття площі попереднього витка k_{z_T} залежить від кута нахилу γ і приймає значення $k_{z_T} \approx 0 - 0,15$. Відповідно коефіцієнт заповнення буде рівний $\psi = 0,5(k_{z_0} + k_{z_T})$.

Кутова швидкість $\dot{\theta}_C(t)$ потоку (динамічного тіла волочіння), згідно (2.39), буде задаватись кутовою швидкістю кожуха ω_2 із врахуванням впливу обертової гвинтом поверхні:

$$\dot{\theta}_C(t) = \frac{\omega_2 + \omega_1 \operatorname{tg} \alpha_C \operatorname{ctg} \beta_2}{1 + \operatorname{tg} \alpha_C \operatorname{ctg} \beta_2} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2) \frac{\operatorname{tg} \alpha_C \operatorname{ctg} \beta_2}{1 + \operatorname{tg} \alpha_C \operatorname{ctg} \beta_2} = \omega_2 + k_\omega (\omega_1 - \omega_2), \quad (2.54)$$

де β_2 - кут підйому траєкторії переміщення окремої частинки суміші по рухомому кожуху, для руху по твірній кожуха $\beta_2 = \pi/2$; α - кут підйому витка гвинта, $\alpha = \operatorname{arctg}(T / \pi D)$.

Кут β_2 залежить від геометричних параметрів гвинта і жолоба, коефіцієнтів тертя суміші відповідно до гвинта μ_1 та кожуха μ_2 , а також кутової швидкості потоку $\dot{\theta}_C(t)$ [140]. Експериментально встановлено, що для стабільного перелопачування із приблизно рівним поділом потоку доцільно вибирати такі режими роботи конвеєра-змішувача, при яких β_2 буде близьке до $\beta_2 = \pi/2$. В цьому випадку на дузі піднімання $k_\omega = 0$ кутова швидкість динамічного тіла волочіння є $\dot{\theta}_C(t) = \omega_2$. Після відриву від кожуха під дією сили земного тяжіння g частина суміші (із ймовірністю p) гвинтом далі переміщається в напрямку транспортування. Інша частина суміші з певною ймовірністю пересиплеться через вал і попаде в наступне тіло волочіння.

Для похилих конвеєрів-змішувачів, на ділянці спадання $\beta_2 \rightarrow 0$, а кутова швидкість спадання визначатиметься за залежністю, аналогічною (2.54). В цьому випадку $k_\omega \approx 1$, а $\dot{\theta}_g(t) = \omega_1$.

У [148] показано, що в режимі тихохідного перемішування в обертовій трубі заповненій сипучою сумішшю на 30% крайня нижня частинка дійде до верхньої при повороті кожуха на $\Delta\varphi = 110 - 120^\circ$, тобто за один оборот труби (кожуха) відбувається приблизно три перелопачування ($k_n = 3$). Для випадку змішування у гвинтовому конвеєрі-змішувачі реалізується проміжний режим транспортування, для якого $k_n \approx 1,3 - 1,5$. У випадку швидкісного режиму, коли суміш не відривається від кожуха, $k_n = 1$.

Осьова складова швидкості частини потоку суміші, що не перекидається через вал, буде рівна осьовій складовій суміші на дузі піднімання $\Delta\varphi = f(\varphi_T) \approx 150 - 180^\circ$.

Відповідно, час проходження тілом волочіння ділянки підйому та ділянки спадання:

$$t_1 = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{\dot{\theta}_c(\varphi)} \approx \frac{\Delta\varphi}{\omega_2}; \quad (2.55)$$

$$t_2 = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1+2\pi} \frac{d\varphi}{\dot{\theta}_g(\varphi)} \approx \frac{2\pi - \Delta\varphi}{\omega_1}. \quad (2.56)$$

Загальний час повного обертового циклу потоку суміші тіла волочіння буде [147]:

$$\Delta t = t_1 + t_2 = k_t \left(\frac{\Delta\varphi}{\omega_2} + \frac{2\pi - \Delta\varphi}{\omega_1} \right), \quad (2.57)$$

де k_t - коефіцієнт, який враховує вплив на відхилення кутових швидкостей потоку умов транспортування та нахилу конвеєра-змішувача.

Відповідно, загальний час повного циклу обертання суміші буде дещо меншим за час одного обороту корпусу і їх співвідношення визначається за залежністю:

$$\zeta = \frac{\Delta t \cdot \omega_2}{2\pi} = k_t \left(\frac{\Delta\varphi}{\omega_2} + \frac{2\pi - \Delta\varphi}{\omega_1} \right) = k_t \left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} + \frac{\omega_2(2\pi - \Delta\varphi)}{2\pi\omega_1} \right). \quad (2.58)$$

Відповідно, за один оберт кожуха відбудеться $k_n = 1/\zeta$ перелопачувань. Так, коли дуга підйому вантажу становить $\Delta\varphi = \pi$, то кількість перелопачувань становитиме $\zeta = 0,5k_t(1 + \omega_2/\omega_1)$.

Та частина суміші, яка із ймовірністю перевалиться через вал, у похилих конвеєрах під дією земного тяжіння по кожуху спадатиме вниз, поки не зіллється із тілом волочиння, яке формується наступним витком.

В загальному випадку, швидкість його осьового переміщення потоку під дією витка кроком T , за умови безвідривного переміщення по витку, тобто на дузі піднімання, складає [50]:

$$v_{zC} = (\omega_1 - \dot{\theta})T/(2\pi). \quad (2.59)$$

Колова $\dot{\theta}_C$ та осьова складові v_{zC} швидкості потоку суміші на дузі піднімання визначатимуться кутом підйому траєкторії по обертовому кожуху β_2 і згідно (2.41):

$$v_{zC} = \frac{R_C(\omega_1 - \omega_2) \sin \alpha_C \sin(\beta_2)}{\sin(\alpha_C + \beta_2)}. \quad (2.60)$$

Для випадку $\beta_2 = \pi/2$:

$$v_{zC} = R_C(\omega_1 - \omega_2) \operatorname{tg} \alpha_C = (\omega_1 - \omega_2)T/(2\pi). \quad (2.61)$$

На дузі спадання, залежно від кута нахилу конвеєра до горизонту γ , кут β_2 буде суттєво менший: $\beta_2 \rightarrow 0$ [140], і осьова складова швидкості потоку буде:

$$v_{zg} = (\omega_1 - \dot{\theta}_g)T/(2\pi). \quad (2.62)$$

Для кутів нахилу конвеєра $\gamma > \alpha_C$ осьова складова потоку практично відсутня і на дуги спадання приймаємо $v_{zg} = 0$. Відповідно довжина ділянки повного циклу гвинтового руху потоку буде практично визначатись довжиною ділянки підйому динамічного тіла волочіння:

$$\Delta L = k_L \Delta \phi_1 T (\omega_1 - \omega_2) / (2\pi \omega_2). \quad (2.63)$$

де k_L - коефіцієнт, що враховує осьове переміщення частинок суміші після відриву від кожуха, залежно від кута нахилу конвеєра змішувача $k_L = 1 - 1,15$.

Якість змішування оцінюється за двома основними показниками. Це неоднорідність змішування та постійністю складу суміші в часі на виході із змішувача, яка залежить від згладжуючої здатності конвеєра-змішувача. Для оцінювання згладжуючої здатності похилого конвеєра-змішувача використаємо відомий метод імпульсного збурення [88, 149, 150], згідно якого на вході миттєво вводять ключовий компонент у вигляді індикатора і встановлюють закон зміни його концентрації на виході.

Розіб'ємо довжину конвеєра L на n_k комірок, довжиною ΔL :

$$n_k = L / \Delta L = \frac{2\pi \omega_2 L}{k_L \Delta \phi_1 T (\omega_1 - \dot{\theta})}. \quad (2.64)$$

Тоді об'єм суміші в кожній комірці ΔV_i буде однаковим $\Delta V_i = \Delta V$ і становитиме:

$$\Delta V_i = \Delta V = 0,25\pi \psi \Delta L (D^2 - d^2). \quad (2.65)$$

Отже, довільна частина потоку при взаємодії з обертовими жолобом та гвинтом проходить відповідні етапи переміщення по поверхні кожуха на дузі піднімання під їх дією.

Ведемо в початкову (нульову) комірку певну кількість індикатора об'ємом g_i [88, 149].

Початкова опосередкована концентрація індикатора на вході в конвеєр змішувач, тобто в нульовій комірці, складатиме:

$$C_0 = \frac{g_i}{\Delta V} = \frac{4g_i}{\pi\psi\Delta L(D^2 - d^2)}. \quad (2.66)$$

При проходженні по потоковому конвеєру-змішувачу, внаслідок його згладжувальній здатності, на виході поява індикатора буде розподілена в часі. Відповідно, концентрація індикатора на виході буде функцією часу $C_e(t_i)$.

Загальна кількість індикатора на виході змішувача за час його роботи має бути така як і на вході визначається з залежності:

$$g_i = \int_0^{\infty} Q C_e(t) dt_i. \quad (2.67)$$

Введемо безрозмірний час τ та безрозмірну концентрацію, $C(\tau_0)$, [149]:

$$\tau = \frac{t}{\Delta t}; \quad (2.68)$$

$$C(\tau) = \frac{C(t)}{C_0}. \quad (2.69)$$

Розглянемо дискретну коміркову модель, в якій довжина конвеєра розбита на n_k однакових комірок довжиною кожна $n_i = 1$. Відносний час проходження комірки n_i буде становити $\Delta\tau_i = 1$. Прийmemo цю величину за імпульс, а кількість таких імпульсів, які відповідатимуть кількості пройдених потоком суміші комірок, позначимо n_p . Тоді в початковий момент часу ($n_p = 0$) весь індикатор знаходиться в нульовій комірці. Відповідно в комірці $n_k = 0$ відносна концентрація $C_0(\tau_0) = 1$. За одиницю імпульсу, тобто за час $\tau_i = 1$, частина індикатора разом з потоком суміші перенесеться із ймовірністю p в наступну комірку, а частина, із ймовірністю $q = 1 - p$ залишиться в тій же. Оскільки загальна відносна концентрація є 1, то відносна концентрації в наступній комірці ($n_k = 1$) буде рівна ймовірності переходу $C_1(\tau_1) = p$, а в комірці $n_k = 0$ стане $C_0(\tau_1) = q$. За наступним імпульсом в нульовій комірці відносна концентрація буде $C_0(\tau_2) = q \cdot q$, в першій - $C_1(\tau_2) = p \cdot q$, а в другій $C_2(\tau_2) = p \cdot p$. Відповідно в i -ій комірці в момент часу n_p безрозмірна

концентрація (табл. 2.1) буде [149]:

$$C_i(n_p) = C_{n_p}^i p^i q^{n_p-i}. \quad (2.70)$$

де $C_{n_p}^i$ - біноміальний коефіцієнт (комбінація неупорядкованого вибору), рівний $\frac{i!}{n_k!(n_p-i)!}$, для $n_p \geq i$ та нулю для $n_p < i$.

Таблиця 2.1

Розподіл безрозмірної концентрації по комірках в перші імпульси часу для випадку $q = 1 - p = 0,5$

$\backslash n_k$ $n_p \backslash$	n_0	n_1	n_2	n_3	n_5	...	n_p	...	n_k	n_{k+1}
$\tau = 0$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\tau = 1$	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
$\tau = 2$	0,25	0,25+0,25	0,25	0	0	0	0	0	0	0
		0,5								
$\tau = 3$	0,125	0,125+0,25	0,25+0,125	0,125	0	0	0	0	0	0
		0,375	0,375							
$\tau = 4$	0,0625	0,0625+0,1875	0,1875+0,1875	0,1875+0,0625	0,0625	0	0	0	0	0
		0,25	0,375	0,25						
...										
$\tau = n_k$	$(0,5)^k$								$(0,5)^k$	

Отже, безрозмірна (відносна) концентрація на протязі часу (заданого імпульсами часу n_p) розподілиться у комірках за біноміальним законом розподілу. З кожним імпульсом часу n_p певна частка індикатора буде переміщуватись в наступну комірку. Для того, щоб індикатор опинився в n_k комірці, необхідно щоб кількість імпульсів була не менше кількості комірок $n_p \geq n_k$.

Нехай конвеєр-змішувач довжиною L поділений на n_k - комірок згідно (2.64). За кількість імпульсів часу $n_p = n_k$ індикатор не встигає пройти зону змішування і його концентрація на виході в цей момент часу $\tau = n_p$ буде рівна нулю. В час $\tau_{n_k} = n_k \Delta \tau$ індикатор з'являється на виході з концентрацією

$C_e(\tau_{n_k}) = C_{n_k}^{n_k} p^{n_k}$. В час $\tau_{n_k+1} = \frac{n_k+1}{n_k} p$ безрозмірна концентрація на виході становитиме:

$$C_e(\tau_{n_k+1}) = C_{n_k+1}^{n_k} p^{n_k} q^1. \quad (2.71)$$

В довільний безрозмірний час τ_{n_p} , який визначатиметься кількістю імпульсів n_p , безрозмірна концентрація становитиме:

$$C_e(\tau_{n_p}) = C_{n_p}^{n_k} p^{n_k} q^{n_p-n_k} = \frac{n_p!}{n_k!(n_p-n_k)!} p^{n_k} (1-p)^{n_p-n_k}. \quad (2.72)$$

Очевидно, що концентрація на виході із змішувача, коли туди досягне перша порція індикатора, (при $n_p = n_k$) буде $C_e(\tau_{n_p}) = C_{n_k}^{n_k} p^{n_k} q^0 = p^{n_k}$.

Залежність (2.72) дозволяє в дискретному вигляді визначити зміну опосередкованої безрозмірної концентрації в часі у комірці n_k за кількість імпульсів часу n_p .

На рис. 2.17 і рис. 2.18 представлено графіки зміни концентрації $C(\tau)$ для кормозмішувачів із різною кількістю комірок n_k , тобто в якому розміщено $n_k - 1$ комірок та для різної кількості імпульсів n_p .

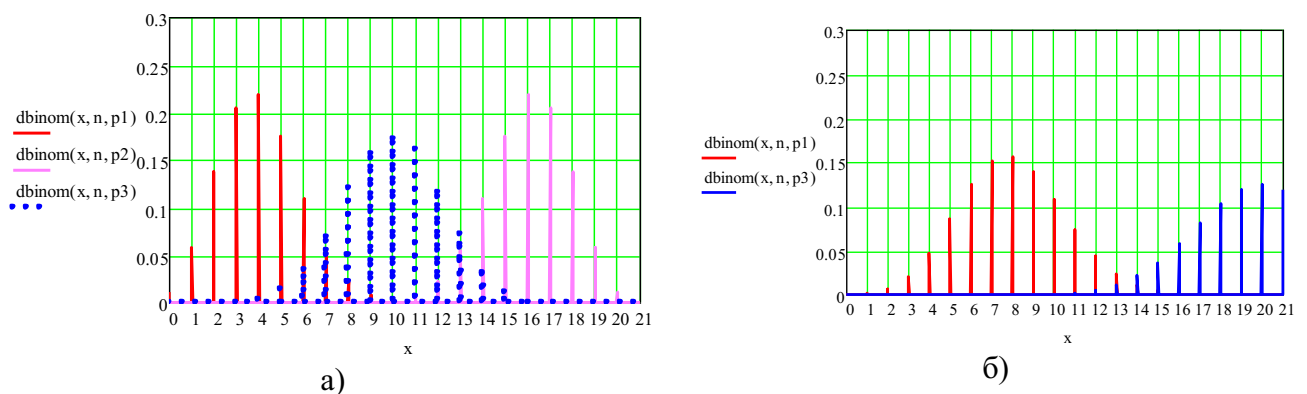


Рис. 2.17. Розподіл ключового індикатора у змішувачі довжиною $n_k = 20$ комірок за час $n_p = 20$ імпульсів із різними ймовірностями переходу із комірки в комірку 1- $p_1=0,2$; 2- $p_2=0,8$; 3- $p_3=0,5$

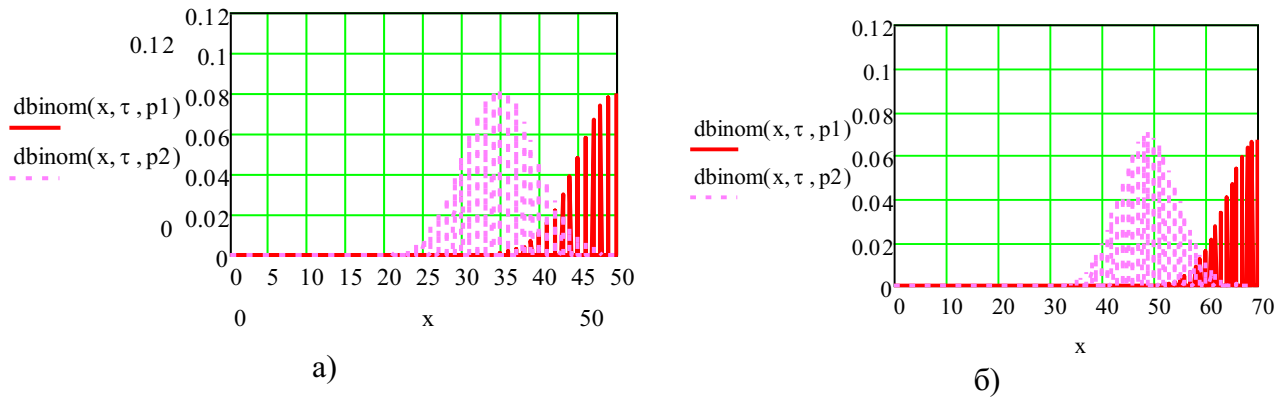


Рис. 2.18. Розподіл ключового індикатора у довгих змішувачах довжиною $n_k = 50$ (а) та $n_k = 70$ (б) комірок за час $n_p = 100$ та $n_p = 140$ імпульсів із різними ймовірностями переходу із комірки в комірку 1 - $p_1 = 0,5$; 2 - $p_2 = 0,35$

Як впливає із рис. 2.17 і рис. 2.18 найбільший рівень згладжування матиме конвеєр-змішувач, в якому ймовірність пересипання суміші становитиме $q = p = 0,5$.

В розмірних одиницях концентрація індикатора на виході:

$$C_e(t_i) = C_0 C_e(\tau) = \frac{4g_i C_e(\tau)}{\pi \psi \Delta L (D^2 - d^2)}. \quad (2.73)$$

Із врахуванням (2.63) та (2.68) залежність (2.73) прийме вигляд:

$$C_e(t_i) = C_0 C_e(\tau) = \frac{4g_i (2\pi\omega_2) C_e(t_i / \Delta t)}{\pi \psi k_L \Delta \varphi_1 T(\omega_1 - \omega_2) (D^2 - d^2)}. \quad (2.74)$$

Тут дійсний час буде рівний: $t_i = \tau \cdot \Delta t = \tau \cdot k_t \left(\frac{\Delta \varphi}{\omega_2} + \frac{2\pi - \Delta \varphi}{\omega_1} \right)$.

Значення комбінації $C_{n_p}^{n_k}$ подано в таблицях, або, за відомим попереднім значенням $C_i^{n_k}$, визначається, як:

$$C_{i+1}^{n_k} = \frac{i+1}{i+1-n_k} C_i^{n_k}. \quad (2.75)$$

Проходження ключового індикатора із ймовірністю переходу $p = 0,5$ по гвинтовому конвеєру-змішувачу представлено на рис. 2.19.

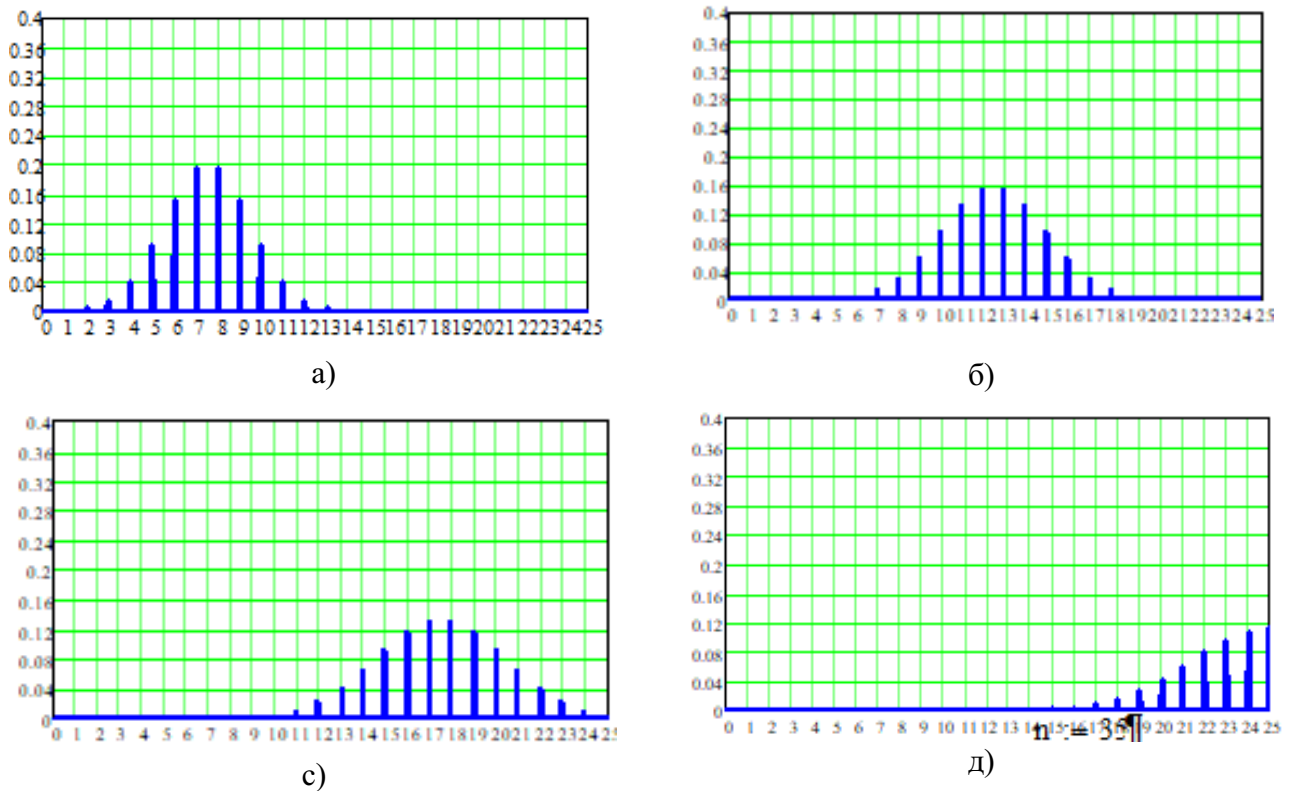


Рис. 2.20. Проходження ключового індикатора із ймовірністю переходу $p = 0,5$ по гвинтовому конвеєру-змішувачу довжиною $n_k = 25$ комірок за різну кількість імпульсів n_p : а) - $n_p = 15$; б) - $n_p = 25$; в) - $n_p = 35$; д) - $n_p = 50$

Для моделювання процесу змішування у змішувачах неперервної дії використовують залежність для поточної зміни коефіцієнта неоднорідності суміші $V_C(t)$ до моменту часу t [88]:

$$V_C(t) = aV_{CH}e^{-\Phi t}. \quad (2.76)$$

де V_{CH} – початкове значення коефіцієнта неоднорідності суміші (визначається співвідношенням компонентів суміші), $V_{CH} = V_{C0}$; a - коефіцієнт пропорційності; Φ - функція (або параметр), яка залежить від геометричних і режимних параметрів змішувача, а також від фізико-механічних властивостей суміші.

Прийемо, що функція $\Phi t = b \cdot t$ буде пропорційна кількості перелопачувань (де b - параметр, що залежить від складу та реологічних властивостей суміші). За час t кількість перелопачувань n_p буде рівна безрозмірному часу $n_p = \tau = t/\Delta t$.

Тоді залежність для поточної зміни коефіцієнта неоднорідності суміші $V_C(t)$ прийме вигляд:

$$V_C(t) = aV_{C0}e^{-\frac{b}{\Delta t}t} = aV_{C0}e^{-bt} \quad (2.77)$$

Для багатьох сумішей, внаслідок сегрегації, неможливо досягти коефіцієнта неоднорідності, меншого за мінімально можливе його значення V_{Cmin} . В такому випадку коефіцієнт неоднорідності готової суміші визначатиметься за залежністю:

$$V_C(t) = a(V_{C0} - V_{Cmin})e^{-bt} + V_{Cmin} \quad (2.78)$$

Нехай доля ключового компонента позначається u_k . Визначимо коефіцієнт неоднорідності суміші для випадку, коли компоненти подаються роздільно. Тоді у u_k всіх проб концентрація компонента буде $c_{0i} = 1$, а в інших - $c_{0j} = 0$. Відповідно середнє значення концентрації при вході в гвинтовий змішувач неперервної дії буде $\bar{c}_0 = u_k$. Тоді, коефіцієнт неоднорідності суміші (V_{C0}) на вході в змішувач буде:

$$V_{C0} = \frac{100}{\bar{c}_0} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} = \frac{100 \sqrt{u_k(1-u_k)^2 + (1-u_k)u_k^2}}{u_k} = 100 \sqrt{\frac{1-u_k}{u_k}} \quad (2.79)$$

При бункерному завантаженні компоненти попадають у конвеєр-змішувач одночасно і перемішування проходить на етапі завантаження суміші в робочу зону. Початковий коефіцієнт неоднорідності суміші, яка подається в нульову комірку конвеєра одним потоком доцільно врахувати відповідним коефіцієнтом k_u :

$$V_{C0} = 100k_u \sqrt{\frac{1-u_k}{u_k}} \quad (2.80)$$

Залежність коефіцієнта неоднорідності суміші $V_C(\tau)$ від безрозмірного часу буде:

$$V_C(\tau) = a \left(100k_u \sqrt{\frac{1-u_k}{u_k}} - V_{Cmin} \right) e^{-b\tau} + V_{Cmin} \quad (2.81)$$

Відповідно, зміна в реальному часі t коефіцієнта неоднорідності суміші $V_C(t)$, по мірі проходження робочої зони гвинтового змішувача неперервної дії, буде:

$$V_C(t) = a \left(100k_u \sqrt{\frac{1-u_k}{u_k}} - V_{Cmin} \right) e^{-\frac{bt}{\Delta t}} + V_{Cmin} \quad (2.82)$$

Залежності зміни коефіцієнта неоднорідності суміші $V_C(\tau) = V\tau(\tau)$ від кількості імпульсів, тобто безрозмірного часу $\tau = n_p$ та коефіцієнта $V_C(t) = Vt(t)$ в реальному часі t наведена на рис. 2.21.

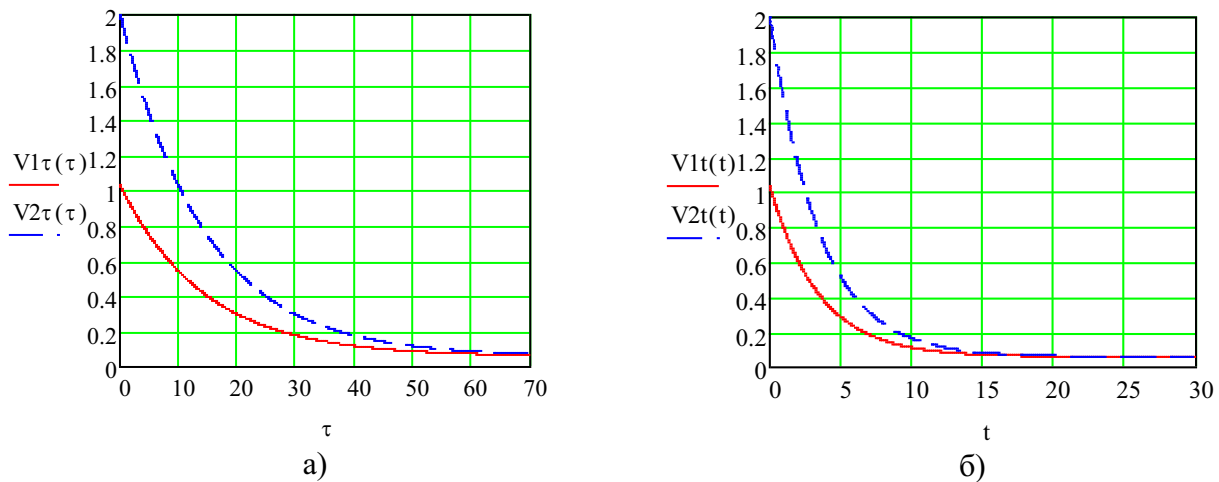


Рис. 2.21. Залежності зміни коефіцієнта неоднорідності концентрації від безрозмірного параметру часу $V_C(\tau)$ (а) та в реальному часі $V_C(t)$ (б) при початковому змішуванні компонентів в зоні подачі: $V1\tau(\tau)$; $V1e(t)$; та при подачі розділених компонентів: $V2\tau(\tau)$; $V2t(t)$

Оскільки кількість перелопачувань n_p відповідає кількості комірок n_k , то із врахуванням (2.63) залежність (2.75) для визначення коефіцієнта неоднорідності на виході конвеєра змішувача можна записати у вигляді:

$$V_{CL} = a \left(100k_u \sqrt{\frac{1-u_k}{u_k}} - V_{Cmin} \right) e^{-n_k} + V_{Cmin} \quad (2.83)$$

Із врахуванням того, що $n_k = L / \Delta L = \frac{2\pi\omega_2 L}{k_L \Delta\phi_1 T (\omega_1 - \dot{\theta})}$, залежність (2.83)

прийме вигляд:

$$V_{CL} = a \left(100k_u \sqrt{\frac{1-u_k}{u_k}} - V_{Cmin} \right) e^{-\frac{2\pi b \omega_2 L}{k_L \Delta\phi_1 T (\omega_1 - \dot{\theta})}} + V_{Cmin} \quad (2.84)$$

де b - коефіцієнт, який враховує реологічні властивості матеріалу, коефіцієнт заповнення конвеєра та інші невраховані фактори.

На рис. 2.22,а наведено графік зміни кількості комірок n_k у гвинтовому конвеєрі-змішувачі довжиною $L = 1,8$ м, кроком гвинта $T = 0,8$ м та діаметром кожуха $D_0 = 0,1$ м, що обертається з кутовою швидкістю $n_2 = 150$ об/хв. від кута його нахилу γ при різних кутових швидкостях обертання гвинта n_1 , а на рис. 2.22,б - залежність зміни концентрації неоднорідності суміші V_{CL} для тих же параметрів гвинтового змішувача.

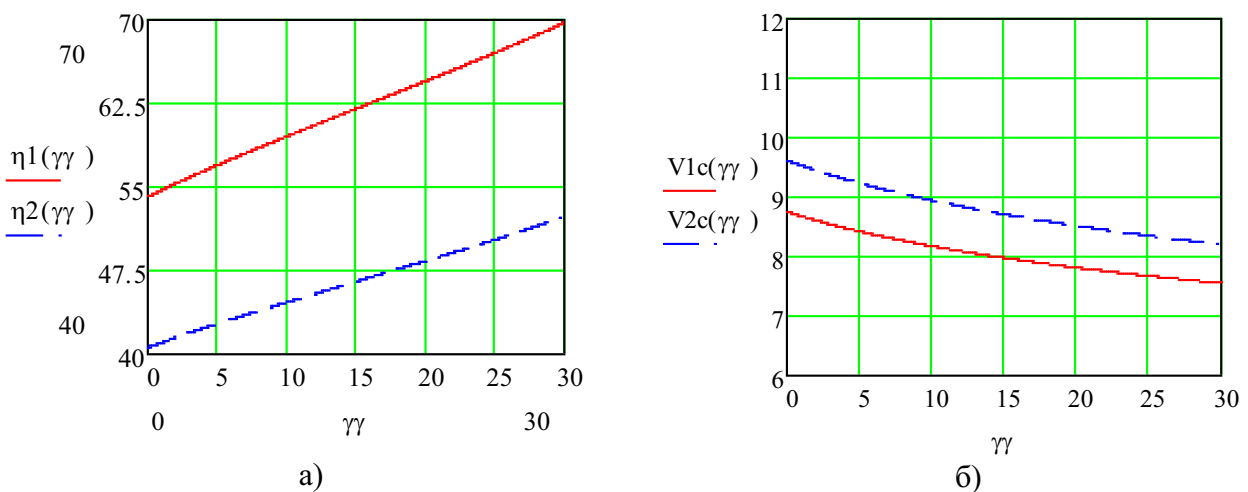


Рис. 2.22. Зміна кількості комірок $n_k = \eta(\gamma\gamma)$ (а) та коефіцієнта неоднорідності концентрації суміші $V_{CL} = Vc(\gamma\gamma)$ від кута нахилу конвеєра-змішувача γ при кутовій швидкості гвинта, об/хв.: 1) $n_1=300$; 2) $n_1 = 350$.

Із врахуванням (2.84) коефіцієнт неоднорідності суміші по біжучій довжині конвеєра-змішувача змінюватиметься за законом:

$$V_C(x) = a \left(100k_u \sqrt{\frac{1-u_k}{u_k}} - V_{Cmin} \right) e^{-\frac{2\pi\omega_2 x}{k_L \Delta\phi_1 T (\omega_1 - \dot{\theta})}} + V_{Cmin} \quad (2.85)$$

За результатами дослідження встановлено, що якість змішування сумішей у похилих прямоточних гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, а саме коефіцієнт неоднорідності суміші, змінюється в досить широкому діапазоні і, в основному, залежить від кількості перелопачувань суміші в робочому об'ємі та визначається режимами роботи змішувача, його параметрами та кутом нахилу.

2.4. Висновки

1. На основі проведеного аналізу встановлено, що відомі моделі транспортування вантажу швидкохідними та тихохідними конвеєрами неадекватно відтворюють процес транспортування суміші для перехідних режимів і для описання процесу змішування сумішей похилими гвинтовими конвеєрами змішувачами є потреба розробки принципово нової моделі.

2. За результатами проведеного дослідження розроблено модель руху динамічного тіла волочіння суміші, яке локалізовано дугою піднімання суміші і переміщується вздовж русла конвеєра, а сама суміш має як поступальний так і обертальний рух.

3. Встановлено, що основним фактором, що впливає на колове переміщення суміші, є обертовий рух кожуха, а обертанням гвинта забезпечується її осьове переміщення. При цьому, залежно від режимів їх роботи, зону динамічного тіла обертання розділяється на дві області, в яких зовнішні сили сприяють відповідно висхідному та низхідному коловому руху частинок суміші відносно обертового кожуха. Показано, що рух динамічного тіла волочіння можна привести до руху частинки з приведеними параметрами.

4. За результатами розв'язку диференціальних рівнянь руху динамічного тіла волочіння вантажу, що складається із висхідної та низхідної частин із спільним центром ваги параметром θ_C , визначено кінематичні та динамічні параметри транспортування суміші, зокрема осьові та колові складові

швидкості потоку частинок суміші, а також продуктивність конвеєра-мішувача та його потужність і значення моментів приводу робочих органів.

5. Встановлено що змішувача здатність гвинтового конвеєра-змішувача залежить від перерозподілу суміші що захвачується гвинтом та пересипається через вал і таке співвідношення залежить від режимів роботи конвеєра змішувача та кутів цього нахилу. Із врахуванням цього розроблена потокова коміркова модель конвеєра-змішувача, за довжину комірки якої прийнято шлях, яку пройде суміш за час одного перелопачування.

6. Встановлено, що згладжувальна здатність похилого гвинтового конвеєра-змішувача оптимізується при ймовірності просипання суміші через вал $p = 0,5$ та зростає із ростом кількості комірок, тобто із збільшенням довжини конвеєра-змішувача L , зменшенням кроку гвинта T та різниці між кутовими швидкостями гвинта та кожуха $\omega_1 - \omega_2$, при раціональному значенні кутової швидкості кожуха ω_2 .

7. Показано, що якість змішування можна оцінювати експоненціальною залежністю коефіцієнта неоднорідності змішування від безрозмірного часу, що відповідає кількості перелопачувань суміші. Якість змішування покращується при похилому розміщені конвеєра та виборі кутових швидкостей обертання гвинта та кожуха, який забезпечує перехідний режим транспортування суміші і зростає пропорціонально тим же параметрам режиму змішування, що і згладжувальна здатність конвеєра.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ШНЕКОВОГО ЗМІШУВАЧА З РЕГУЛЬОВАНОЮ ПОДАЧЕЮ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Для виконання поставлених завдань та мети кваліфікаційної роботи, перевірки адекватності теоретичних досліджень, здійснення практичної перевірки ефективності змішування з одночасним транспортуванням сільськогосподарських матеріалів запропонованими конструкціями шнекових змішувачів, одержаних внаслідок морфологічного аналізу та синтезу, проведено експериментальні дослідження у лабораторіях кафедри автомобілів ТНТУ.

В процесі виконання експериментальних та теоретичних досліджень вносились зміни з метою вдосконалення конструкції запропонованих шнекових змішувачів та вибору раціонального варіанту конструкції, встановлювались межі основних факторів, що впливають на якість змішування та характеризують особливості роботи і конструкції запропонованого шнекового змішувача

Програма експериментальних досліджень охоплювала такі етапи:

- розроблення та виготовлення дослідного зразка шнекового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування матеріалів.

- проведення експериментальних досліджень для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача, зокрема частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, із потужністю приводу обертання шнека, потужністю приводу обертання кожуха, продуктивністю шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації

різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки.

- збір та проведення статистичної обробки даних результатів експериментальних досліджень з одержанням рівнянь регресії у кодованих та натуральних величинах залежності функціональних параметрів шнекового змішувача від його конструктивних та технологічних незалежних змінних параметрів а також перевірка адекватності одержаних рівнянь за допомогою прикладного програмного забезпечення.

- перевірка функціональних можливостей вдосконаленої конструкції шнекового змішувача в умовах реального виробництва.

Експериментальні та виробничі дослідження проведено в 2022 – 2024 роках в лабораторії піднімально-транспортних машин кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та частково на ТОВ «Сієфджі Трейдинг» Компанії «Контінентал Фармерз Груп», фермерському господарстві «Крок вперед 2019», фермерському господарстві «Дари долини» і ПП «Хлопівецьке».

3.2. Параметри лабораторної установка шнекового змішувача з регульованою подачею для проведення експериментальних досліджень

Ефективність процесу змішування шнековими конвеєрами залежить від їх конструктивних особливостей, зокрема від геометрії обмеженого об'єму, де проходить змішування, матеріалів робочих елементів, швидкості і часу змішування, властивостей сипких компонентів, що піддаються змішуванню, таких як розміри частинок, вологість, коефіцієнти тертя. Дослідження впливу цих параметрів аналітичними методами є складними і не забезпечують достатньої точності, тому важливими є експериментальні дослідження із проектуванням і виготовленням установок шнекових конвеєрів, зокрема із обертовими кожухами.

Завданням модернізації гвинтових конвеєрів із додаванням нових елементів у їх конструкції та кінематиці є підвищення ефективності змішування

сипких матеріалів за рахунок збільшення траєкторії переміщення частинок компонентів із зони завантаження до зони вивантаження без збільшення габаритних розмірів змішувачів.

Одним із етапів програми експериментальних досліджень є розроблення та виготовлення конструкції експериментальної установки шнекового змішувача з обертовим кожухом для визначення і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів.

Однією із сучасних тенденцій проектування шнекових конвеєрів є створення можливості транспортування з одночасним поєднанням різноманітних технологічних операцій оброблення сипких матеріалів. Серед таких операцій як калібрування, подрібнення, очищення, сепарація важливе місце займають процеси змішування різних сипких матеріалів, тому створення, виготовлення та дослідження прогресивних конструкцій шнекових конвеєрів для забезпечення вказаного процесу є актуальним завданням.

На основі попередньо виконаного літературно-патентного пошуку та модифікованого морфологічного аналізу здійснено синтез та одержано патенти України на корисні моделі на декілька конструкцій шнекових конвеєрів з обертовими кожухами [152-157], що забезпечують одночасне транспортування та змішування сипких матеріалів. Для дослідження запропонованих конструкцій шнекових конвеєрів спроектовано і виготовлено експериментальну установку [145, 157].

Дослідний зразок шнекового змішувача з обертовим кожухом із можливістю зміни кута нахилу змішувача, частоти та напрямку обертання шнека та кожуха, зміни конструкції шнеків зображено на рис. 3.1 – рис. 3.4 та рис. 3.8.

Основним конструктивними елементами експериментального зразка шнекового змішувача (рис. 3.1 – рис. 3.3) є: базова рама 1, на якій нерухомо встановлено вісь 2. На вісі 2 розміщено два підшипникових вузли 3, що закріплені на рухомій рамі 4. Це дозволяє, обертаючи рухоми раму 4 на

підшипникових вузлах 3 відносно осі 2, змінювати кут нахилу робочих органів шнекового змішувача відносно горизонту.

Фіксація кутового розміщення рухомої рами 4, що визначається план-матрицею проведення експериментальних досліджень, виконується за допомогою планки 5 та болтів 6, що встановлюються у отвори планки 5, рухомої рами 4 та базової рами 1.

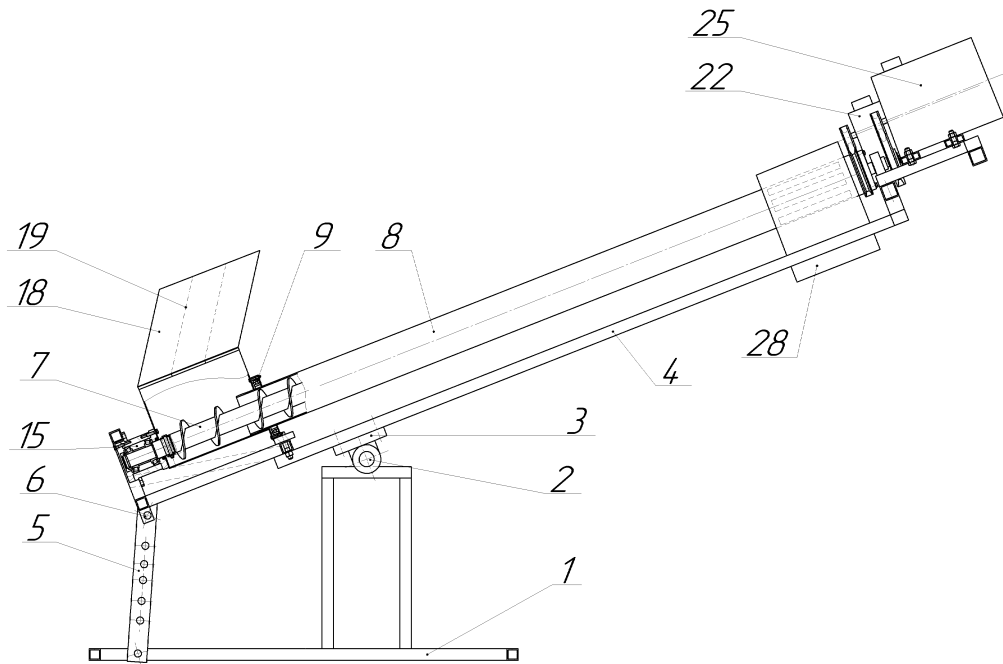


Рис. 3.1. Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження процесу одночасного транспортування і змішування сипких матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом

Шнек 7 встановлено в середині обертового кожуха 8, що на двох підшипникових вузлах 9 та 10 розміщений на рухомій рамі 4. З верхньої та нижньої торцевої сторони шнека за допомогою болтів 11 встановлено дві півосі 12 та 14. Це дозволяє швидко замінювати різні типи шнеків.

Нижня піввісь 12 встановлена у підшипниковому вузлі 15 із двома спареними конічними роликівими підшипниками, що дозволяє протидіяти осьовим навантаженням на шнек. Підшипниковий вузол 15 жорстко приєднано до рухомої рами 4. Верхня піввісь 14 встановлена у підшипнику 16, що розміщений у шкві 17, який жорстко приєднано до обертового кожуха 8. Також

можливий варіант розміщення верхньої піввісі 14 у підшипниковому вузлі, що приєднаний до рухомої рами 4.

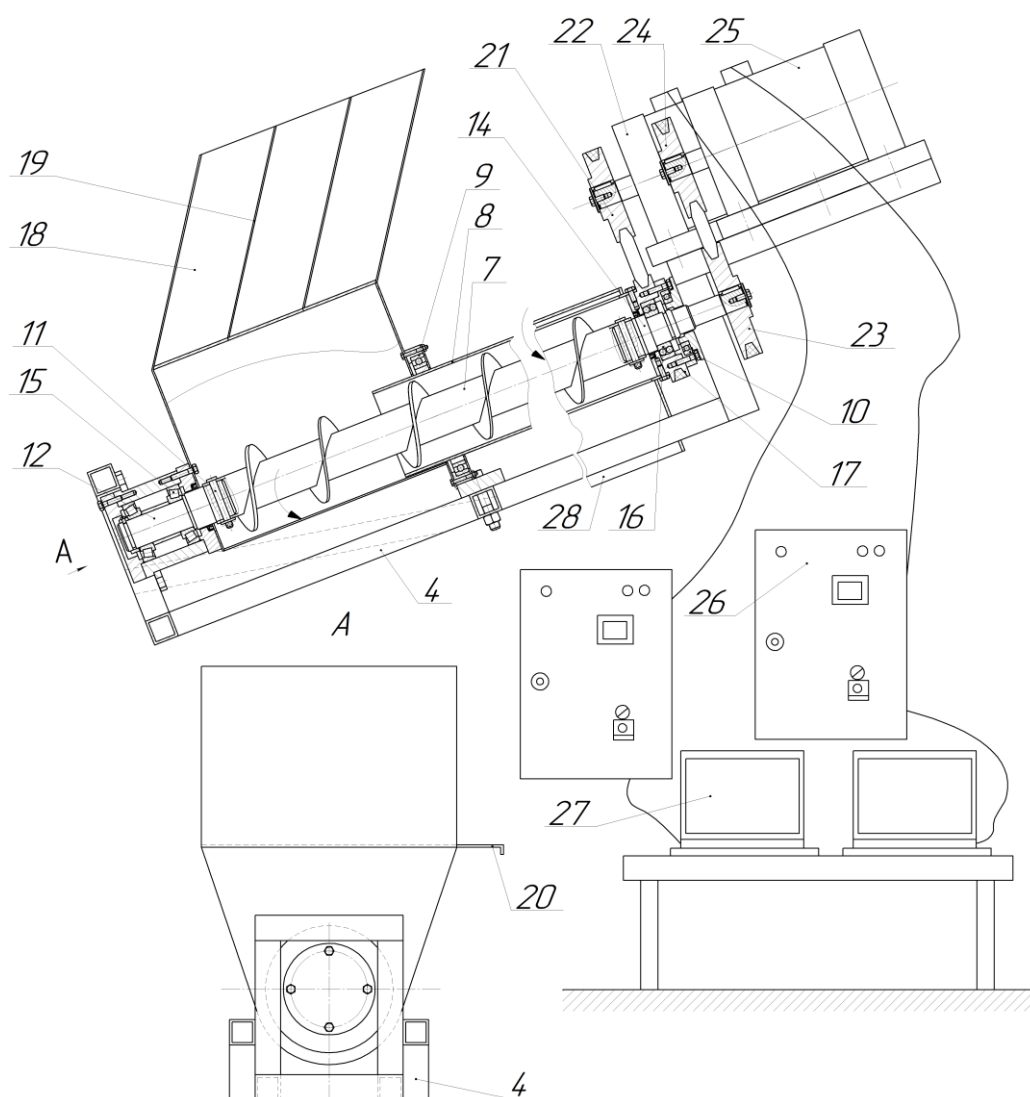


Рис. 3.2. Робочі органи експериментальної установки для дослідження процесу одночасного транспортування і змішування сипких матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом

Для завантаження сипких матеріалів у конвеєр використано бункер 18 із радіусним дном, що жорстко закріплений на рухомій рамі 4. У бункері 18 встановлено перегородки 19, кількість яких та відстань між ними можна змінювати залежно від необхідної кількості різних сипких матеріалів, що піддаються одночасному транспортуванню та змішуванню. Для регулювання коефіцієнта завантаження конвеєра у бункері 18 також встановлені шибери 20,

що дозволяють змінювати величину отворів пересипання матеріалів окремо для кожного з об'ємів між перегородками 19 бункера 18.

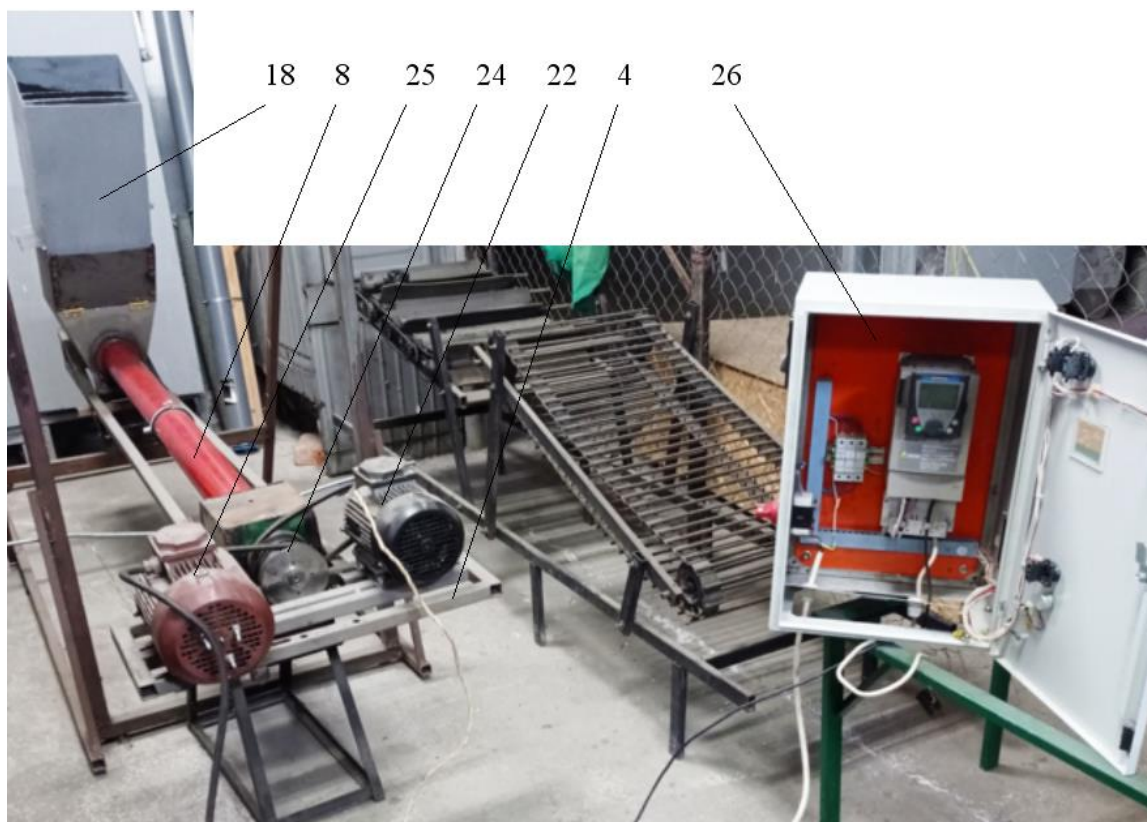


Рис. 3.3. Фото загального вигляду експериментальної установки

Для розвантаження конвеєра в межах патрубку 28 на обертовому кожусі 8 сформовано рівномірно розміщені по колу прямокутні пази.

Шків 17 обертового кожуха 8 через пасову передачу 21 приєднано до електродвигуна 22. На верхній піввісі 14 закріплено шків 23, що через пасову передачу 24 приєднано до електродвигуна 25.

До електродвигунів 24 та 25 за допомогою кабелів під'єднано два окремих перетворювачі 26 частоти струму (Altivar 71), що подається із мережі до електродвигунів. Керування роботою перетворювачів частоти струму, а відповідно і електродвигунами та конвеєром загалом здійснюється за допомогою двох ПК 27 з програмним забезпеченням PowerSuite.

Застосування частотних перетворювачів 26 дозволяє плавно збільшувати та зменшувати частоти обертання кожуха 8 та гвинтового робочого органа 7 у широкому діапазоні, що забезпечує виконання досліджень відповідно до розробленої методики проведення експериментів.

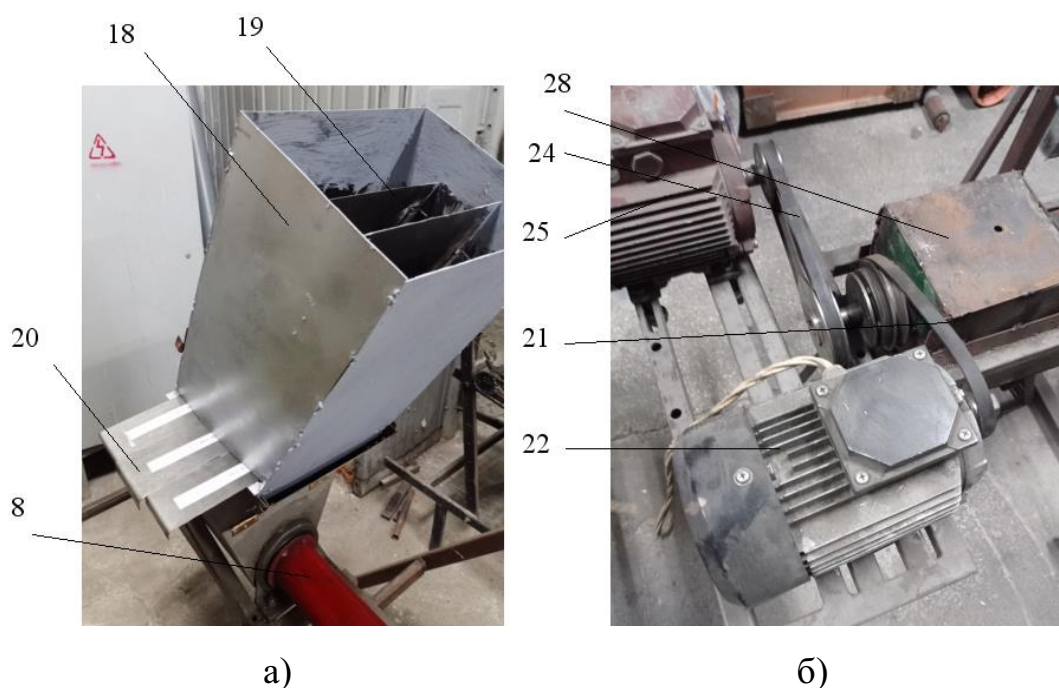


Рис. 3.4. Фото бункера а) та приводів б) експериментальної установки

Шнековий змішувач працює у режимах транспортування вантажу із підвищеною продуктивністю при обертанні кожуха 8 проти напрямку обертання шнека 7 та у режимі змішування сипких матеріалів із обертанням

кожуха 8 у напрямку обертання шнека 7.

Під час виконання експериментальних досліджень різні види сипкого матеріалу подавали між перегородками 19 бункера 18. При вмиканні електродвигунів 22 та 25 за допомогою шнека 7 та обертового кожуха 8 відбувалось транспортування із одночасним змішуванням сипкого матеріалу вздовж кожуха 8 до парубка 28, звідки матеріал переміщувався у мірну тару. Керування режимами роботи двигунів 22 та 25 здійснювалось за допомогою ПК 26, частотних перетворювачів Altivar 71 та програмного забезпечення PowerSuite. В результаті одержували інформацію у вигляді чисельних даних, представлених графіками зміни потужності, що витрачається для транспортування та змішування сипких матеріалів, та крутних моментів на валах двох електродвигунів.

Продуктивність транспортування та змішування сипкого матеріалу визначали методом зважування матеріалу, що піддавався транспортуванню і змішуванню за визначений проміжок часу.

При проведенні експериментальних досліджень можливе використання різноманітних шнеків: звичайних, із змінним діаметром вала у зоні завантаження, із змінним кроком витків, гофрованих, з прорізами, з лопатями.

Використання експериментальної установки (рис. 3.1 – рис. 3.3) дозволяє досліджувати:

1. Продуктивність шнекового конвеєра при одночасному транспортуванні та змішуванні сипких матеріалів із обертанням кожуха в напрямку обертання гвинтового робочого органу або при його нерухомому стані.

2. Потужності приводів та крутні моменти на валах електродвигунів для забезпечення обертання кожуха та шнека при одночасному транспортуванні та змішуванні сипких матеріалів.

3. Величину моменту тертя, що виникає між кожухом та матеріалом, що піддається транспортуванню.

4. Моменти пуску електродвигунів приводів обертання кожуха та гвинтового робочого органу для різних комбінацій їх роботи.

5. Коефіцієнт неоднорідності змішування сипких матеріалів при роботі шнекового змішувача із обертанням кожуха в напрямку обертання гвинтового робочого органу або при його нерухомому стані.

Під час проведення експериментальних досліджень здійснювали змішування комбінації різних сипких сільськогосподарських матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Сипкі матеріали, що піддавались змішуванню шнековим конвеєром: зерна кукурудзи 1, проса 2, пшениці 3, гороху 4, гречки 5

До проведення процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів та після його проведення здійснювали зважування цих матеріалів електронними вагами (рис. 3.6) з метою визначення рівня концентрації головного компонента в пробах одержаних сумішей та продуктивності транспортування.

Після зважування сипкі матеріали завантажувались у бункер шнекового конвеєра у відділення між перегородками (рис. 3.7) із закритими шиберами отворами для пересипання.

Після запуску двигунів відбувалось переміщення шиберів у бункері на регульовану величину із попаданням матеріалу на шнек конвеєра з наступним його переміщенням та змішуванням (рис. 3.8).

Можливий діапазон частоти обертання шнека становить від 0 до 1400 об/хв., частоти обертання кожуха - від 0 до 700 об/хв. Кут нахилу шнекового змішувача від 0 до 90 градусів з відповідними модифікаціями бункера. Зовнішній діаметр та крок шнека становлять 0,096 м, довжина робочої частини шнека - 1,7 м, діаметр вала шнека - 0,04 м.



Рис. 3.6. Зважування зернових матеріалів після змішування

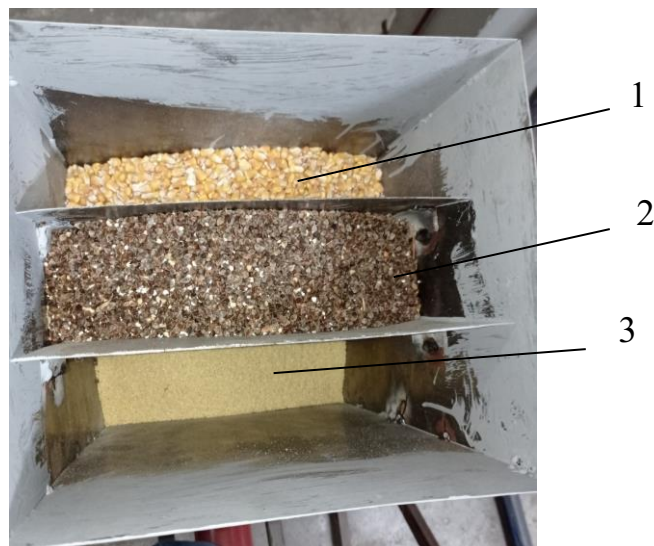


Рис. 3.7. Завантажені зерна кукурудзи 1, гречки 2 та проса 3 у бункер шнекового конвеєра у відділення між перегородками



Рис. 3.8. Фрагмент процесу транспортування та змішування сипких матеріалів шнековим конвеєром

Фрагмент результатів збору та оброблення даних з частотного перетворювача Altivar 71 програмним забезпеченням PowerSuite із побудовою графіків зміни у часі потужності та крутного моменту приводу на роторі двигуна представлено на рисунку 3.9.

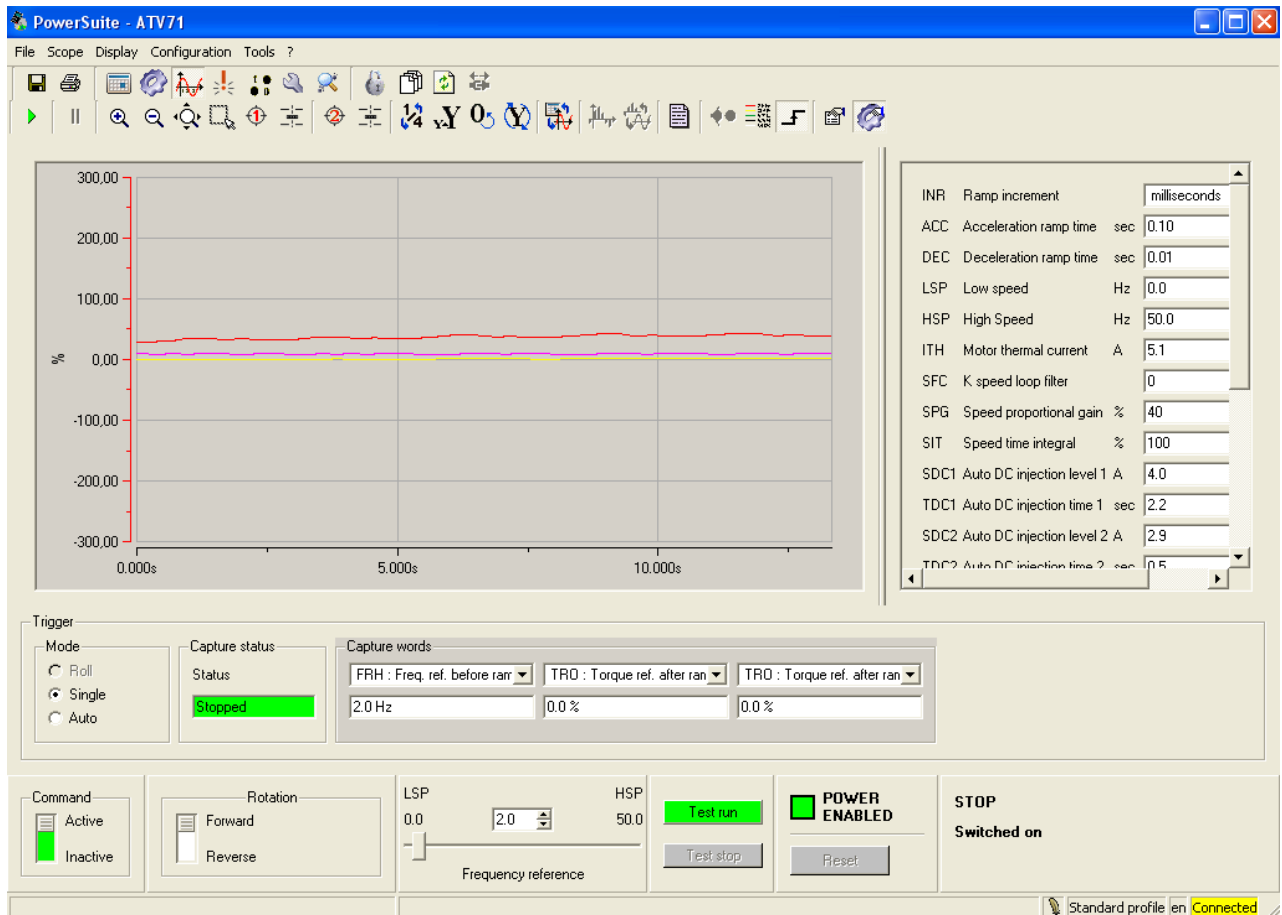


Рис. 3.9. Фрагмент результатів збору та оброблення даних за частотного перетворювача Altivar 71 програмним забезпеченням PowerSuite

Величину моменту тертя, що виникає між кожухом та матеріалом, що піддається транспортуванню та змішуванню гвинтовим конвєсром можливо визначати за схемою, представленою на рис. 3.10. При обертанні шнека конвєсра динамометричним ключем 1 вимірювали крутний момент, що виникає на обертовому кожуху 2 за допомогою важеля 3 із розміщеними на ньому мірними вантажами 4. Замість мірних вантажів також можна використовувати динамометр.



Рис. 3.10. Фото процесу визначення величини моменту тертя, що виникає між кожухом та матеріалом, що піддається транспортуванню та змішуванню шнековим конвеєром

3.3. Методика проведення експериментальних досліджень для визначення потужностей приводів обертання шнека та кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування сипких матеріалів

Для виконання програми експериментальних досліджень та поставлених завдань кваліфікаційної роботи, здійснення перевірки адекватності теоретичних залежностей розроблено та виготовлено нову конструкцію шнекового змішувача сипких зернових матеріалів на основі аналізу існуючих гвинтових змішувачів та синтезу декількох варіантів конструкцій з вибором серед них раціонального варіанту. На основі теоретичних даних та попередніх експериментів проведено вибір допоміжного вимірювального обладнання та основних конструктивних та технологічних незалежних вихідних параметрів шнекового конвеєра з обертовим кожухом, що впливають на витрати потужності, продуктивності та якості технологічної операції одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів.

Для оптимізації кількості необхідних дослідів із досягненням найменших витрат часу та ресурсів на змішування матеріалів використано відомі

математичні методи планування експериментів, що включали одночасну зміну трьох незалежних конструктивних та технологічних факторів на трьох рівнях: нижньому, верхньому та нульовому із запланованою послідовністю проведення досліджень. Для цього використано відомі формули математичної статистики та прикладне програмне забезпечення. Для кожного досліджуваного функціонального параметра шнекового змішувача визначено оптимальну кількість проведення дослідів із забезпеченням їх необхідної точності та адекватності одержаних результатів.

До основних етапів трьохфакторного експерименту віднесено [132] вибір та кодування трьох змінних незалежних факторів на трьох рівнях, створення план-матриці експерименту, визначення послідовності виконання дослідів на основі генерування випадкових чисел із кількості необхідних дослідів для усунення випадкових похибок, пов'язаних із впливом неконтрольованих зовнішніх факторів, опрацювання результатів досліджень за відомими методиками на основі формул математичної статистики, визначення коефіцієнтів рівнянь регресії другого порядку, перевірка їх значущості, переведення кодованих рівнянь регресії у натуральні величини, перевірка адекватності одержаних рівнянь регресії, побудова відповідних графіків.

Для проведення експериментальних досліджень розроблено та виготовлено нову конструкцію шнекового змішувача сипких зернових матеріалів, особливістю якого є наявність обертового кожуха та можливість плавної зміни частоти обертання шнека та кожуха у різні сторони за допомогою частотних перетворювачів. Опис установки представлено у підрозділі 3.2.

Для визначення закономірностей впливу конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача із обертовим кожухом (незалежних факторів x_i), зокрема частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, на потужність приводу обертання шнека, потужність приводу обертання кожуха, продуктивність шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса,

гороху, пшениці, гречки (параметри оптимізації N_1 , N_2 , Q , K) проведено повнофакторні експериментальні дослідження із визначенням функціональних залежностей $N_1=f(n_1, n_2, \alpha)$, $N_2=f(n_1, n_2, \alpha)$, $Q=f(n_1, n_2, \alpha)$, $K=f(n_1, n_2, \alpha)$.

Встановлено верхні та нижні межі зміни основних незалежних факторів експериментів при визначенні функціональних параметрів шнекового змішувача із обертовим кожухом:

- частота обертання шнека $n_1 = 250 - 350$ об/хв.;
- частота обертання кожуха у напрямку обертання шнека $n_2 = 100 - 200$ об/хв.;
- кут нахилу шнекового змішувача $\alpha = 0^\circ - 30^\circ$.

Вказані вище незалежні змінні вихідні фактори експерименту піддавались кодуванню для усунення впливу неоднорідності їх одиниць вимірювання на результати виведення рівнянь регресії. На наступному етапі складено план-матрицю у вигляді таблиці повного факторного експерименту (ПФЕ 3³) (табл. А.1 у додатку). Одержані результати дослідів із визначення потужності приводу обертання шнека, потужності приводу обертання кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування заносились у окремі таблиці план-матриць експерименту.

Під час змішування з транспортуванням сипких матеріалів відбувалась одночасна фіксація потужності приводів обертання шнека та кожуха завдяки застосуванню двох частотних перетворювачів Altivar 71 та ПК із програмним забезпеченням, при цьому також здійснювався збір даних для розрахунку продуктивності. Для визначення коефіцієнта неоднорідності змішування зернових матеріалів шнековим конвеєром після кожного циклу здійснювався відбір проб матеріалу та їх дослідження за стандартними методиками.

Результати експериментів, занесені у план-матрицю, піддавались статистичній обробці із застосуванням методів кореляційного та регресійного аналізу за відомими методиками [132] та з допомогою прикладного програмного забезпечення. Після цього виведено рівняння регресії досліджуваних параметрів шнекового змішувача з обертовим кожухом.

Незалежні фактори n_1 , n_2 , α є неоднорідними з різним впливом на потужність приводу обертання шнека N_1 , потужність приводу обертання кожуха N_2 , продуктивність шнекового змішувача Q та коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів K під час одночасного змішування та транспортування сипких матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом, тому приведено їх кодування до єдиної системи.

Здійснюємо переведення натуральних X_i величин вхідних факторів експерименту у кодовані x_i за формулою [132]:

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

де X_{0i} - i -й вхідний фактор нульового рівня у натуральній величині; ΔX_i - інтервал варіювання i -го вхідного фактору.

Визначено i -й вхідний фактор нульового рівня у натуральній величині за формулою [132]:

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

де $X_{i\max}$ - найбільше значення фактору (верхній рівень); $X_{i\min}$ - найменше значення фактору (нижній рівень).

Інтервал варіювання i -го вхідного фактору [132]:

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

За формулою (3.2) i -й вхідний фактор нульового рівня у натуральній величині:

- для частоти обертання шнека n_1 :

$$X_{01} = \frac{350 + 250}{2} = 300 \text{ (об/хв.)}; \quad (3.4)$$

- для частоти обертання кожуха у напрямку обертання шнека n_2 :

$$X_{02} = \frac{100 + 200}{2} = 150 \text{ (об/хв.);} \quad (3.5)$$

- для кута нахилу шнекового змішувача α :

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

Інтервали варіювання факторів та їх кодовані значення за (3.3) і (3.1):

$$\Delta X_1 = \frac{350 - 250}{2} = 50 \text{ (об/хв.);} \quad x_1 = \frac{n_1 - 300}{50}; \quad (3.7)$$

$$\Delta X_2 = \frac{200 - 100}{2} = 50 \text{ (об/хв.);} \quad x_2 = \frac{n_2 - 150}{50}; \quad (3.8)$$

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

В результаті аналізу одержаних результатів експериментальних досліджень та їх графічного відтворення встановлено, що залежність функціональних параметрів шнекового змішувача з обертовим кожухом від вихідних факторів не піддаються опису лінійними моделями і не забезпечують достатню точність, тому для цього використано рівняння регресії другого порядку, що враховують ефекти взаємодії змінних факторів [132]:

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

де \hat{y} - досліджуваний параметр одночасного транспортування та змішування зернових матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом; $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ - коефіцієнти рівняння регресії; x_1, x_2, x_3 - значення вхідних факторів у кодованих величинах.

На основі вибору змінних вхідних факторів, рівнів їх варіювання та розрахунків за формулами (3.1) – (3.9) одержано таблицю 3.1 при дослідженні

потужності приводу обертання шнека, потужності приводу обертання кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів.

Таблиця 3.1

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання при дослідженні потужності приводу обертання шнека, потужності приводу обертання кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Частота обертання шнека	n_1 , об/хв.	x_1	50	350 (+1)	300 (0)	250 (-1)
Частота обертання кожуха у напрямку обертання шнека	n_2 , об/хв.	x_2	50	200 (+1)	150 (0)	100 (-1)
Кут нахилу шнекового змішувача	α , град.	x_3	15	30 (+1)	15 (0)	0 (-1)

Таблицю із комбінаціями проведення експериментів представлено у додатку А.

Коефіцієнти рівняння регресії другого порядку (3.10) розраховувались за відомими методиками [132]:

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

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

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

$$b_{ii} = a_5 \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u - a_6 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot \bar{y}_u - a_7 \cdot \sum_{u=1}^N \bar{y}_u . \quad (3.14)$$

де x_{iu} - значення кодованої змінної у стовпці план-матриці експерименту; \bar{y}_u - середнє значення u -го досліді; u - послідовний номер проведеного експерименту; i, j, k - порядкові номери факторів; N - кількість проведених дослідів експерименту; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ - константи [132].

Дисперсія похибки у кожному досліді експерименту [132]:

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

де n – кількість виконаних дослідів при однакових вхідних факторах.

Дисперсія відтворення експериментів [132]:

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

Величина розсіювання коефіцієнтів рівняння регресії [132]:

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

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

де a_8, a_9, a_{10}, a_{11} – константи [132].

Граничні значення зміни коефіцієнтів рівняння регресії [132]:

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

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

де t_T - значення t - критерій Стьюдента.

Коефіцієнти рівняння регресії є значущими, якщо виконується умова:

$$|b_i| \geq \Delta b_i.$$

Перевірку адекватності одержаних рівнянь регресії здійснювали за F-критерієм Фішера [132]:

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

де S_H^2 - різниця між даними із рівняння регресії та даними проведених дослідів.

Різницю між даними із рівняння регресії та даними проведених дослідів визначено за формулою [132]:

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

де k' - кількість значущих коефіцієнтів одержаного рівняння регресії.

Для адекватного опису залежності досліджуваних параметрів від змінних факторів експерименту вибрано табличне значення критерію Фішера F_T при 5 % - му рівні значимості.

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівнянь регресії, в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності потужності приводу обертання шнека, потужності приводу обертання кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом. Вказані поверхні відгуку представлено у розділі 4.

Якість змішування комбінації різних сипких матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом визначали за коефіцієнтом неоднорідності [64], %:

$$K = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (3.23)$$

де \bar{c} - середня значення концентрації головного компонента в n замірах суміші, %; c_i – значення концентрація головного компонента в одному замірі суміші, %.

Частоту обертання шнека при застосуванні частотного перетворювача визначали за формулою [127]:

$$n_1 = \frac{n_e f_c i_1}{50}, \quad (3.24)$$

де n_e – частота обертання ротора електродвигуна при 50 Герцах; f_c - частота переданого струму на обмотки двигуна від перетворювача частоти; i_1 - передаточне відношення пасової передачі.

3.4. Висновки

1. Представлено програму і методику проведення експериментальних досліджень лабораторного зразка шнекового конвеєра з регульованою подачею

матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування матеріалів з метою вдосконалення конструкції запропонованих шнекових змішувачів та вибору раціонального варіанту конструкції та технологічних параметрів.

2. Представлено розроблену на основі отриманих патентів України та виготовлену конструкцію експериментальної установки шнекового конвеєра з обертовим кожухом для дослідження і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів. Дослідний шнекового конвеєра з обертовим кожухом надає можливість зміни кута нахилу конвеєра від 0 до 90 градусів з відповідними модифікаціями бункера, частоти та напрямку обертання гвинтового робочого органу від 0 до 1400 об/хв. та кожуха - від 0 до 700 об/хв., а також дозволяє забезпечити швидко зміну гвинтових робочих органів різних конструкцій: звичайних, із змінним діаметром вала у зоні завантаження, із змінним кроком витків, гофрованих, з прорізами, з лопатями. Забезпечено можливість керування гвинтового конвеєра та збору експериментальних даних за допомогою ПК, частотних перетворювачів Altivar 71 та програмного забезпечення PowerSuite. Використання експериментальної установки дозволяє досліджувати: продуктивність гвинтового конвеєра при змішуванні сипких матеріалів, потужності приводів та крутні моменти на валах електродвигунів, величину моменту тертя, що виникає між кожухом та сипким матеріалом, коефіцієнти неоднорідності змішування сипких матеріалів.

3. Представлено методику проведення повнофакторних експериментів із визначенням потужності приводу обертання шнека, потужності приводу обертання кожуха, продуктивності шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом від зміни трьох основних факторів: частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, тобто $N_1=f(n_1, n_2, \alpha)$, $N_2=f(n_1, n_2, \alpha)$, $Q=f(n_1, n_2, \alpha)$, $K=f(n_1, n_2, \alpha)$.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Результати експериментальних досліджень коефіцієнта неоднорідності змішування зернових матеріалів шнековим змішувачем з регульованою подачею

Відповідно до методики, описаної у підрозділі 3.3 кваліфікаційної роботи, для виконання поставлених завдань проведено експериментальні дослідження із використанням розробленого та виготовленого дослідного зразка шнекового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування зернових матеріалів [158, 159].

Під час експериментальних досліджень визначали закономірності взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача, зокрема частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, із коефіцієнтом неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки. Зокрема, проведено три основні досліді: при змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса (ключовий компонент – зерна проса (20%), умовні компоненти – зерна кукурудзи (40%) та гречки (40%); при змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки (ключовий компонент – зерна гречка (20%), умовний компонент – зерна кукурудзи (80%); при змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху (ключовий компонент – зерна гороху (20%), умовний компонент – зерна пшениці (80%).

Проведено на основі статистичної обробки результатів експериментів розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії (3.10), використовуючи рівняння (3.11) – (3.14). Числові значення вказаних коефіцієнтів представлено у таблицях 4.1-4.3.

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса від зміни трьох основних факторів: частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, тобто $K_1=f(n_1, n_2, \alpha)$ за результатами проведених експериментів у кодованих величинах дорівнює:

$$K_{1(x_1, x_2, x_3)} = 9 + 0,551x_1 - 0,801x_2 - 0,626x_3 + 0,116x_1x_2 - 0,054x_1x_3 + \quad (4.1)$$

$$+ 0,019x_2x_3 + 0,155x_1^2 - 0,055x_2^2 + 0,25x_3^2,$$

де x_1 - кодоване значення з частоти обертання шнека; x_2 - кодоване значення частоти обертання кожуха; x_3 - кодоване значення кута нахилу шнекового змішувача.

Таблиця 4.1

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса

Коефіц.	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Кукурудза, гречка, просо	9	0,551	-0,801	-0,626	0,116	-0,054	0,019	0,155	-0,055	0,25

Усі коефіцієнти рівняння регресій (4.1) є значущими відповідно до формул (3.18) та (3.20).

Запишемо рівняння регресії (4.1) у натуральних величинах:

$$K_{1(n_1, n_2, \alpha)} = 15,88 - 0,032n_1 - 0,024n_2 - 0,057\alpha + 4,64 \cdot 10^{-5} n_1 n_2 - \quad (4.2)$$

$$- 7,2 \cdot 10^{-5} n_1 \alpha + 2,53 \cdot 10^{-5} n_2 \alpha + 6,2 \cdot 10^{-5} n_1^2 - 2,2 \cdot 10^{-5} n_2^2 + 1,11 \cdot 10^{-3} \alpha^2.$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (4.2), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 4.1 – рис. 4.4.

Аналізуючи рівняння регресії (4.1), встановлено, що основним фактором, який впливає на коефіцієнт неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом є фактор $x_2(n_2)$. Менший вплив має фактор $x_3(\alpha)$ і найменший - фактор $x_1(n_1)$. Зростання другого і третього факторів призводить до зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування, а зростання першого – до збільшення коефіцієнта неоднорідності змішування.

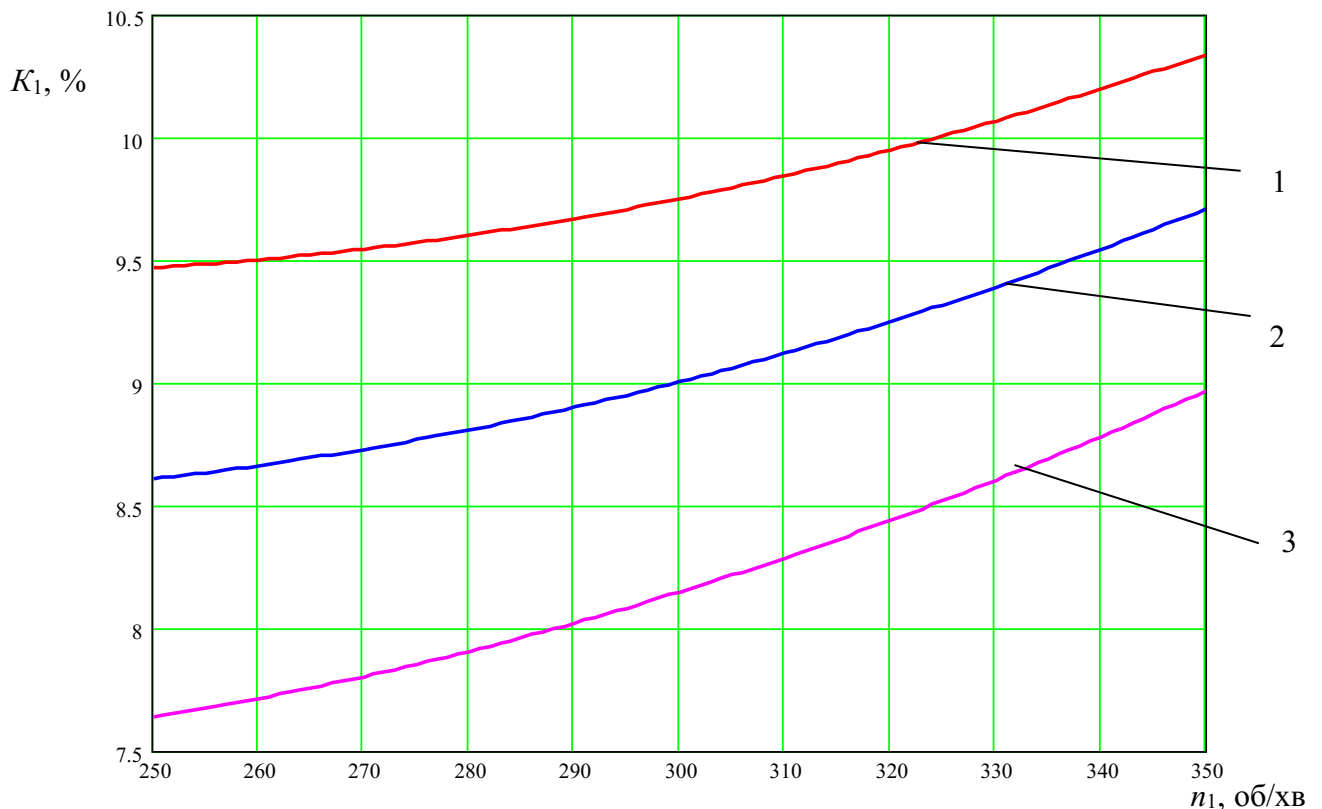


Рис. 4.1. Графічні залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 при $\alpha=15$ град: 1) $n_2=100$ об/хв; 2) $n_2=150$ об/хв; 3) $n_2=200$ об/хв.

З рисунків 4.1 - 4.4 та рівняння регресії (4.2) зроблено висновки, що при зменшенні частоти обертання шнека та збільшенні частоти обертання кожуха і кута його нахилу величина коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом зменшується. Максимальне значення коефіцієнта неоднорідності рівнювало 11,28 %, а мінімальне – 7,32 %.

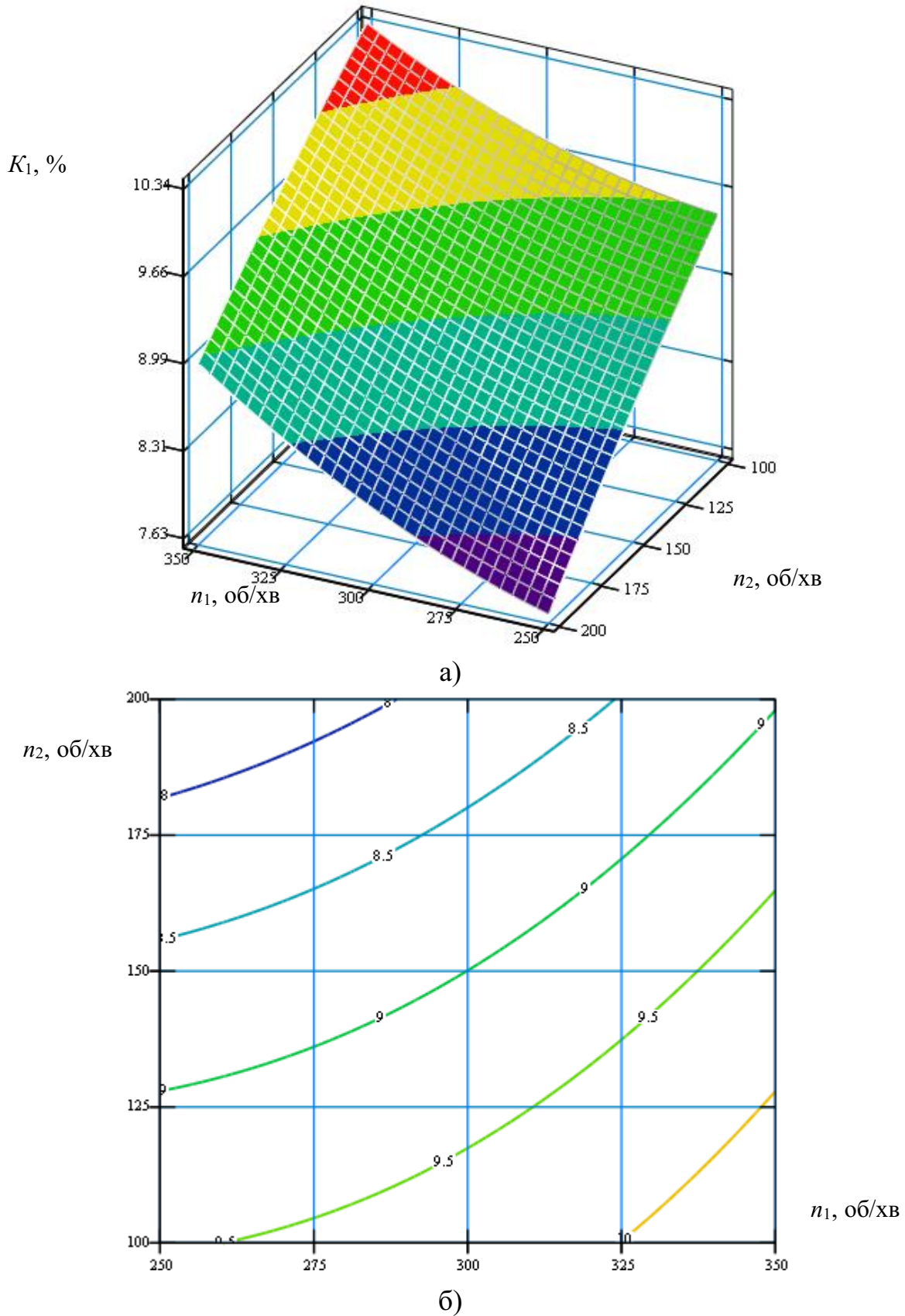


Рис. 4.2. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)

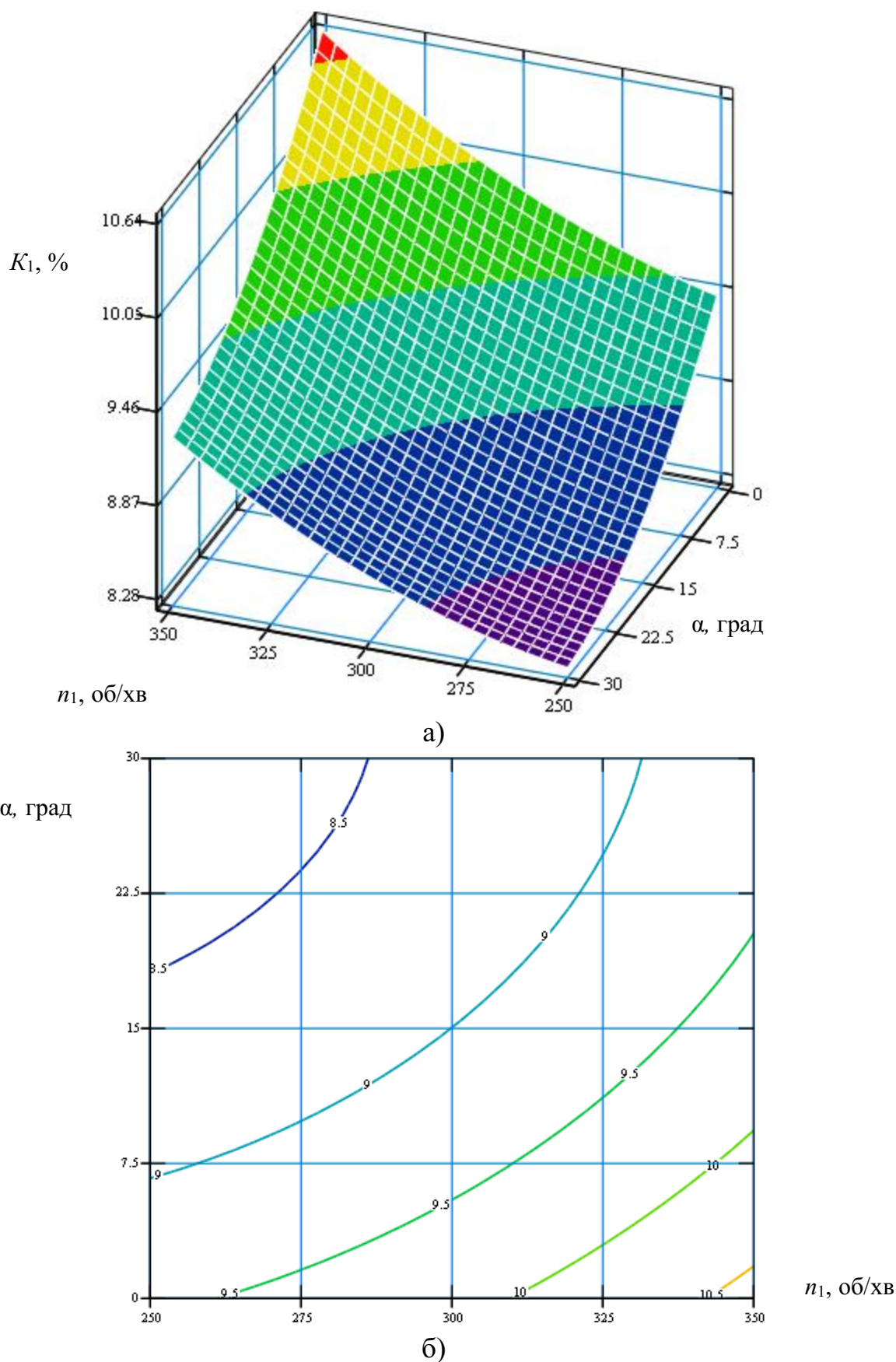


Рис. 4.3. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута його нахилу α ($n_2=150$ об/хв.)

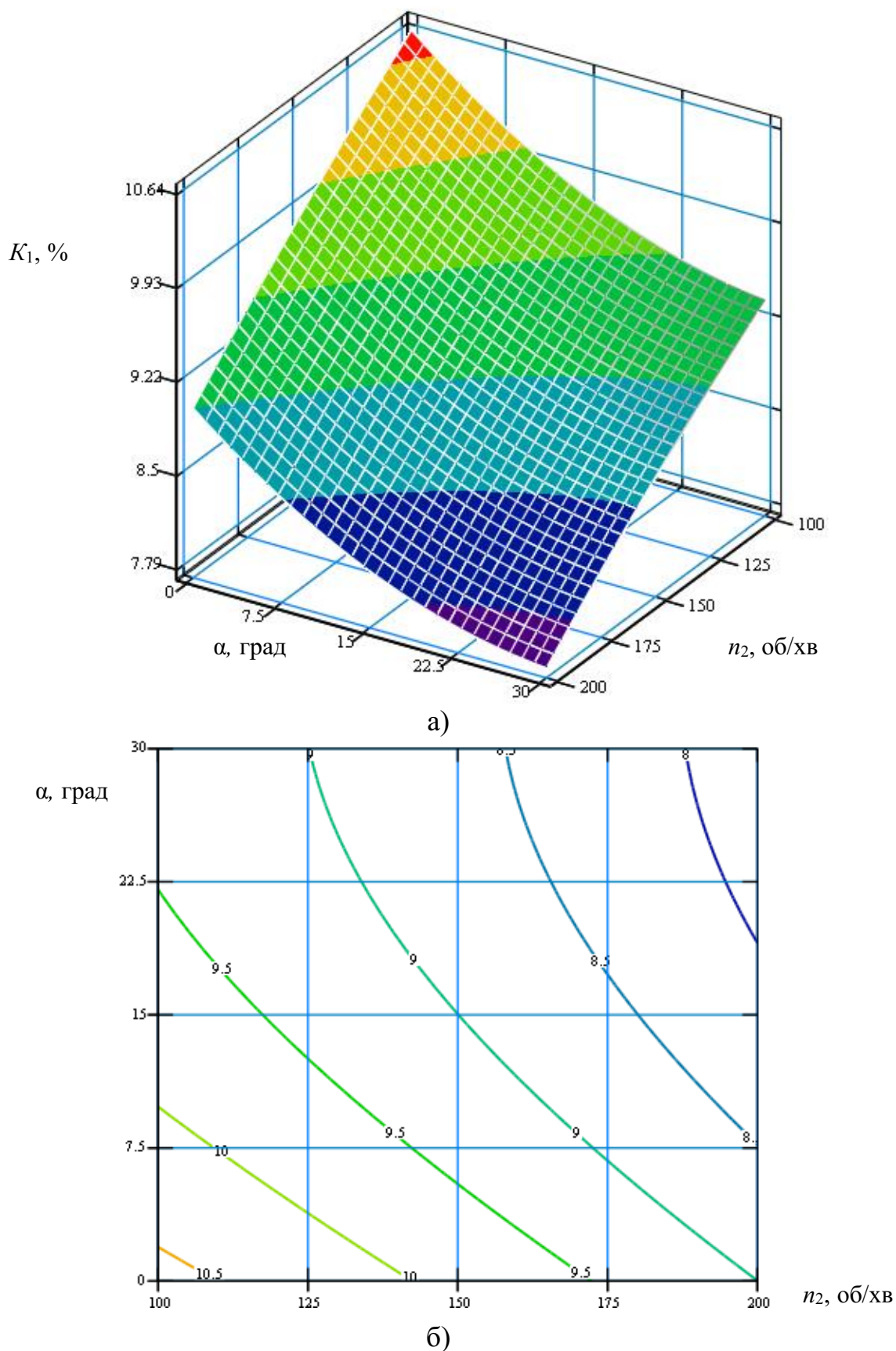


Рис. 4.4. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута його нахилу α ($n_1=300$ об/хв.)

Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,1 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,22 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,12 рази.

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки від зміни трьох основних факторів: частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, тобто $K_2=f(n_1, n_2, \alpha)$ за результатами проведених експериментів у кодованих величинах дорівнює:

$$K_{2(x_1, x_2, x_3)} = 8,505 + 0,73x_1 - 0,69x_2 - 0,61x_3 + 0,1x_1x_2 - 0,05x_1x_3 + 0,025x_2x_3 + 0,142x_1^2 - 0,058x_2^2 + 0,242x_3^2. \quad (4.3)$$

Таблиця 4.2

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки

Коефіц.	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Кукурудза, гречка	8,505	0,73	-0,69	-0,61	0,1	-0,05	0,025	0,142	-0,058	0,242

Усі коефіцієнти рівняння регресій (4.3) є значущими відповідно до формул (3.18) та (3.20).

Запишемо рівняння регресії (4.3) у натуральних величинах:

$$K_{2(n_1, n_2, \alpha)} = 14,58 - 0,0302n_1 - 0,0214n_2 - 0,0546\alpha + 4 \cdot 10^{-5}n_1n_2 - 6,67 \cdot 10^{-5}n_1\alpha + 3,33 \cdot 10^{-5}n_2\alpha + 5,68 \cdot 10^{-5}n_1^2 - 2,32 \cdot 10^{-5}n_2^2 + 1,075 \cdot 10^{-3}\alpha^2. \quad (4.4)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (4.3), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх

двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 4.5 – рис. 4.8.

Аналізуючи рівняння регресії (4.3), встановлено, що основним фактором, який впливає на коефіцієнт неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом є фактор $x_1(n_1)$. Менший вплив має фактор $x_2(n_2)$ і найменший - фактор $x_3(\alpha)$. Зростання другого і третього факторів призводить до зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування, а зростання першого – до збільшення коефіцієнта неоднорідності змішування.

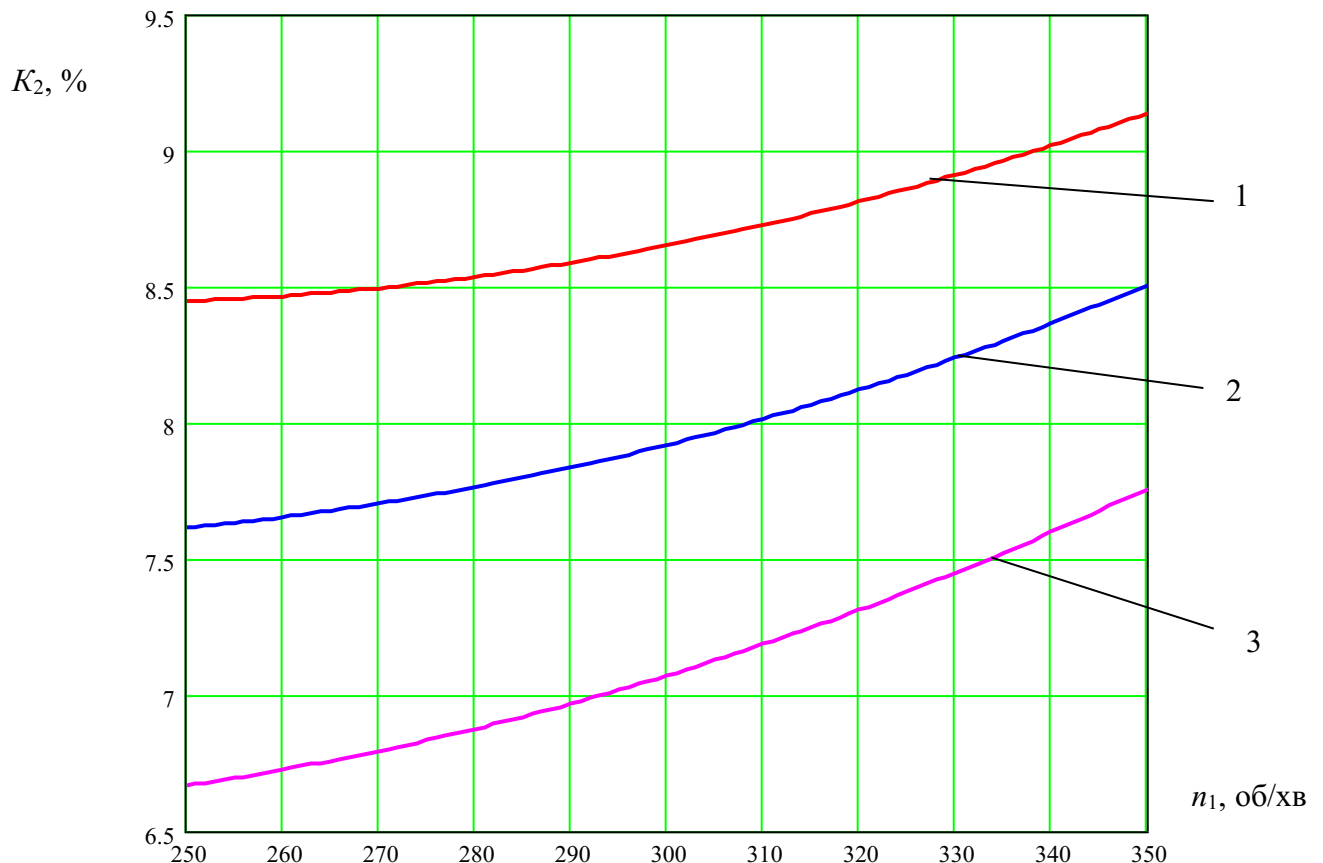


Рис. 4.5. Графічні залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 при $\alpha=15$ град:
1) $n_2=100$ об/хв.; 2) $n_2=150$ об/хв.; 3) $n_2=200$ об/хв.

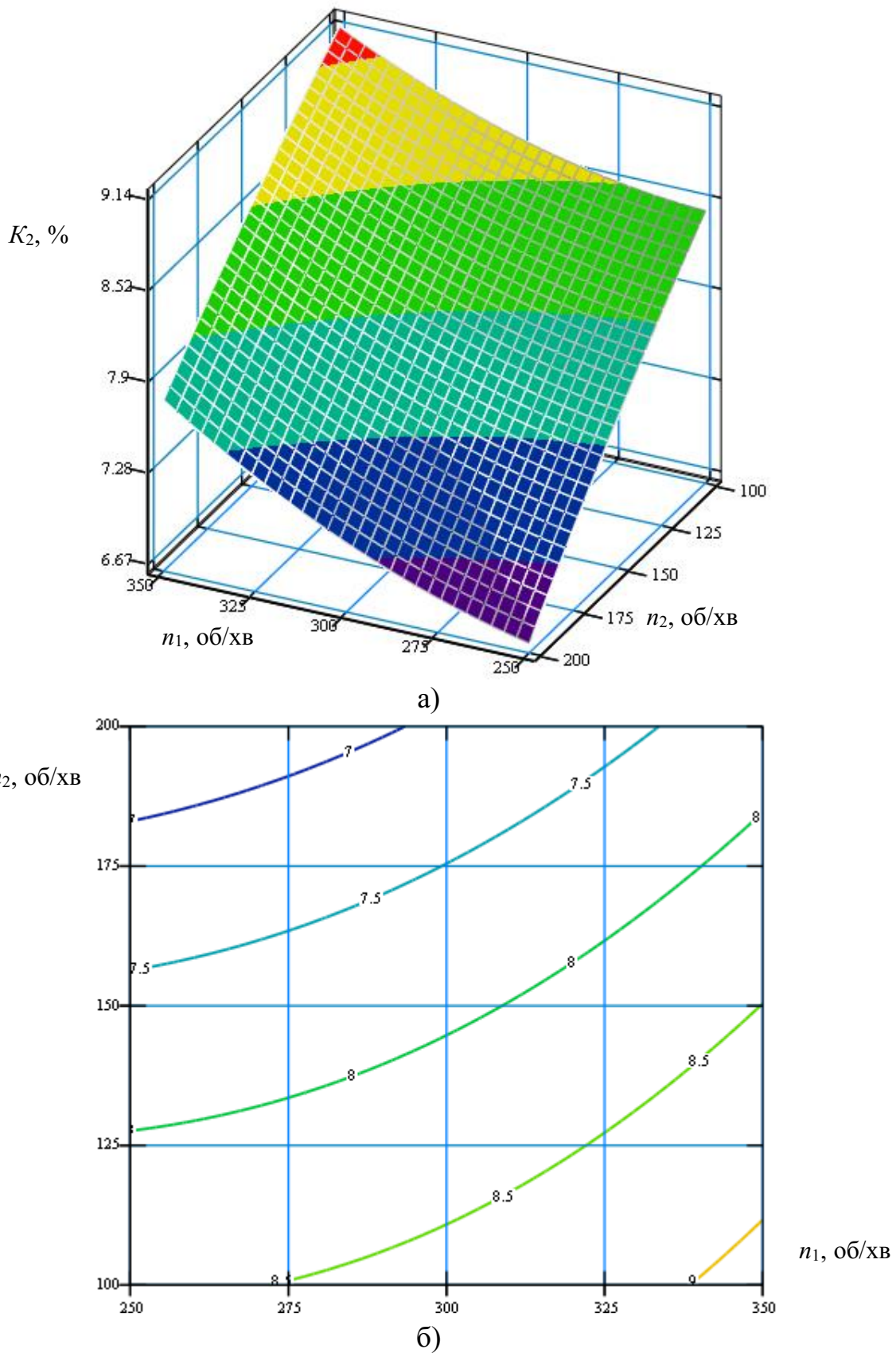


Рис. 4.6. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)

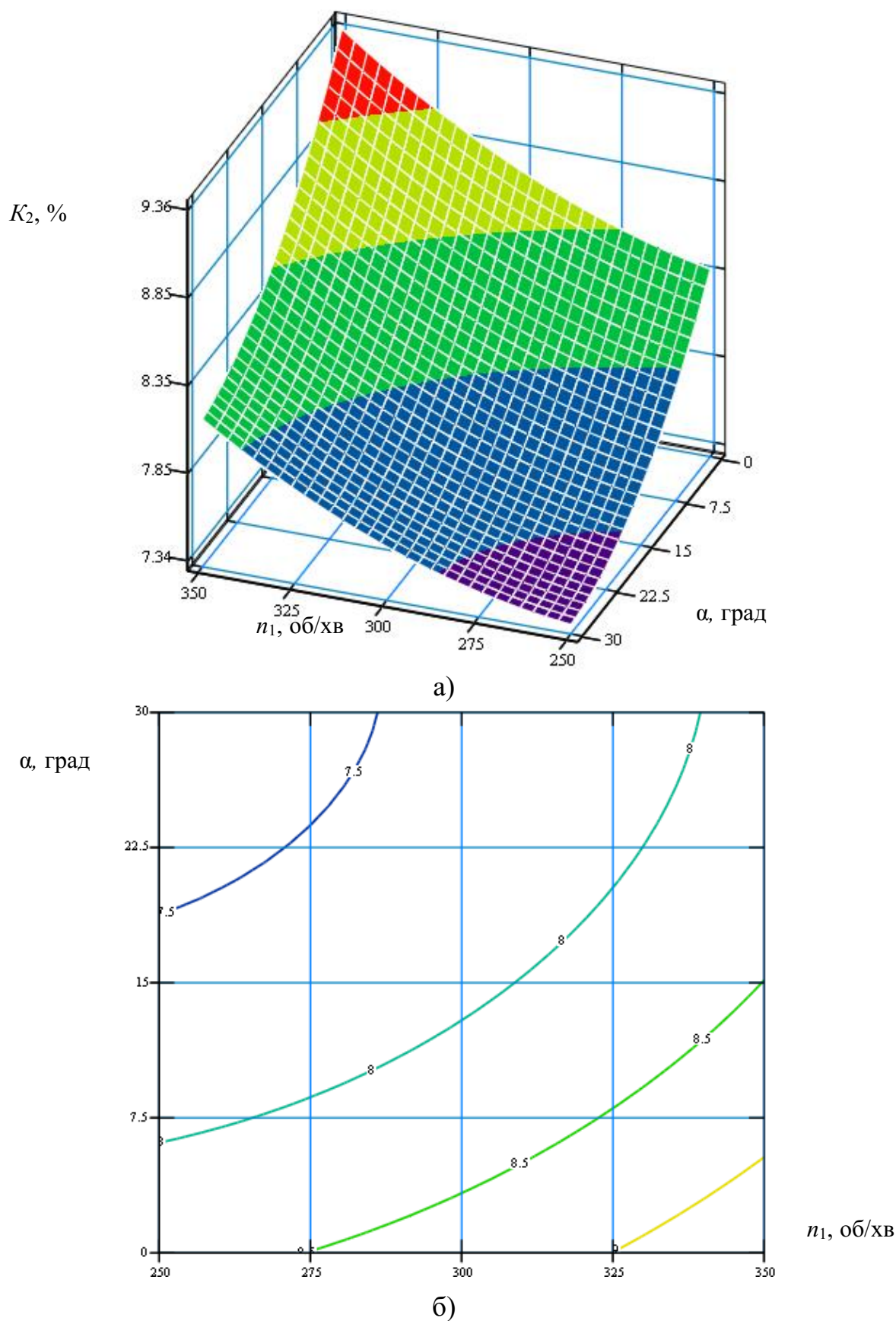


Рис. 4.7. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута його нахилу α ($n_2 = 150$ об/хв.)

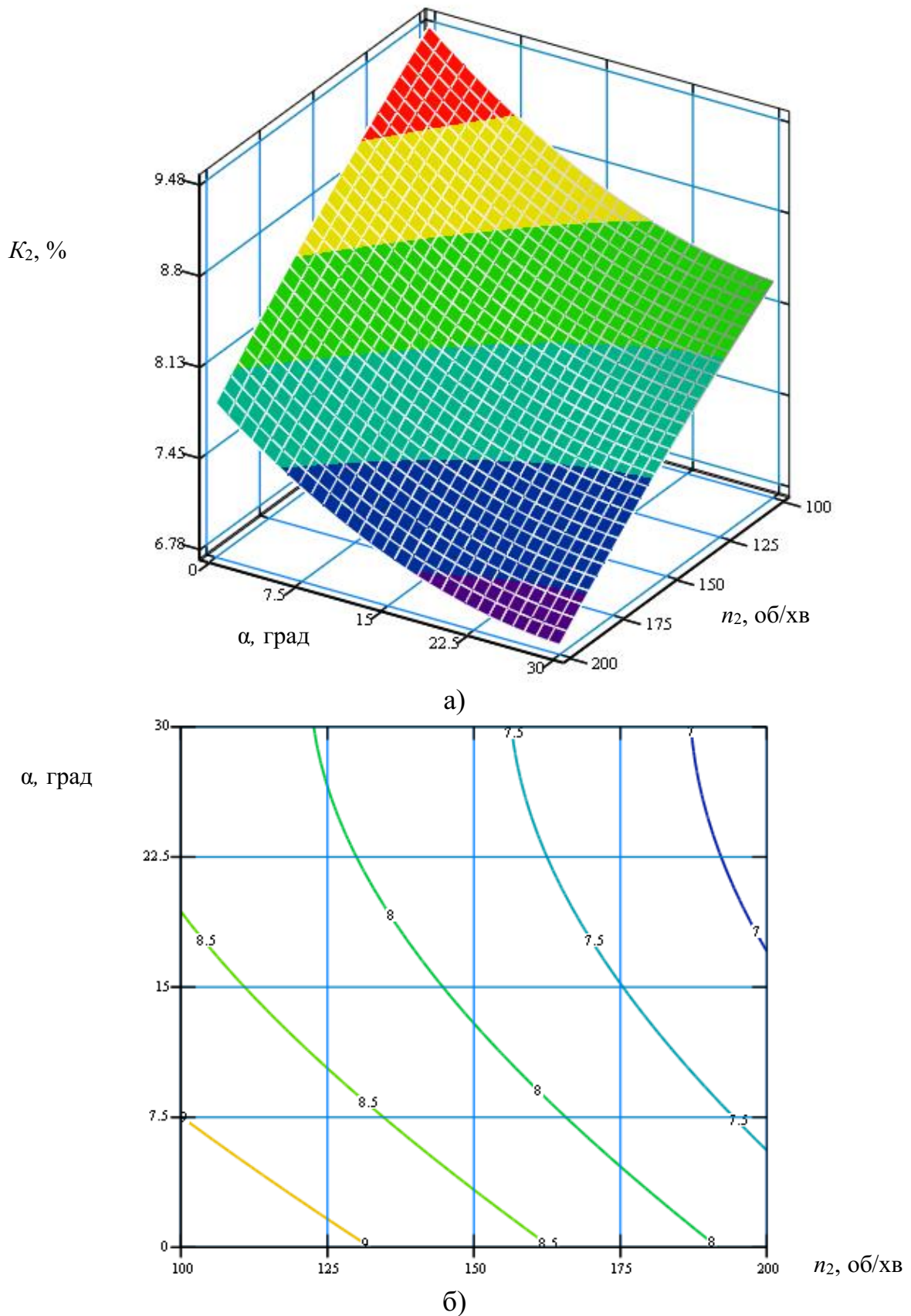


Рис. 4.8. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута його нахилу α ($n_1=300$ об/хв.)

З рисунків 4.5 - 4.8 та рівняння регресії (4.4) зроблено висновки, що при зменшенні частоти обертання шнека та збільшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом зменшується. Максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 10,8 %, а мінімальне – 6,8 %.

Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,15 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,20 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,14 рази.

Загальний вигляд рівняння регресії коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху від зміни трьох основних факторів: частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, тобто $K_3 = f(n_1, n_2, \alpha)$ за результатами проведених експериментів у кодованих величинах дорівнює:

$$K_{3(x_1, x_2, x_3)} = 7,652 + 0,348x_1 - 0,66x_2 - 0,507x_3 + 0,09x_1x_2 - 0,043x_1x_3 + 0,015x_2x_3 + 0,118x_1^2 - 0,042x_2^2 + 0,203x_3^2. \quad (4.5)$$

Таблиця 4.3

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху

Коефіц.	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Пшениця, горох	7,652	0,348	-0,66	-0,507	0,09	-0,043	0,015	0,118	-0,042	0,203

Усі коефіцієнти рівняння регресій (4.5) є значущими відповідно до формул (3.18) та (3.20).

Запишемо рівняння регресії (4.5) у натуральних величинах:

$$K_{3(n_1, n_2, \alpha)} = 13,53 - 0,0259n_1 - 0,0193n_2 - 0,0467\alpha + 3,6 \cdot 10^{-5} n_1 n_2 - 5,73 \cdot 10^{-5} n_1 \alpha + 2 \cdot 10^{-5} n_2 \alpha + 4,72 \cdot 10^{-5} n_1^2 - 1,68 \cdot 10^{-5} n_2^2 + 9,02 \cdot 10^{-4} \alpha^2. \quad (4.6)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (4.6), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 4.9 – рис. 4.12.

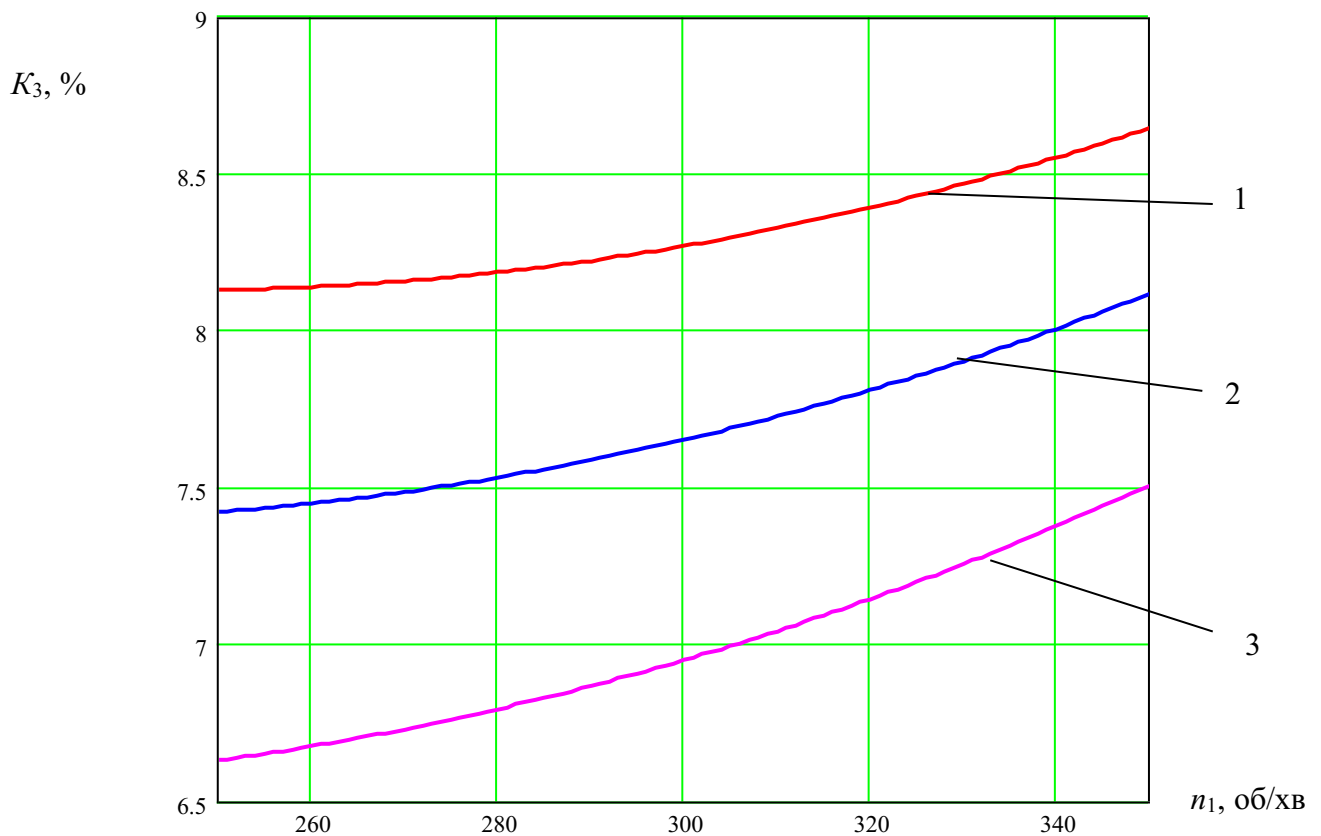


Рис. 4.9. Графічні залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 при $\alpha=15$ град.:
1) $n_2=100$ об/хв.; 2) $n_2=150$ об/хв.; 3) $n_2=200$ об/хв.

При аналізі (4.5) встановлено, що основним фактором, який впливає на коефіцієнт неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом є фактор $x_2(n_2)$.

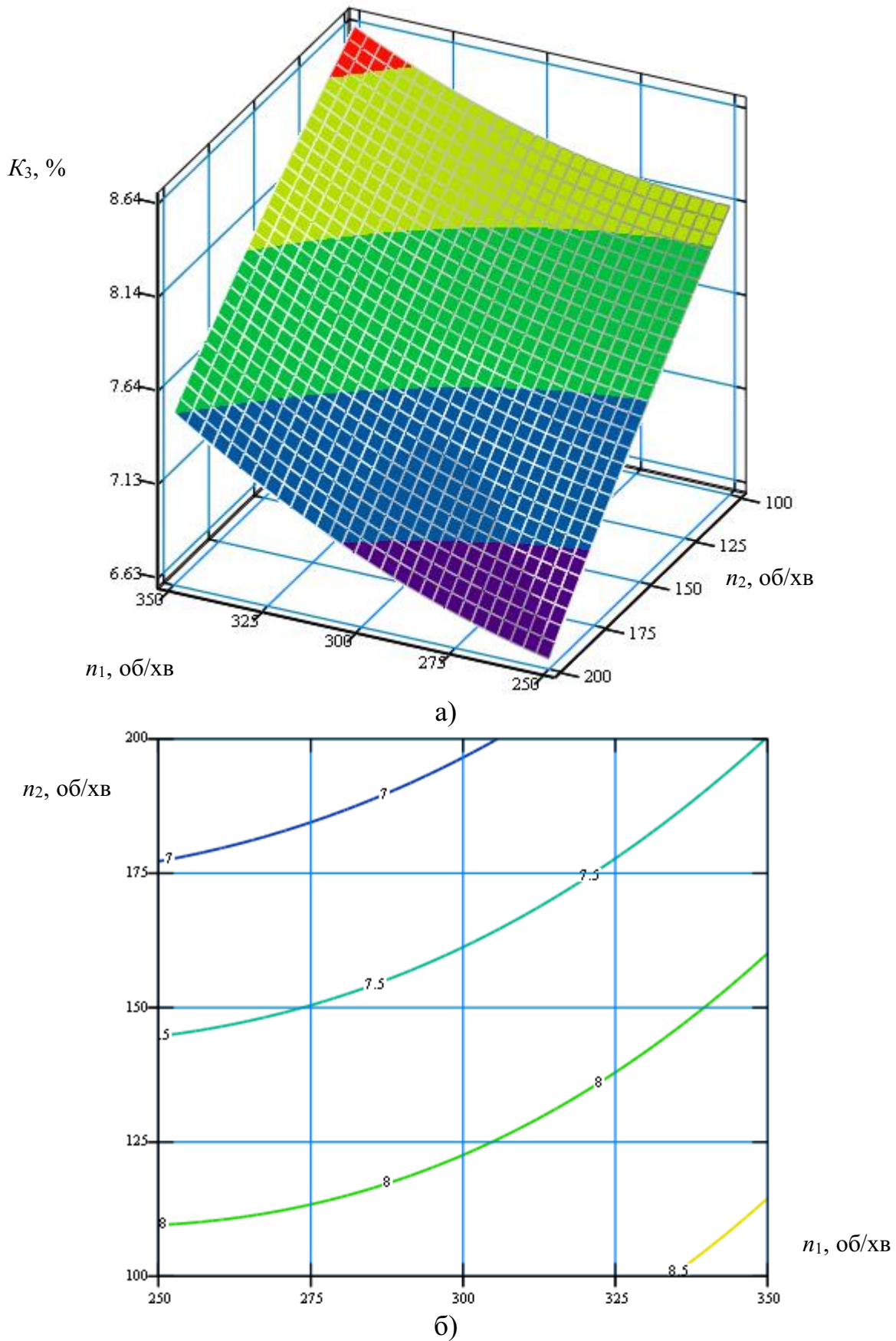


Рис. 4.10. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)

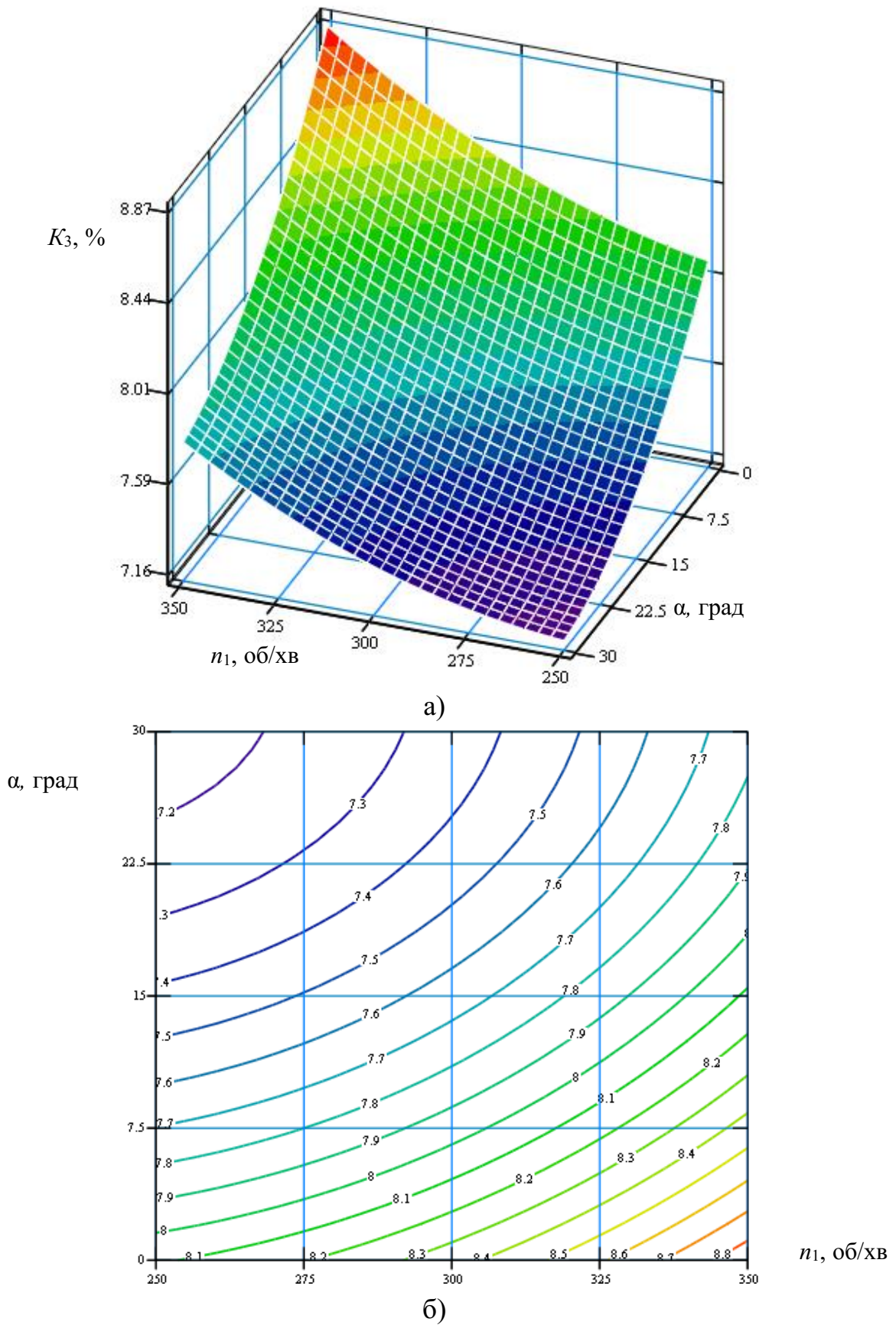


Рис. 4.11. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута його нахилу α ($n_2 = 150$ об/хв.)

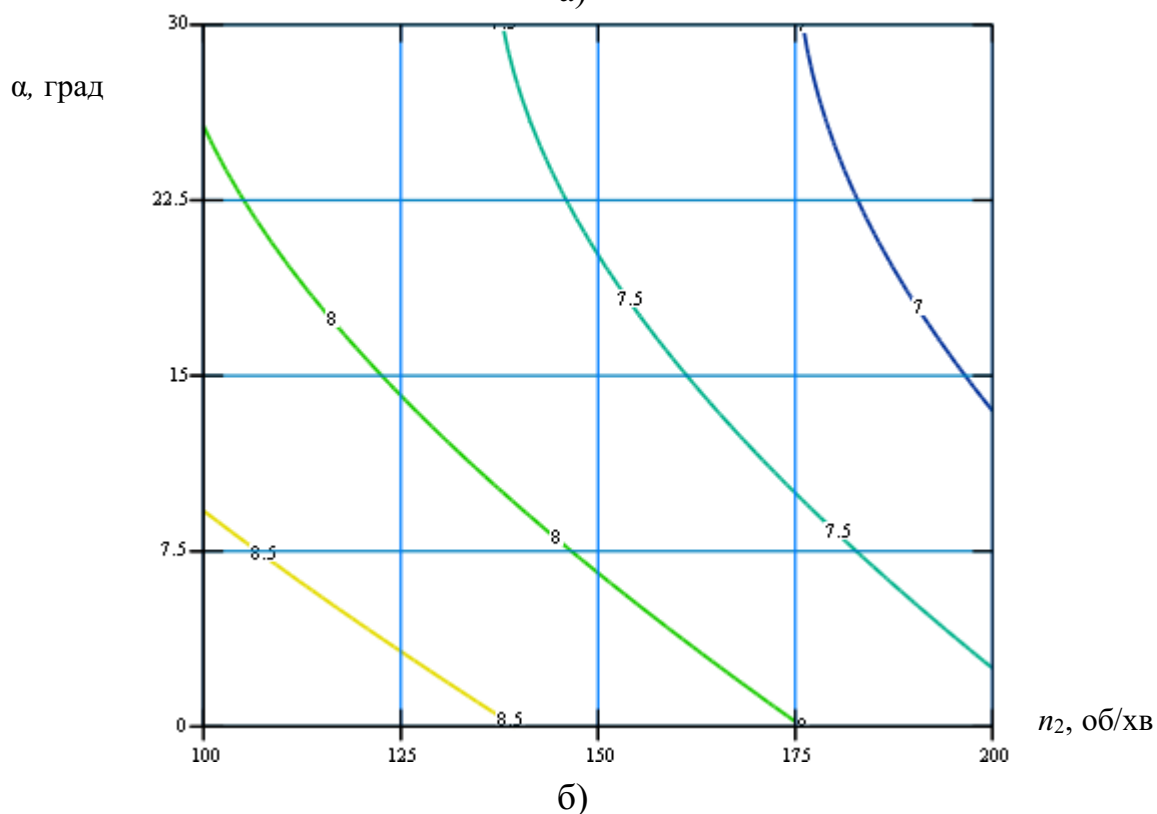
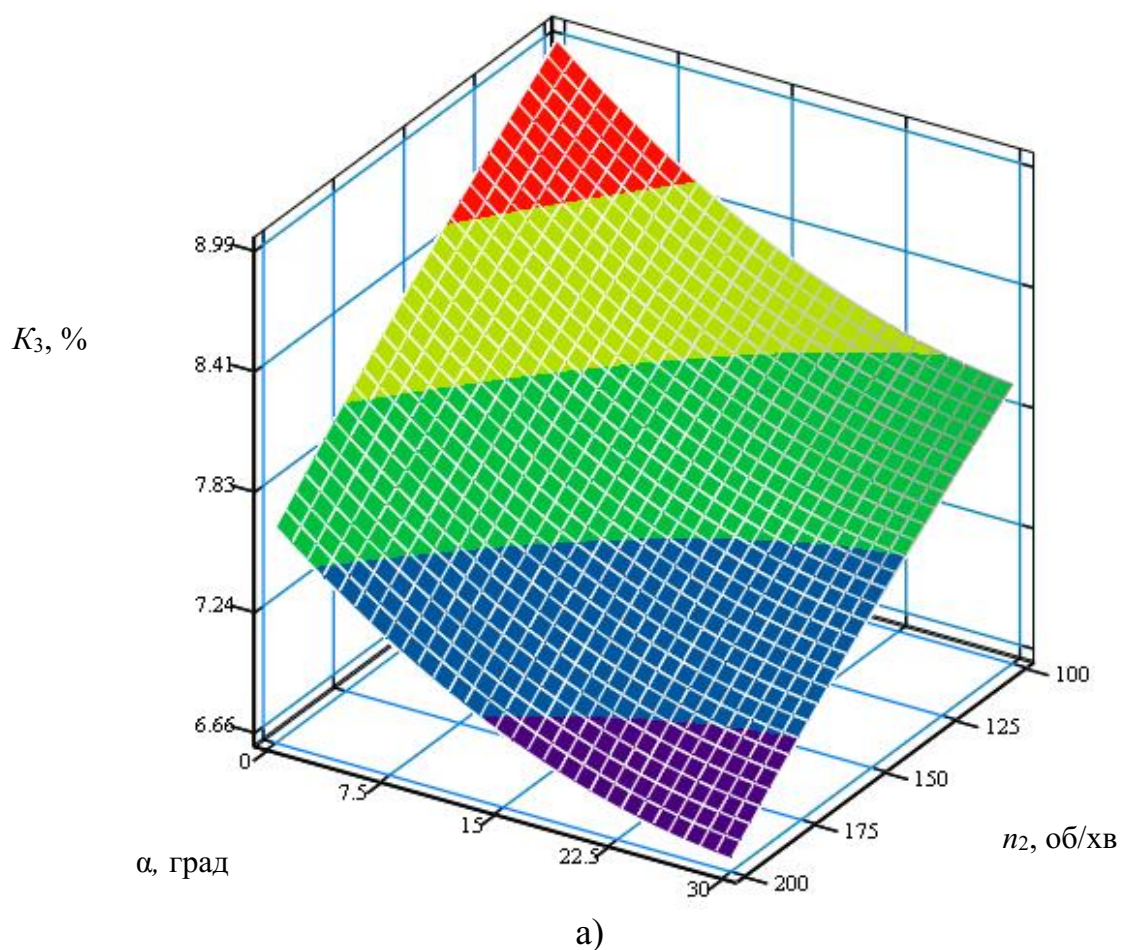


Рис. 4.12. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності коефіцієнта неоднорідності змішування двокомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обортовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута його нахилу α ($n_1=300$ об/хв.)

Менший вплив має фактор $x_3(\alpha)$ і найменший - фактор $x_1(n_1)$. Зростання другого і третього факторів призводить до зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування, а зростання першого – до збільшення коефіцієнта неоднорідності змішування.

З рис. 4.9 - 4.12 та рівняння (4.6) зроблено висновки, що при зменшенні частоти обертання шнека та збільшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина коефіцієнта неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом зменшується. Максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 9,41 %, а мінімальне – 6,4 %.

Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,07 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,21 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,11 рази.

Виведені рівняння регресії (4.1 - 4.6) можуть бути використані для прогнозування коефіцієнтів неоднорідності змішування: трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки та двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом залежно від зміни частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача у таких межах зміни факторів: $250 \leq n_1 \leq 350$ (об/хв.); $100 \leq n_2 \leq 200$ (об/хв.); $0 \leq \alpha \leq 30$ (град.).

Коефіцієнт неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші шнековим змішувачем з обертовим кожухом є в 1,64 рази меншим ніж коефіцієнт неоднорідності змішування звичайним гвинтовим конвеєром із спіральним гвинтовим робочим органом [158] в межах досліджуваних частот обертання шнеків від 250 об/хв до 350 об/хв.

4.2. Результати експериментальних досліджень потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів шнековим змішувачем з регульованою подачею

Відповідно до методики, описаної у підрозділі 3.3 кваліфікаційної роботи, проведено експериментальні дослідження для визначення закономірності взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача, зокрема частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, із потужністю приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки. Потужність на приводі обертання шнека вимірювали за допомогою пристроїв і програмного забезпечення, описаних у розділі 3.

Проведено на основі статистичної обробки результатів експериментів розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії (3.10), використовуючи рівняння (3.11) – (3.14). Числові значення вказаних коефіцієнтів представлено у табл. 4.4.

Загальний вигляд рівняння регресії потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів від зміни трьох основних факторів: частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, тобто $N_{1i}=f(n_1, n_2, \alpha)$ за результатами проведених експериментів у кодованих величинах дорівнює:

- при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса:

$$N_{11(x_1, x_2, x_3)} = 0,115 + 0,017x_1 + 0,014x_2 + 0,012x_3 + 0,0011x_1x_2 + 0,0018x_1x_3 + 0,0016x_2x_3 + 0,00046x_1^2 + 0,0045x_2^2 - 0,0036x_3^2; \quad (4.7)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки:

$$N_{12(x_1, x_2, x_3)} = 0,128 + 0,019x_1 + 0,015x_2 + 0,014x_3 + 0,00125x_1x_2 + 0,002x_1x_3 + 0,00175x_2x_3 + 0,00052x_1^2 + 0,0005x_2^2 - 0,00398x_3^2; \quad (4.8)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху:

$$N_{13(x_1, x_2, x_3)} = 0,133 + 0,019x_1 + 0,016x_2 + 0,014x_3 + 0,0013x_1x_2 + 0,0021x_1x_3 + 0,0018x_2x_3 + 0,00054x_1^2 + 0,0052x_2^2 - 0,0041x_3^2. \quad (4.9)$$

Таблиця 4.4

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні потужності приводу обертання шнека під час транспортування та змішування комбінації компонентів

Коефіц.	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Кукурудза, гречка, просо	0,115	0,017	0,014	0,012	0,0011	0,0018	0,0016	0,00046	0,0045	-0,0036
Кукурудза, гречка	0,128	0,019	0,015	0,014	0,00125	0,002	0,00175	0,00052	0,005	-0,00398
Пшениця, горох	0,133	0,019	0,016	0,014	0,0013	0,0021	0,0018	0,00054	0,0052	-0,0041

Усі коефіцієнти рівнянь регресій (4.7 – 4.9) є значущими відповідно до формул (3.18) та (3.20).

Запишемо рівняння регресії (4.7 – 4.9) у натуральних величинах:

- при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса:

$$N_{11(n_1, n_2, \alpha)} = 0,0313 + 2,38 \cdot 10^{-4} n_1 - 4,24 \cdot 10^{-4} n_2 + 2,4 \cdot 10^{-4} \alpha + 4,4 \cdot 10^{-7} n_1 n_2 + 2,4 \cdot 10^{-6} n_1 \alpha + 2,133 \cdot 10^{-6} n_2 \alpha + 1,8 \cdot 10^{-6} n_2^2 - 1,6 \cdot 10^{-5} \alpha^2; \quad (4.10)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки:

$$N_{12(n_1, n_2, \alpha)} = 0,0358 + 2,65 \cdot 10^{-4} n_1 - 4,85 \cdot 10^{-4} n_2 + 3,14 \cdot 10^{-4} \alpha + 5 \cdot 10^{-7} n_1 n_2 + 2,67 \cdot 10^{-6} n_1 \alpha + 2,33 \cdot 10^{-6} n_2 \alpha + 2 \cdot 10^{-6} n_2^2 - 1,77 \cdot 10^{-5} \alpha^2; \quad (4.11)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху:

$$N_{13(n_1, n_2, \alpha)} = 0,0411 + 2,6 \cdot 10^{-4} n_1 - 4,96 \cdot 10^{-4} n_2 + 2,8 \cdot 10^{-4} \alpha + 5,2 \cdot 10^{-7} n_1 n_2 + 2,8 \cdot 10^{-6} n_1 \alpha + 2,4 \cdot 10^{-6} n_2 \alpha + 2,08 \cdot 10^{-6} n_2^2 - 1,82 \cdot 10^{-5} \alpha^2. \quad (4.12)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (4.10 – 4.12), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 4.13 – рис. 4.15 та у додатку Б.

Аналізуючи рівняння регресії (4.10 – 4.12), встановлено, що основним фактором, який впливає на потужність приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів є фактор $x_1(n_1)$. Менший вплив має фактор $x_2(n_2)$ і найменший - фактор $x_3(\alpha)$. Зростання усіх факторів призводить до збільшення потужності приводу обертання шнека.

З рисунків 4.13 - 4.15, додатку Б та рівнянь регресії (4.10 – 4.12) зроблено висновки, що при збільшенні частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів збільшується. Максимальне значення потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 0,164 кВт, а мінімальне – 0,078 кВт. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення потужності приводу обертання шнека становило 0,182 кВт, а мінімальне – 0,087 кВт.

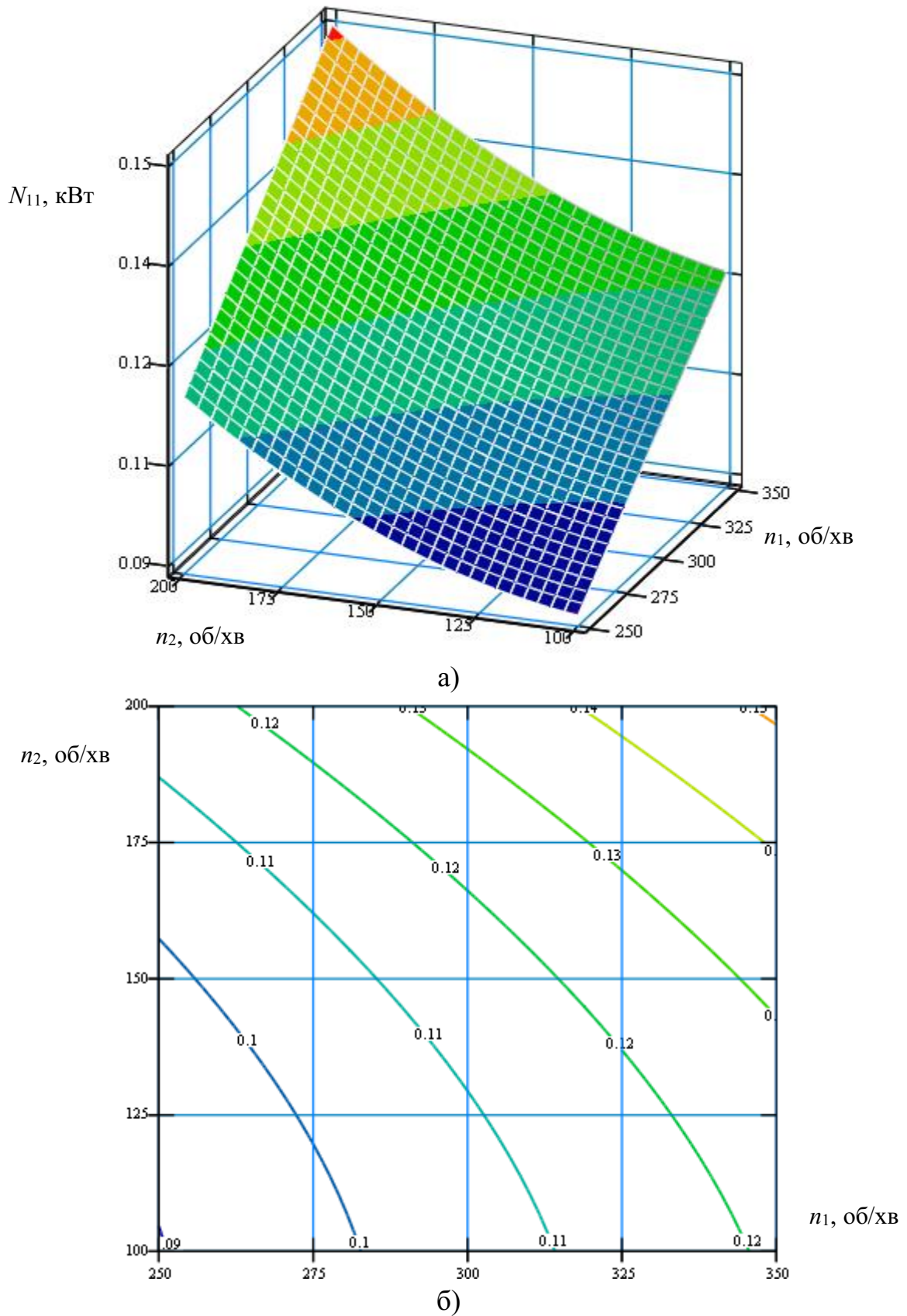
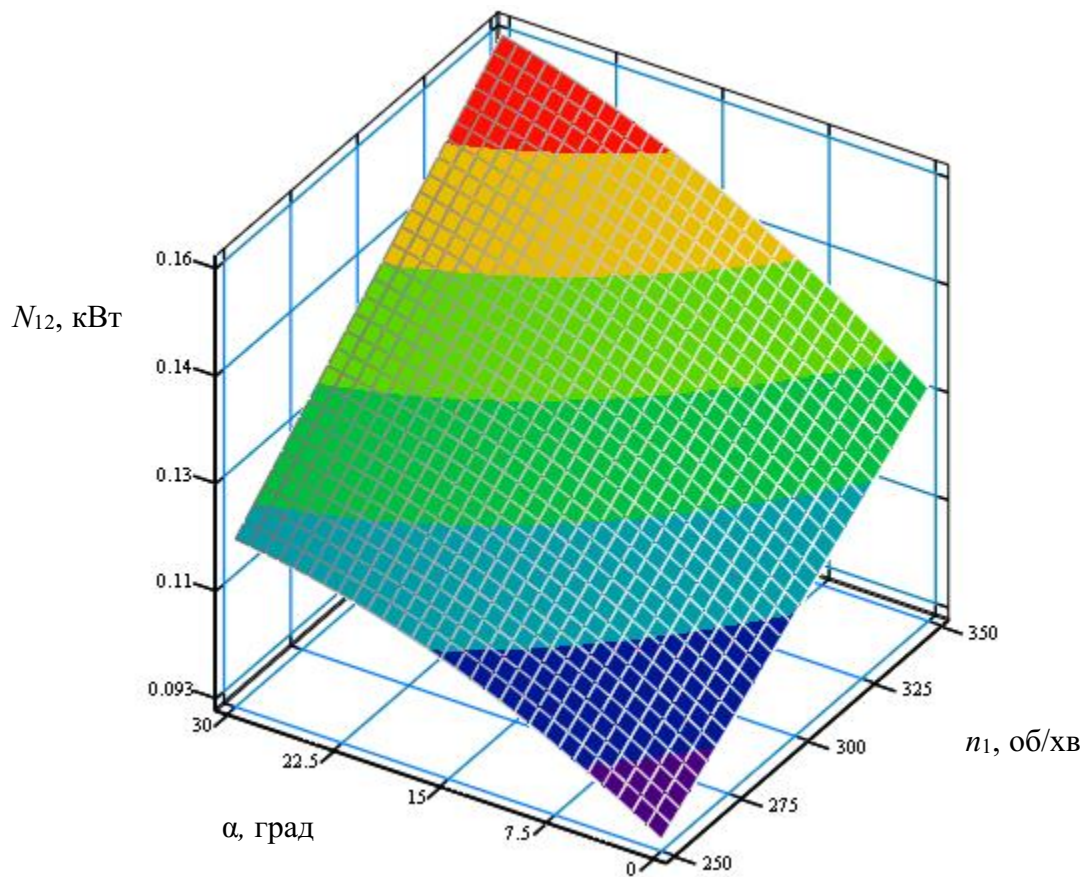
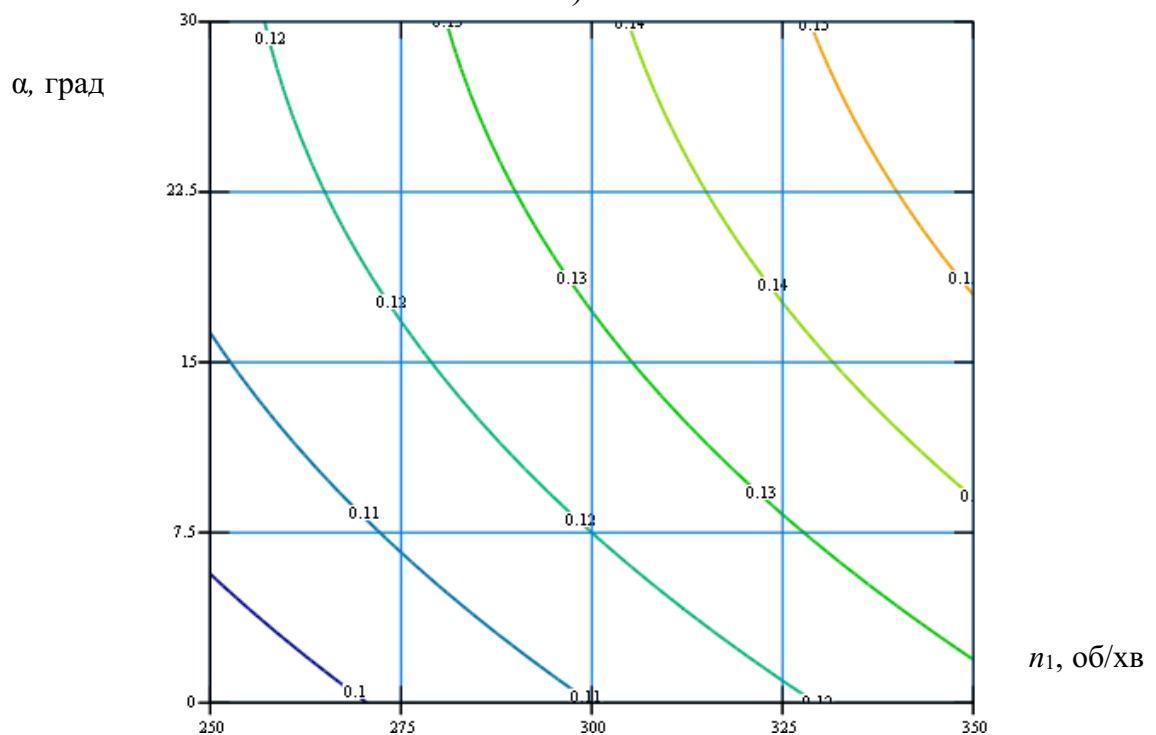


Рис. 4.13. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності привода обертання шнека при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)



а)



б)

Рис. 4.14. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертювм кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_2 = 150$ об/хв.)

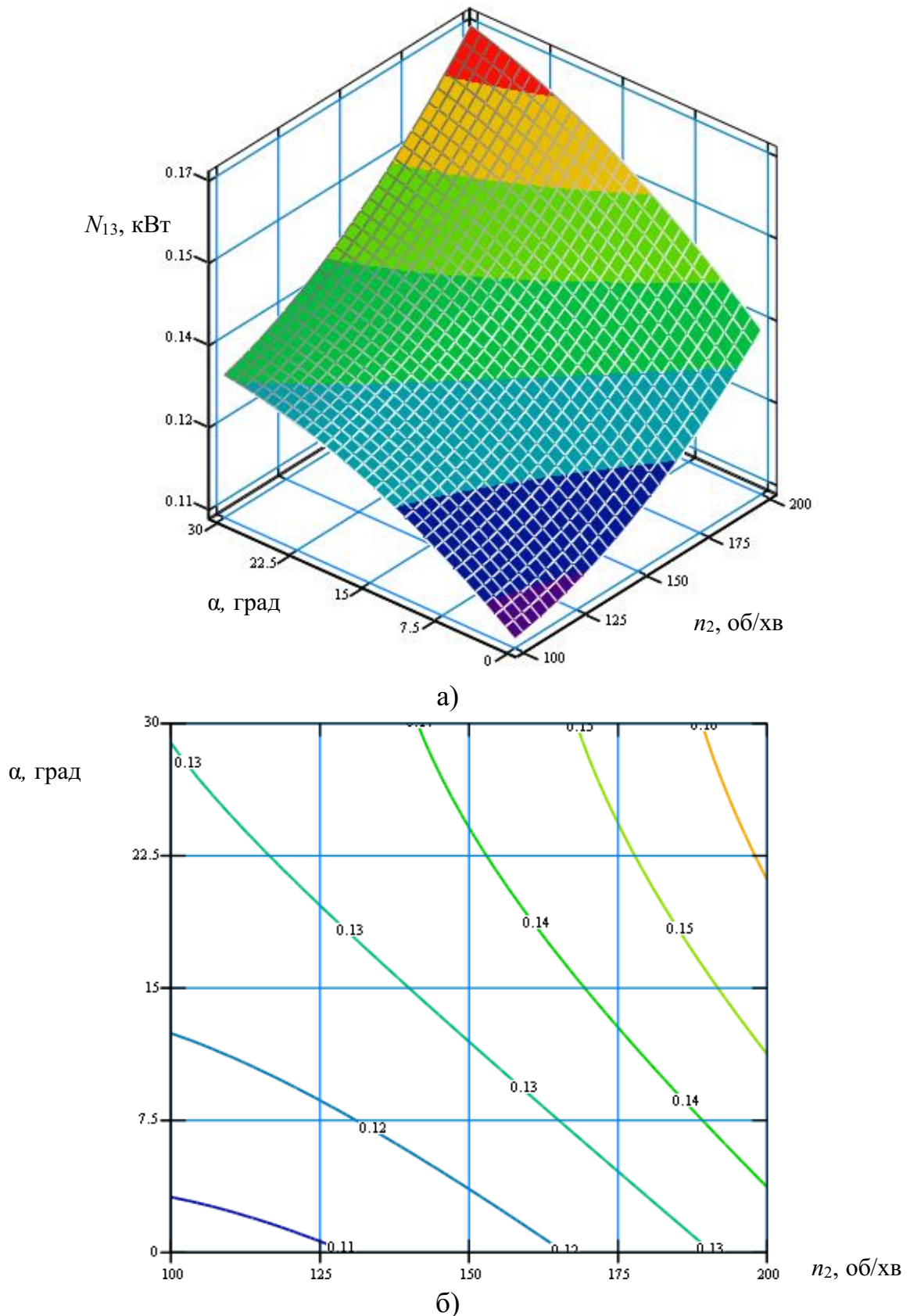


Рис. 4.15. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)

При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення потужності приводу обертання шнека становило 0,189 кВт, а мінімальне – 0,09 кВт.

Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання потужності приводу обертання шнека в 1,4 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв до 200 об/хв призводить до збільшення потужності приводу обертання шнека в 1,28 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє збільшенню потужності приводу обертання шнека в 1,23 рази.

Різниця між результатами експериментальних та теоретичних досліджень становить до 15%.

4.3. Результати експериментальних досліджень потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів шнековим змішувачем з регульованою подачею

Відповідно до методики, описаної у підрозділі 3.3 кваліфікаційної роботи, проведено експериментальні дослідження для визначення закономірності взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача, зокрема частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, із потужністю приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки.

Потужність на приводі обертання кожуха вимірювали за допомогою пристроїв і програмного забезпечення, описаних у розділі 3.

Проведено на основі статистичної обробки результатів експериментів розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії (3.10), використовуючи рівняння (3.11) – (3.14). Числові значення вказаних коефіцієнтів представлено у таблиці 4.5.

Загальний вигляд рівняння регресії потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів від зміни трьох основних факторів: частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, тобто $N_{2i}=f(n_1, n_2, \alpha)$ за результатами проведених експериментів у кодованих величинах дорівнює:

- при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса:

$$N_{21(x_1, x_2, x_3)} = 0,029 + 0,00147x_1 + 0,011x_2 + 0,00183x_3 + 3,75 \cdot 10^{-5}x_1x_2 + 3,75 \cdot 10^{-5}x_1x_3 + 2,12 \cdot 10^{-4}x_2x_3 - 4,15 \cdot 10^{-4}x_1^2 + 0,0021x_2^2 + 8,52 \cdot 10^{-5}x_3^2; \quad (4.13)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки:

$$N_{22(x_1, x_2, x_3)} = 0,032 + 0,00163x_1 + 0,012x_2 + 0,00203x_3 + 4,17 \cdot 10^{-5}x_1x_2 + 4,17 \cdot 10^{-5}x_1x_3 + 2,36 \cdot 10^{-4}x_2x_3 - 4,61 \cdot 10^{-4}x_1^2 + 0,0023x_2^2 + 9,46 \cdot 10^{-5}x_3^2; \quad (4.14)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху:

$$N_{23(x_1, x_2, x_3)} = 0,033 + 0,0017x_1 + 0,013x_2 + 0,0021x_3 + 4,33 \cdot 10^{-5}x_1x_2 + 4,33 \cdot 10^{-5}x_1x_3 + 2,46 \cdot 10^{-4}x_2x_3 - 4,79 \cdot 10^{-4}x_1^2 + 0,0024x_2^2 + 9,84 \cdot 10^{-5}x_3^2. \quad (4.15)$$

Таблиця 4.5

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні потужності приводу обертання кожуха під час транспортування та змішування комбінації компонентів

Коефіц.	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Кукурудза, гречка, просо	0,029	0,00147	0,011	0,00183	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$2,125 \cdot 10^{-4}$	$-4,15 \cdot 10^{-4}$	0,0021	$8,52 \cdot 10^{-5}$
Кукурудза, гречка	0,032	0,00163	0,012	0,00203	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-4}$	$-4,61 \cdot 10^{-4}$	0,0023	$9,46 \cdot 10^{-5}$
Пшениця, горох	0,033	0,0017	0,013	0,0021	$4,33 \cdot 10^{-5}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$	$2,46 \cdot 10^{-4}$	$-4,79 \cdot 10^{-4}$	0,0024	$9,84 \cdot 10^{-5}$

Коефіцієнти b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{11} , b_{33} рівнянь регресій (4.13 – 4.15) є незначущими відповідно до формул (3.18) та (3.20).

Із врахуванням вищевказаного загальний вигляд рівнянь регресій (4.13 – 4.15) потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів запишемо таким чином:

- при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса:

$$N_{21(x_1, x_2, x_3)} = 0,029 + 0,00147x_1 + 0,011x_2 + 0,00183x_3 + 0,0021x_2^2; \quad (4.16)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки:

$$N_{22(x_1, x_2, x_3)} = 0,032 + 0,00163x_1 + 0,012x_2 + 0,00203x_3 + 0,0023x_2^2; \quad (4.17)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху:

$$N_{2(x_1, x_2, x_3)} = 0,033 + 0,0017x_1 + 0,013x_2 + 0,0021x_3 + 0,0024x_2^2. \quad (4.18)$$

Запишемо рівняння регресії (4.16 – 4.18) у натуральних величинах:

- при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса:

$$N_{21(n_1, n_2, \alpha)} = 0,00425 + 2,94 \cdot 10^{-5} n_1 - 3,2 \cdot 10^{-5} n_2 + 1,22 \cdot 10^{-4} \alpha + 8,4 \cdot 10^{-7} n_2^2; \quad (4.19)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки:

$$N_{22(n_1, n_2, \alpha)} = 0,00489 + 3,26 \cdot 10^{-5} n_1 - 3,6 \cdot 10^{-5} n_2 + 1,35 \cdot 10^{-4} \alpha + 9,2 \cdot 10^{-7} n_2^2; \quad (4.20)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху:

$$N_{23(n_1, n_2, \alpha)} = 0,0033 + 3,4 \cdot 10^{-5} n_1 - 2,8 \cdot 10^{-5} n_2 + 1,4 \cdot 10^{-4} \alpha + 9,6 \cdot 10^{-7} n_2^2. \quad (4.21)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (4.19 – 4.21), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів шнековим конвеєром з обертовим кожухом, що представлено на рис. 4.16 – рис. 4.18 та у додатку В.

Аналізуючи рівняння регресії (4.19 – 4.21), встановлено, що основним фактором, який впливає на потужність приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів є фактор $x_2(n_2)$. Менший вплив має фактор $x_3(\alpha)$ і найменший – фактор $x_1(n_1)$. Зростання усіх факторів призводить до збільшення потужності приводу обертання кожуха.

З рисунків 4.16 - 4.18, додатку В та рівнянь регресії (4.19 – 4.21) зроблено висновки, що при збільшенні частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів збільшується. Максимальне значення потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 0,045 кВт, а мінімальне – 0,017 кВт. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення потужності приводу обертання кожуха становило 0,05 кВт, а мінімальне – 0,019 кВт. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення потужності приводу обертання кожуха становило 0,052 кВт, а мінімальне – 0,02 кВт.

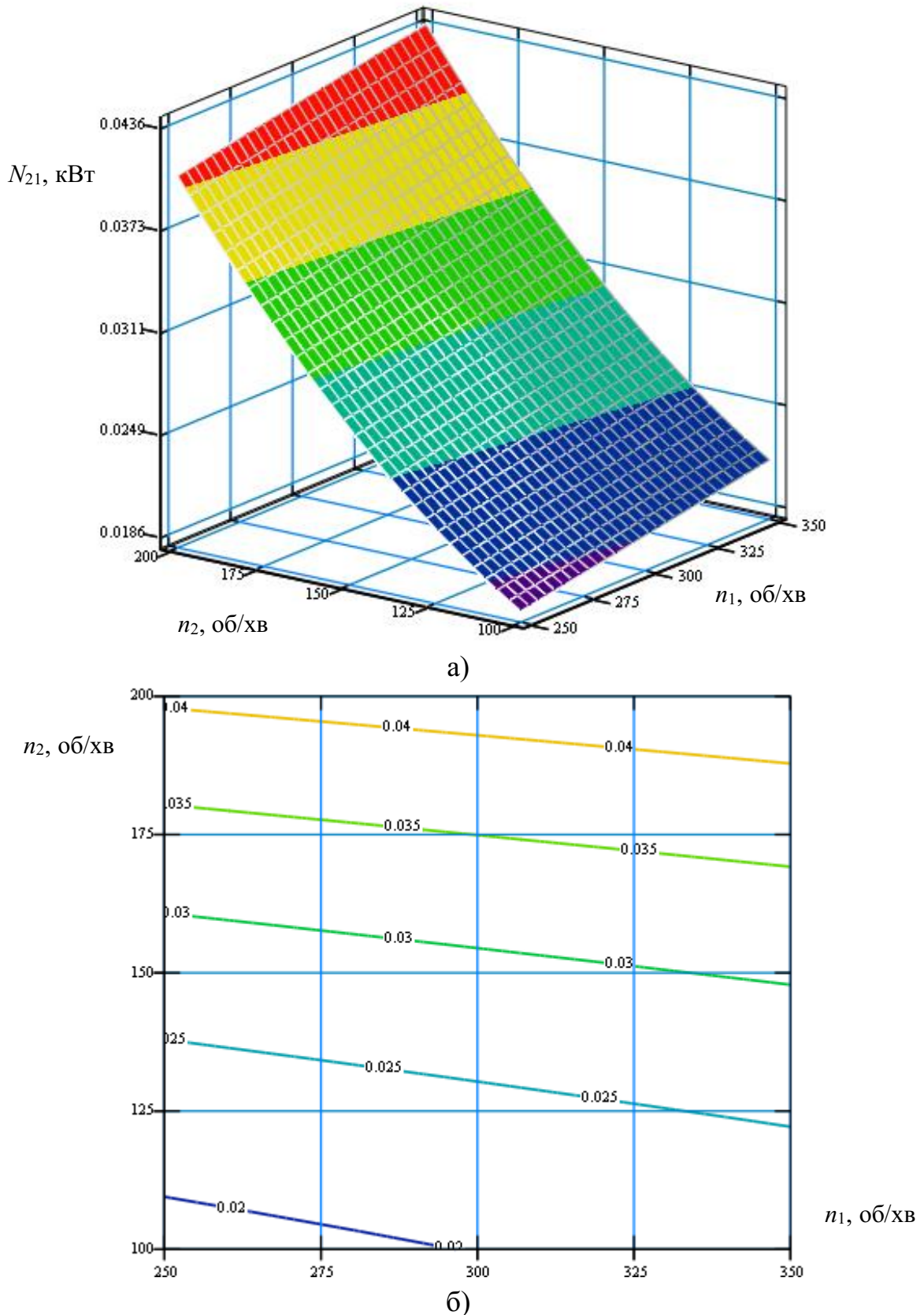


Рис. 4.16. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертним кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)

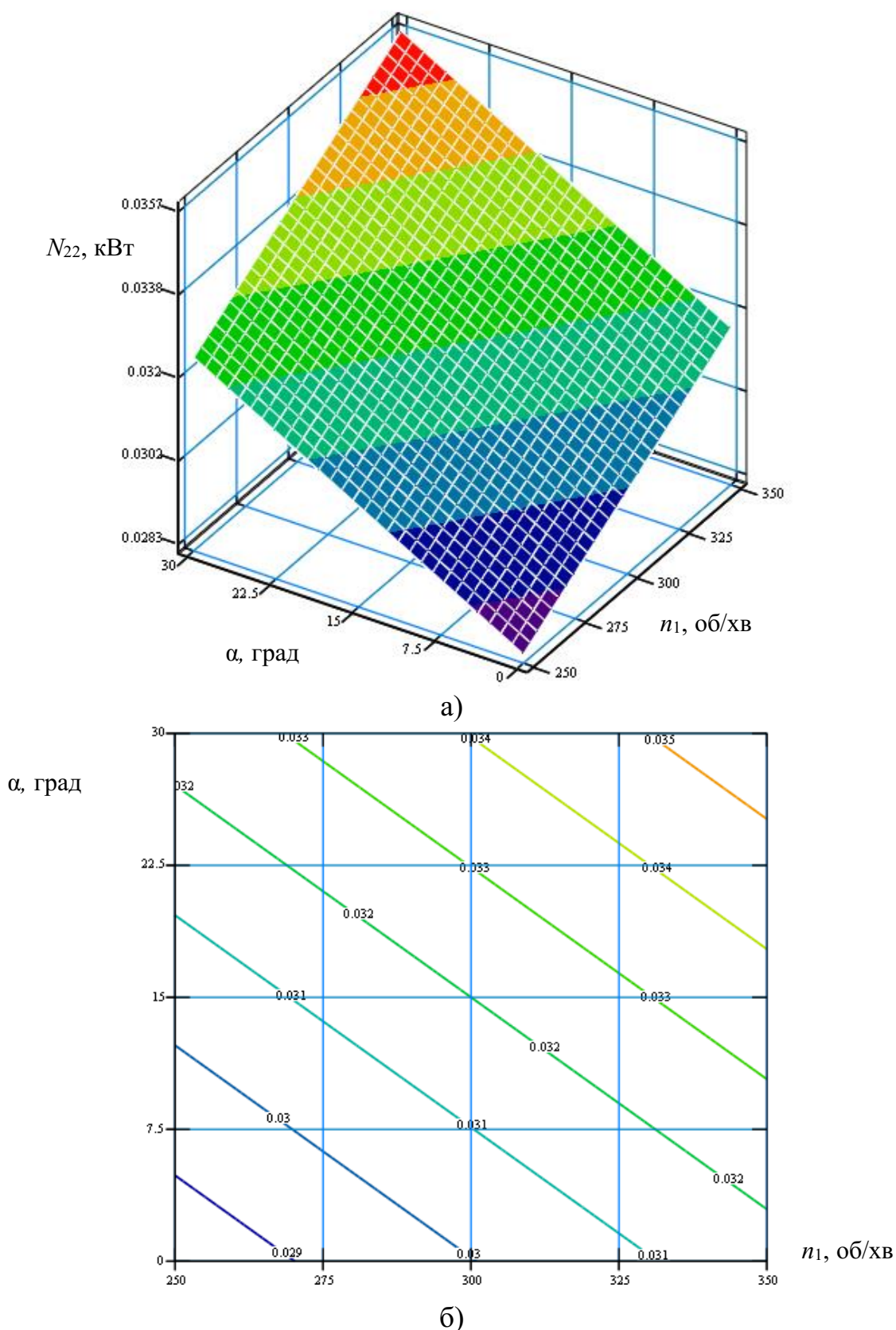
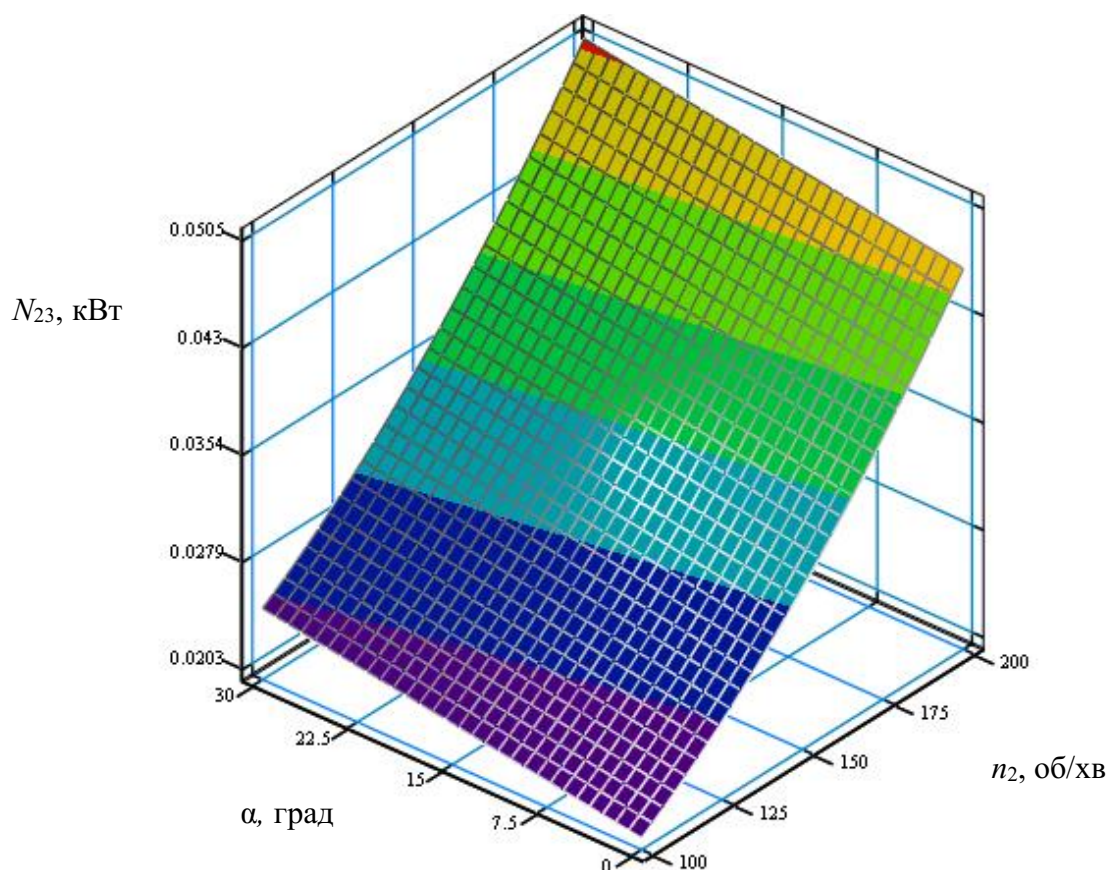
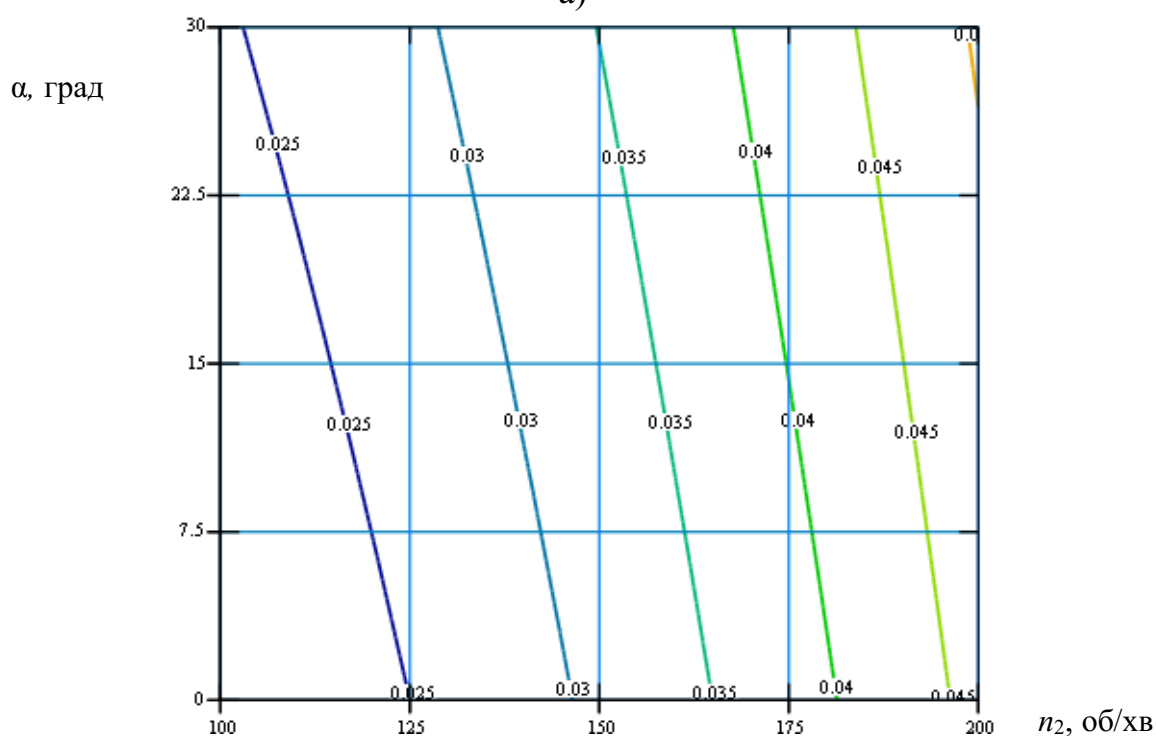


Рис. 4.17. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертвовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_2 = 150$ об/хв.)



а)



б)

Рис. 4.18. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)

Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання потужності приводу обертання кожуха в 1,16 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. призводить до збільшення потужності приводу обертання кожуха в 2 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. сприяє збільшенню потужності приводу обертання кожуха в 1,18 рази.

Різниця між результатами експериментальних та теоретичних досліджень становить до 15%.

4.4. Результати експериментальних досліджень продуктивності транспортування та змішування зернових матеріалів шнековим змішувачем з регульованою подачею

Відповідно до методики, описаної у підрозділі 3.3 кваліфікаційної роботи, проведено експериментальні дослідження для визначення закономірності взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача, зокрема частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, із продуктивністю транспортування та змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки.

Продуктивність транспортування та змішування сипкого матеріалу визначали методом зважування матеріалу, що піддавався транспортуванню і змішуванню за визначений проміжок часу.

Проведено на основі статистичної обробки результатів експериментів розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії (3.10), використовуючи рівняння (3.11) – (3.14). Числові значення вказаних коефіцієнтів представлено у таблиці 4.6.

Загальний вигляд рівняння регресії продуктивності транспортування та змішування зернових матеріалів від зміни трьох основних факторів: частоти

обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, тобто $Q_i=f(n_1, n_2, \alpha)$ за результатами проведених експериментів у кодованих величинах дорівнює:

- при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса:

$$Q_{1(x_1, x_2, x_3)} = 2,211 + 0,722x_1 - 0,683x_2 - 0,244x_3 + 0,0079x_1x_2 + 0,015x_1x_3 + 0,057x_2x_3 - 0,016x_1^2 - 0,011x_2^2 - 0,047x_3^2; \quad (4.22)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки:

$$Q_{2(x_1, x_2, x_3)} = 2,457 + 0,802x_1 - 0,756x_2 - 0,271x_3 + 0,0088x_1x_2 + 0,016x_1x_3 + 0,064x_2x_3 - 0,018x_1^2 - 0,014x_2^2 - 0,053x_3^2; \quad (4.23)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху:

$$Q_{3(x_1, x_2, x_3)} = 2,555 + 0,834x_1 - 0,789x_2 - 0,282x_3 + 0,0091x_1x_2 + 0,017x_1x_3 + 0,066x_2x_3 - 0,018x_1^2 - 0,014x_2^2 - 0,055x_3^2. \quad (4.24)$$

Таблиця 4.6

Коефіцієнти рівнянь регресії при дослідженні продуктивності змішування компонентів

Коефіц.	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Кукурудза, гречка, просо	2,211	0,722	-0,683	-0,244	0,0079	0,015	0,057	-0,016	-0,011	-0,047
Кукурудза, гречка	2,457	0,802	-0,759	-0,271	0,0088	0,016	0,064	-0,018	-0,014	-0,053
Пшениця, горох	2,555	0,834	-0,789	-0,282	0,0091	0,017	0,066	-0,018	-0,014	-0,055

Усі коефіцієнти рівнянь регресій (4.22 – 4.24) є значущими відповідно до

формул (3.18) та (3.20).

Запишемо рівняння регресії (4.22 – 4.24) у натуральних величинах:

- при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса:

$$Q_{1(n_1, n_2, \alpha)} = -0,147 + 0,0175n_1 - 0,0144n_2 - 0,0274\alpha + 3,16 \cdot 10^{-6} n_1 n_2 + 2 \cdot 10^{-5} n_1 \alpha + 7,6 \cdot 10^{-5} n_2 \alpha - 6,4 \cdot 10^{-6} n_1^2 - 4,4 \cdot 10^{-6} n_2^2 - 2,089 \cdot 10^{-4} \alpha^2; \quad (4.25)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки:

$$Q_{2(n_1, n_2, \alpha)} = -0,179 + 0,0195n_1 - 0,0159n_2 - 0,0302\alpha + 3,52 \cdot 10^{-6} n_1 n_2 + 2,133 \cdot 10^{-5} n_1 \alpha + 8,533 \cdot 10^{-5} n_2 \alpha - 7,2 \cdot 10^{-6} n_1^2 - 5,2 \cdot 10^{-6} n_2^2 - 2,36 \cdot 10^{-4} \alpha^2; \quad (4.26)$$

- при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху:

$$Q_{3(n_1, n_2, \alpha)} = -0,156 + 0,0201n_1 - 0,0166n_2 - 0,0315\alpha + 3,64 \cdot 10^{-6} n_1 n_2 + 2,267 \cdot 10^{-5} n_1 \alpha + 8,8 \cdot 10^{-5} n_2 \alpha - 7,2 \cdot 10^{-6} n_1^2 - 5,2 \cdot 10^{-6} n_2^2 - 2,44 \cdot 10^{-4} \alpha^2. \quad (4.27)$$

Використовуючи дані результатів експериментальних досліджень, рівняння регресії (4.25 – 4.27), в межах змінних вхідних факторів за допомогою прикладного програмного забезпечення побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності продуктивності транспортування та змішування зернових матеріалів шнековим змішувачем, що представлено на рис. 4.19 – рис. 4.21 та у додатку Г.

Аналізуючи рівняння регресії (4.25 – 4.27), встановлено, що основним фактором, який впливає на продуктивність транспортування та змішування зернових матеріалів шнековим змішувачем є фактор $x_1(n_1)$. Менший вплив має фактор $x_2(n_2)$ і найменший - фактор $x_3(\alpha)$. Зростання фактора $x_1(n_1)$ призводить до збільшення продуктивності, а зростання факторів $x_2(n_2)$, $x_3(\alpha)$ – до зменшення продуктивності.

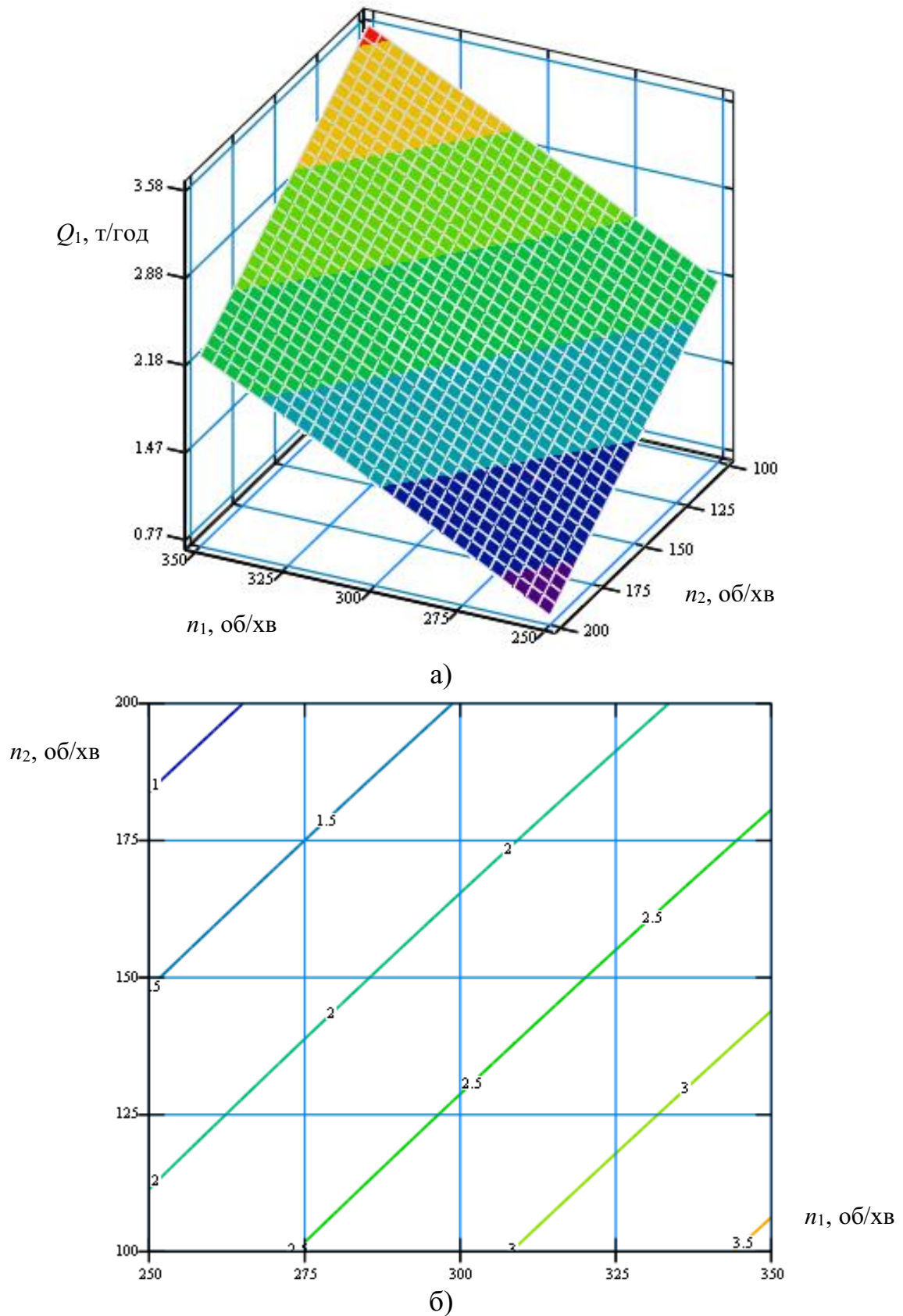
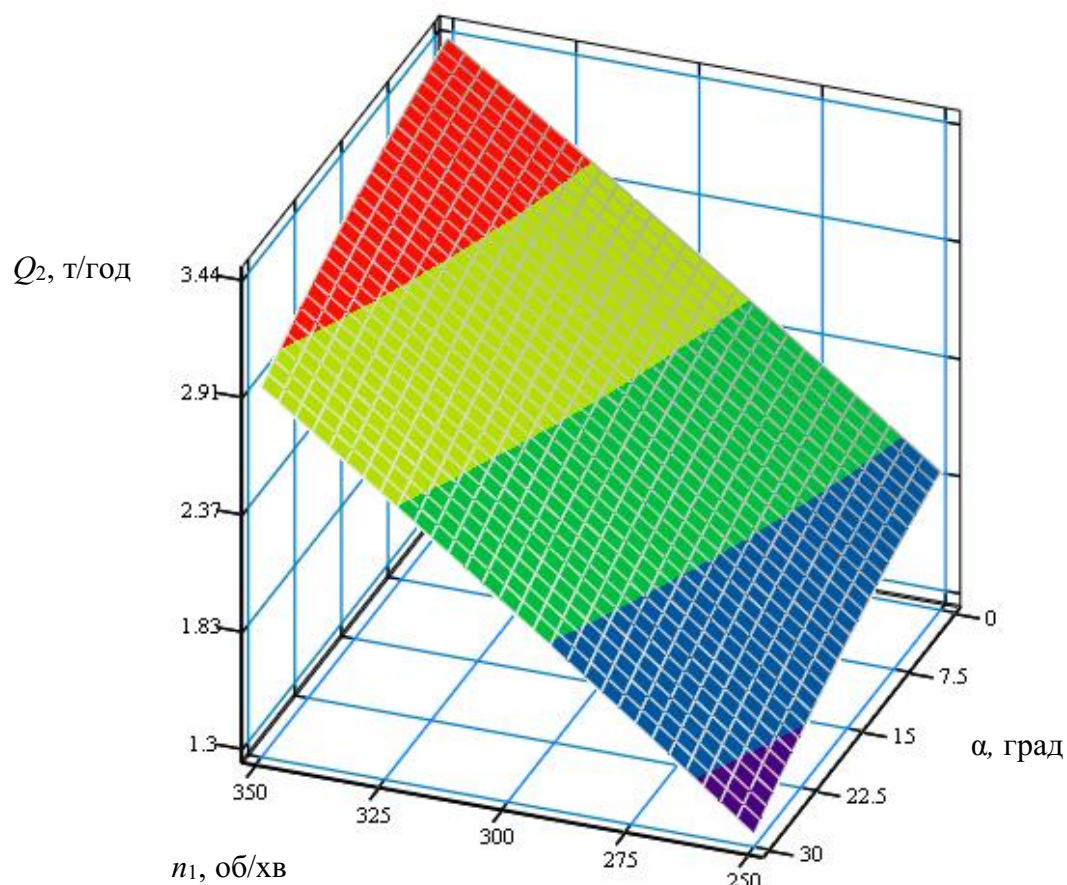
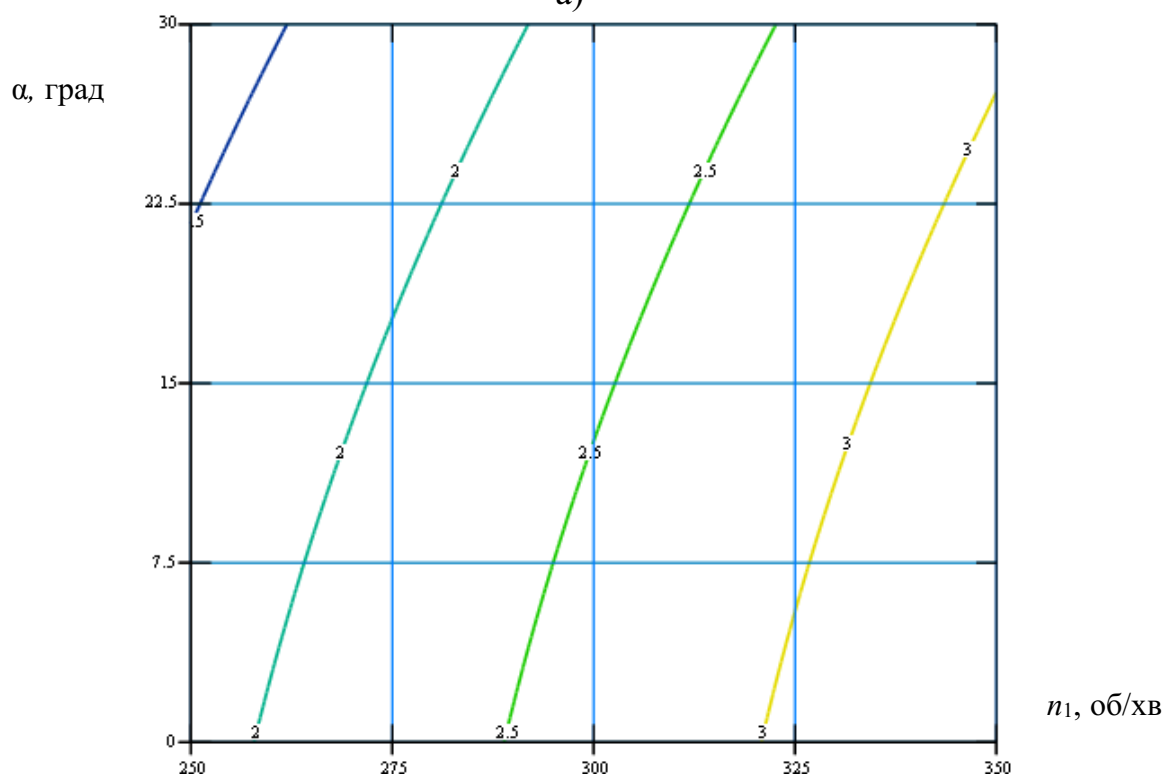


Рис. 4.19. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обортовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)



а)



б)

Рис. 4.20. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування двокомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обортовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута його нахилу α ($n_2 = 150$ об/хв.)

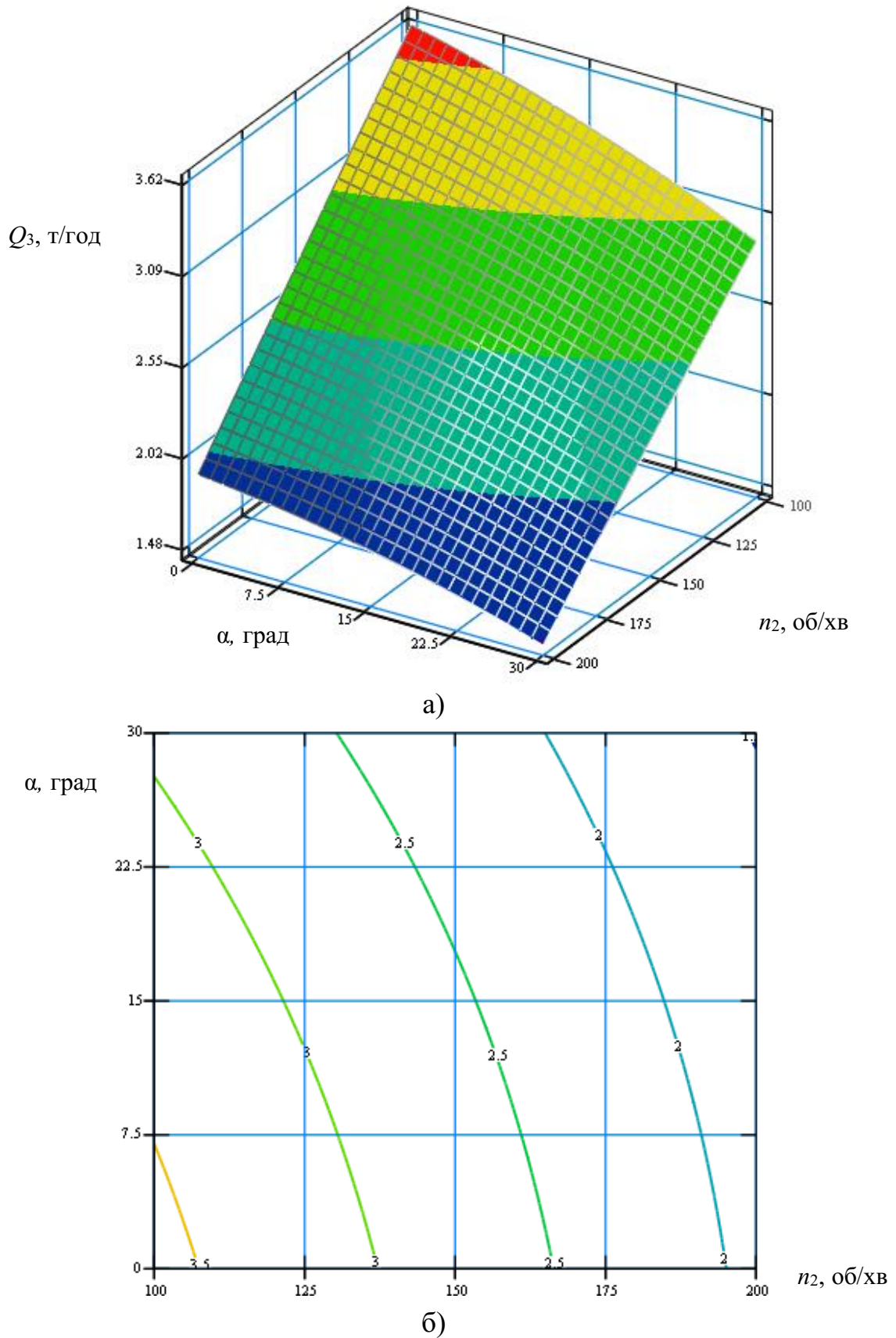


Рис. 4.21. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)

З рисунків 4.19 - 4.21, додатку Г та рівнянь регресії (4.25 – 4.27) зроблено висновки, що при збільшенні частоти обертання шнека, зменшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина продуктивності транспортування та змішування комбінації різних сипких матеріалів шнековим змішувачем зростає. Максимальне значення продуктивності шнекового змішувача при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 3,78 т/год, а мінімальне – 0,56 т/год. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення продуктивності шнекового змішувача становило 4,2 т/год, а мінімальне – 0,62 т/год. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення продуктивності шнекового змішувача становило 4,37 т/год, а мінімальне – 0,65 т/год.

Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання продуктивності шнекового змішувача в 1,85 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв до 200 об/хв призводить до зменшення продуктивності шнекового змішувача в 1,58 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град до 30 град призводить до зменшення продуктивності шнекового змішувача в 1,38 рази.

Різниця між результатами експериментальних та теоретичних досліджень становить до 15%.

4.5. Висновки

1. Представлено результати експериментальних досліджень із використанням розробленого та виготовленого дослідного зразка шнекового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для

одночасного змішування та транспортування зернових матеріалів, під час яких визначали закономірності взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів шнекового змішувача, зокрема частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача, із потужністю приводу обертання шнека, потужністю приводу обертання кожуха, продуктивністю шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування комбінації різних сипких матеріалів: зерен кукурудзи, проса, гороху, пшениці, гречки у таких межах зміни вхідних факторів: $250 \leq n_1 \leq 350$ (об/хв); $100 \leq n_2 \leq 200$ (об/хв); $0 \leq \alpha \leq 30$ (град).

2. Проведено статистичне оброблення результатів експериментальних досліджень з виведенням емпіричних рівнянь регресії, що дають можливість прогнозувати потужність приводу обертання шнека, потужність приводу обертання кожуха, продуктивність шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування за комбінації різних сипких матеріалів при транспортуванні шнековим конвеєром з обертовим кожухом.

3. Встановлено, що при зменшенні частоти обертання шнека та збільшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної та двохкомпонентних сумішей зменшується. Максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 11,28 %, а мінімальне – 7,32 %. Для двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 10,8 %, а мінімальне – 6,8 %. Для двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення коефіцієнта неоднорідності змішування дорівнювало 9,41 %, а мінімальне – 6,4 %. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,14 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,15 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки, в 1,07 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху. При цьому збільшення

частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв до 200 об/хв забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,22 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,2 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки, в 1,21 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху. Зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування: в 1,12 рази трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса; в 1,14 рази двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки; в 1,11 рази двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху.

4. Коефіцієнт неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші шнековим змішувачем з обертовим кожухом є в 1,64 рази меншим ніж коефіцієнт неоднорідності змішування звичайним гвинтовим конвеєром із спіральним гвинтовим робочим органом в межах досліджуваних частот обертання шнеків від 250 об/хв до 350 об/хв.

5. Визначено, що при збільшенні частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів збільшується. Максимальне значення потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 0,164 кВт, а мінімальне – 0,078 кВт. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення потужності приводу обертання шнека становило 0,182 кВт, а мінімальне – 0,087 кВт. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення потужності приводу обертання шнека становило 0,189 кВт, а мінімальне – 0,09 кВт. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання потужності приводу обертання шнека в 1,4 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв до 200 об/хв призводить до збільшення потужності приводу обертання шнека в 1,28 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє

збільшенню потужності приводу обертання шнека в 1,23 рази.

6. Встановлено, що при збільшенні частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів збільшується. Максимальне значення потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 0,045 кВт, а мінімальне – 0,017 кВт. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення потужності приводу обертання кожуха становило 0,05 кВт, а мінімальне – 0,019 кВт. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення потужності приводу обертання кожуха становило 0,052 кВт, а мінімальне – 0,02 кВт. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання потужності приводу обертання кожуха в 1,16 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв до 200 об/хв призводить до збільшення потужності приводу обертання кожуха в 2 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град до 30 град сприяє збільшенню потужності приводу обертання кожуха в 1,18 рази.

7. Визначено, що при збільшенні частоти обертання шнека, зменшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина продуктивності транспортування та змішування комбінації різних сипких матеріалів шнековим змішувачем зростає. Максимальне значення продуктивності шнекового змішувача при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса дорівнювало 3,78 т/год, а мінімальне – 0,56 т/год. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки максимальне значення продуктивності шнекового змішувача становило 4,2 т/год, а мінімальне – 0,62

т/год. При транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху максимальне значення продуктивності шнекового змішувача становило 4,37 т/год, а мінімальне – 0,65 т/год. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв до 350 об/хв призводить до зростання продуктивності шнекового змішувача в 1,85 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв до 200 об/хв призводить до зменшення продуктивності шнекового змішувача в 1,58 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град до 30 град призводить до зменшення продуктивності шнекового змішувача в 1,38 рази.

РОЗДІЛ 5

ПРОЄКТУВАННЯ ГВИНТОВИХ КОНВЕЄРІВ-ЗМІШУВАЧІВ З ОБЕРТОВИМ КОЖУХОМ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

5.1. Синтез конструкцій гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів

Проведення структурно-схемного синтезу часто дозволяє одержати значну гамму досить ефективних конструктивних рішень різноманітних технічних засобів, що у повній мірі також стосується генерування альтернативних рішень гвинтових змішувачів. Гвинтові конвеєри-змішувачі з обертовим кожухом (ГКЗОК) є нетиповими механічними засобами для виконання операції змішування матеріалів, проте вони можуть набути досить широкого застосування у різних галузях економіки, поєднуючи операцію переміщення сипкого матеріалу із операцією його перемішування. Для їх створення і подальшого дослідження необхідно здійснити розроблення окремих раціональних конструкцій, які б відповідали відповідним параметрам у царині досягнення якісних показників процесу змішування, високої продуктивності виконання процесу, а також прийнятної собівартості виготовлення, експлуатації та обслуговування таких конструкцій. Задля цього і доцільно скористатись методикою структурно-схемного синтезу за допомогою морфологічного аналізу для отримання відповідних технічних рішень [133-136].

Відтак з метою створення нових прогресивних конструкцій гвинтових змішувачів було проведено генерування їх альтернатив при використанні структурно-схемного синтезу методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу [152-157]. У результаті проведеного аналізу впливу різних факторів на процес змішування матеріалів гвинтовими механізмами було визначено ознаки конструктивних елементів таких механізмів і їх

взаємозв'язки, що дозволило побудувати відповідну морфологічну таблицю цих елементів для ГКЗОК (табл. 5.1), з якої було виділено модель механічної системи «Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом» (рис. 5.1). У результаті проведеного структурно-схемного синтезу ГКЗОК обрано наступні базові морфологічні ознаки: привід; шнек, який включає кожух (жолоб) і гвинтовий робочий орган; бункер; механізм розвантаження; опорно-руховий механізм [152, 153].

Для проведення структурно-схемного синтезу ГКЗОК використано метод синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу, який передбачає розбивку окремих груп на підгрупи, де кількість варіантів визначається по формулі (1.14). Загальна кількість генерованих варіантів гвинтових ГКЗОК при використанні методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу становитиме [152, 153]:

$$\begin{aligned}
 N_{ГКЗОК} = & \begin{vmatrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 2.1 \\ 2.2 \\ 2.3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 3.1 \\ 3.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 4.1 \\ 4.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 5.1 \\ 5.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 6.1 \\ 6.2 \\ 6.3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 7.1 \\ 7.2 \\ 7.3 \\ 7.4 \\ 7.5 \\ 7.6 \\ 7.7 \\ 7.8 \\ 7.9 \\ 7.10 \\ 7.11 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 8.1 \\ 8.2 \\ 8.3 \\ 8.4 \end{vmatrix} + \\
 & + \begin{vmatrix} 9.1 \\ 9.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 10.1 \\ 10.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 11.1 \\ 11.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 12.1 \\ 12.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 13.1 \\ 13.2 \\ 13.3 \\ 13.4 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 14.1 \\ 14.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 15.1 \\ 15.2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 16.1 \\ 16.2 \end{vmatrix} = 47.
 \end{aligned}$$

Таблиця 5.1

Морфологічна таблиця ознак конструктивних елементів гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом

ПРИВІД							
1. Тип				2. Вид руху			
1.1 Електропривід				2.1. З постійною швидкістю			
1.2. Вібропривід				2.2. Зі змінною швидкістю			
1.3 Двигун внутрішнього згорання				2.3. З періодичними зупинками (пульсуючий)			
ШНЕК							
Кожух (жолоб)				Гвинтовий робочий орган			10. Можливість зміни довжини
3. Конструкція жолоба	4. Кількість	5. Додаткові елементи	6. Спосіб приведення в обертовий рух	7. Профіль спіралі	8. Конструкція гвинта	9. Кількість	
3.1. Одного діаметра 3.2. Різного діаметра	4.1. Один 4.2. Два	5.1. Без додаткових елементів 5.2. Зі вставками (розпушувачами), закріплені по внутрішньому профілі жолоба	6.1. Примусовий (від приводу) 6.2. Вільний (за рахунок зачеплення матеріалу) 6.3. З можливістю регулювання (пригальмування)	7.1. Суцільна (стандартна) 7.2. Стрічкова 7.3. Лопатева без регулювання величини просипання 7.4. Лопатева з регулюванням величини просипання 7.5. Гофрована 7.6. З розрізами, отворами чи вирізами 7.7. Вузкополосна 7.8. Широкополосна 7.9. Еластична 7.10. Із загинами по зовнішній кромці спіралі 7.11. Конічна	8.1. З одним кроком 8.2. З різним кроком 8.3. Однозахідний 8.4. Багатозахідний	9.1. Один 9.2. Два	10.1. Без можливості зміни (суцільна) 10.2. З можливістю зміни (секційна)
БУНКЕР					15. Механізм розвантаження	16. Опорно-руховий механізм	
11. Профіль	12. Кількість	13. Розташування по відношенню до шнека	14. Механізм просипання				
11.1. Суцільний 11.2. Секційний	12.1. Один 12.2. Де-кілька	13.1. Співвісне і перпендикулярне 13.2. Бічне і перпендикулярне 13.3. Співвісне і нахилене 13.4. Бічне і нахилене	14.1. З регульованим завантаженням 14.2. З нерегульованим завантаженням		15.1. Розвантажувальний отвір 15.2. Розвантажувальний патрубок	16.1. Без можливості зміни кута нахилу шнека 16.2. З можливістю зміни кута нахилу шнека	

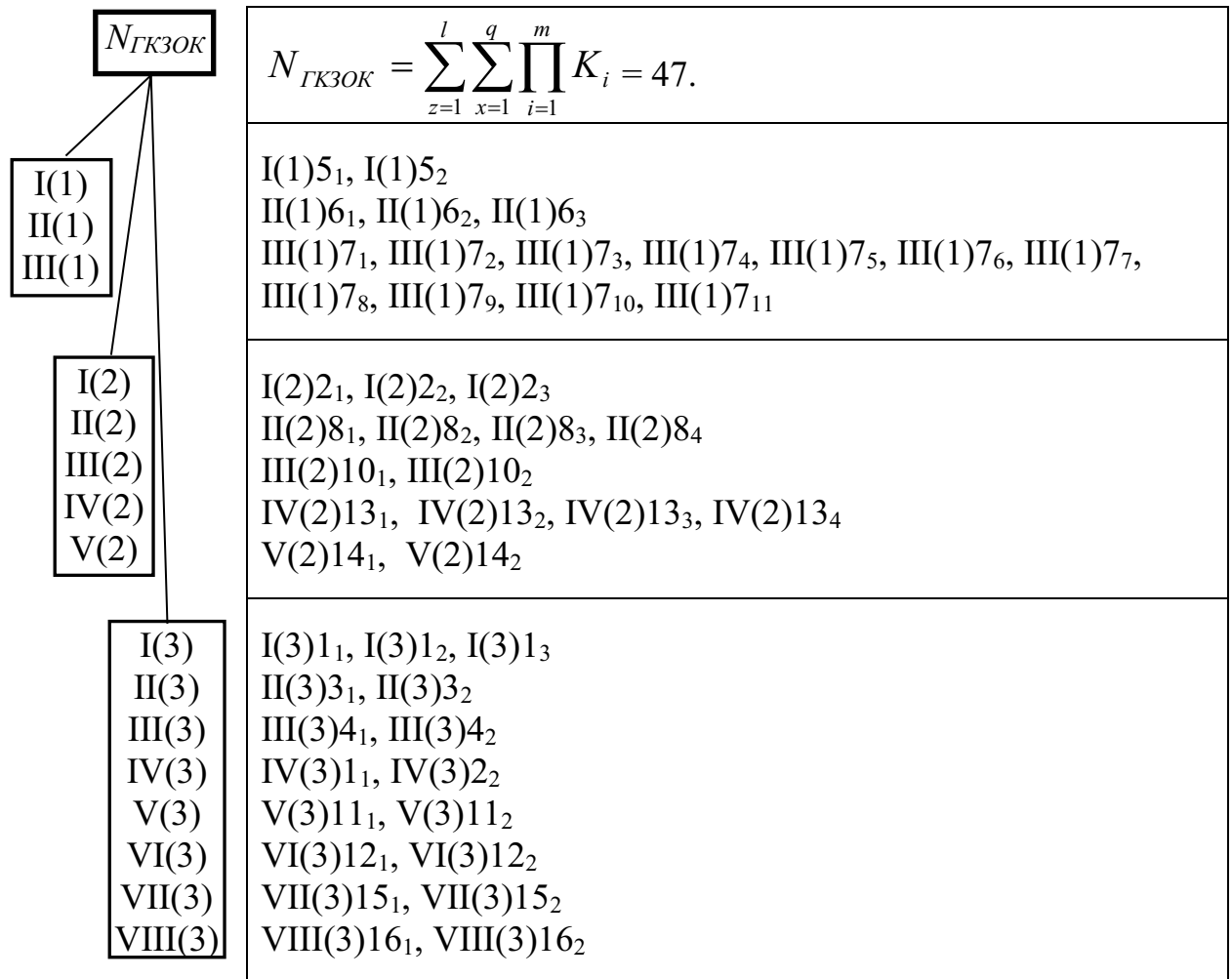


Рис 5.1. Модель механічної системи «Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом»: I - VIII – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

Найважливішим елементом в конструкції ГКЗОК є шнек, до складу якого входить кожух (конструктивні ознаки 3 – 6 і 10 з табл. 5.1) і гвинтовий робочий орган (конструктивні ознаки 7 – 9 і 10 з табл. 5.1) [152]. Саме конструктивні ознаки шнека (5 - 7) входять до першого ієрархічного рівня і від них у максимальній мірі залежить ефективність виконання операції змішування генерованими конструкціями. Якщо з певними конструктивними ознаками конструкції жолоба не виникає питань (наприклад, ознака 3), то наявність у ньому додаткових елементів (ознака 5) і способу приведення в обертовий рух (ознака 6) сприятимуть значному підвищенню якості і продуктивності змішування. Крім того, конструкція гвинтового робочого органу (ознака 7) має вирішальний вплив на ефективність якісних параметрів генерованих варіантів

ГКЗОК. Тому з метою отримання ефективних варіантів ГКЗОК було синтезовано нові конструктивні рішення гвинтових робочих органів, конструктивні схеми яких (ознака 7) відображено на рис. 5.2 та рис. 5.3, на які отримано патенти України на корисну модель (додаток Д). Зокрема пат. України № 153687 – «Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів» [160] рис. 5.2 і пат. України № 153774 – «Гвинтовий робочий орган змішувача» [161] рис. 5.3.

Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів [160] (рис. 5.2) виконано у вигляді пустотілого вала 1, в якому по гвинтовій лінії закріплено елементи 3 відомим способом в отворах 4 спіралі незначної висоти 2. Між елементами 3 існують отвори для просипання та змішування матеріалів 5.

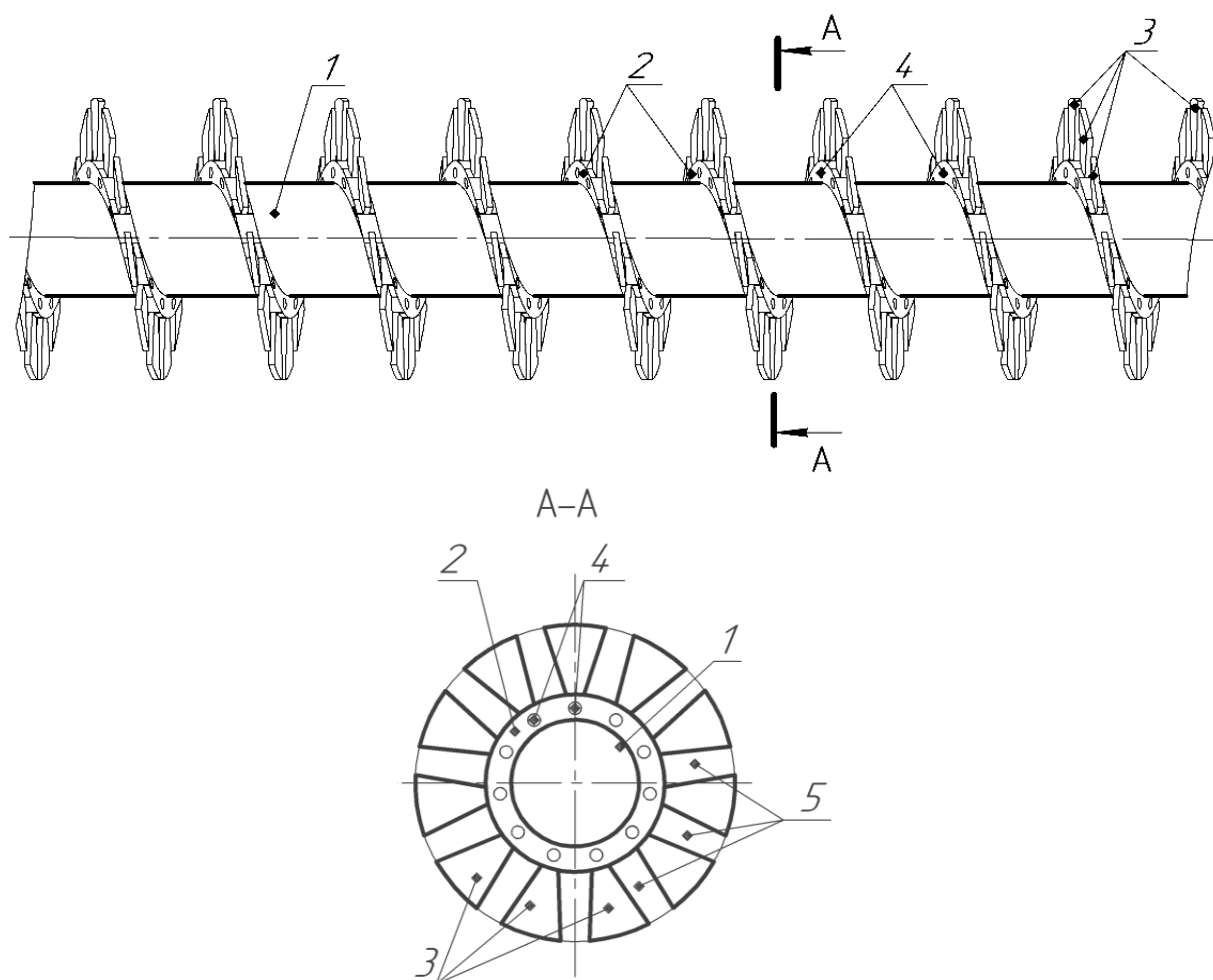


Рис 5.2. Конструктивна схема шнека для змішування з механічним кріпленням елементів (пат. України № 153687 [160])

Працює шнек наступним чином [160]. Матеріали для змішування подаються в зону перевантаження на зовнішню поверхню пустотілого вала 1 і за допомогою елементів 3, закріплених відомим способом в отворах 4 спіралі незначної висоти 2, переміщуються в зону вивантаження (рис. 5.2). При переміщенні матеріали потрапляють в отвори для просипання та змішування матеріалів 5, що існують між елементами 3, і інтенсивно змішуються. При цьому існує можливість здійснювати підбір необхідної величини елементів 3 для регулювання отворів для просипання та змішування матеріалів 5 з метою кращого змішування матеріалів [160].

Гвинтовий робочий орган змішувача [161] (рис. 5.3) виконано у вигляді вала 1 з гвинтом 2, який виконано збірним з базової лопатевої спіралі 3 та спіралі Г-подібної форми 4 із внутрішньою суцільною циліндричною частиною 5 та зовнішньою спіральною лопатевою частиною 6. Базова лопатева спіраль 3 та спіралі Г-подібної форми 4 є однаковими по зовнішньому діаметру та кроку. Базову лопатеву спіраль 3 жорстко закріплено на валу 1, а спіраль Г-подібної форми 4 внутрішньою суцільною циліндричною частиною 5 розміщено на валу 1 з можливістю провертання відносно нього. Кінці 7 спіралі Г-подібної форми 4 зафіксовано на валу 1 відомим способом. Крім того, спіраль Г-подібної форми 4 торцевою зовнішньою спіральною лопатевою частиною 6 контактує з базовою лопатевою спіраллю 3 [161].

Працює гвинтовий робочий орган змішувача таким чином [161]. Матеріали для змішування подаються в зону перевантаження на зовнішню поверхню пустотілого вала 1 і за допомогою базової лопатевої спіралі 3 та спіралі Г-подібної форми 4 переміщуються в зону вивантаження (рис. 5.3). При переміщенні матеріали потрапляють в отвори між лопатями базової лопатевої спіралі 3 та спіралі Г-подібної форми 4 й інтенсивно змішуються. При цьому для інтенсифікації змішування існує можливість здійснювати підбір необхідного зазору між лопатями базової лопатевої спіралі 3 та спіралі Г-подібної форми 4 шляхом провертання спіралі Г-подібної форми 4 відносно вала 1 з подальшою фіксацією її кінців 7 на ньому [161].

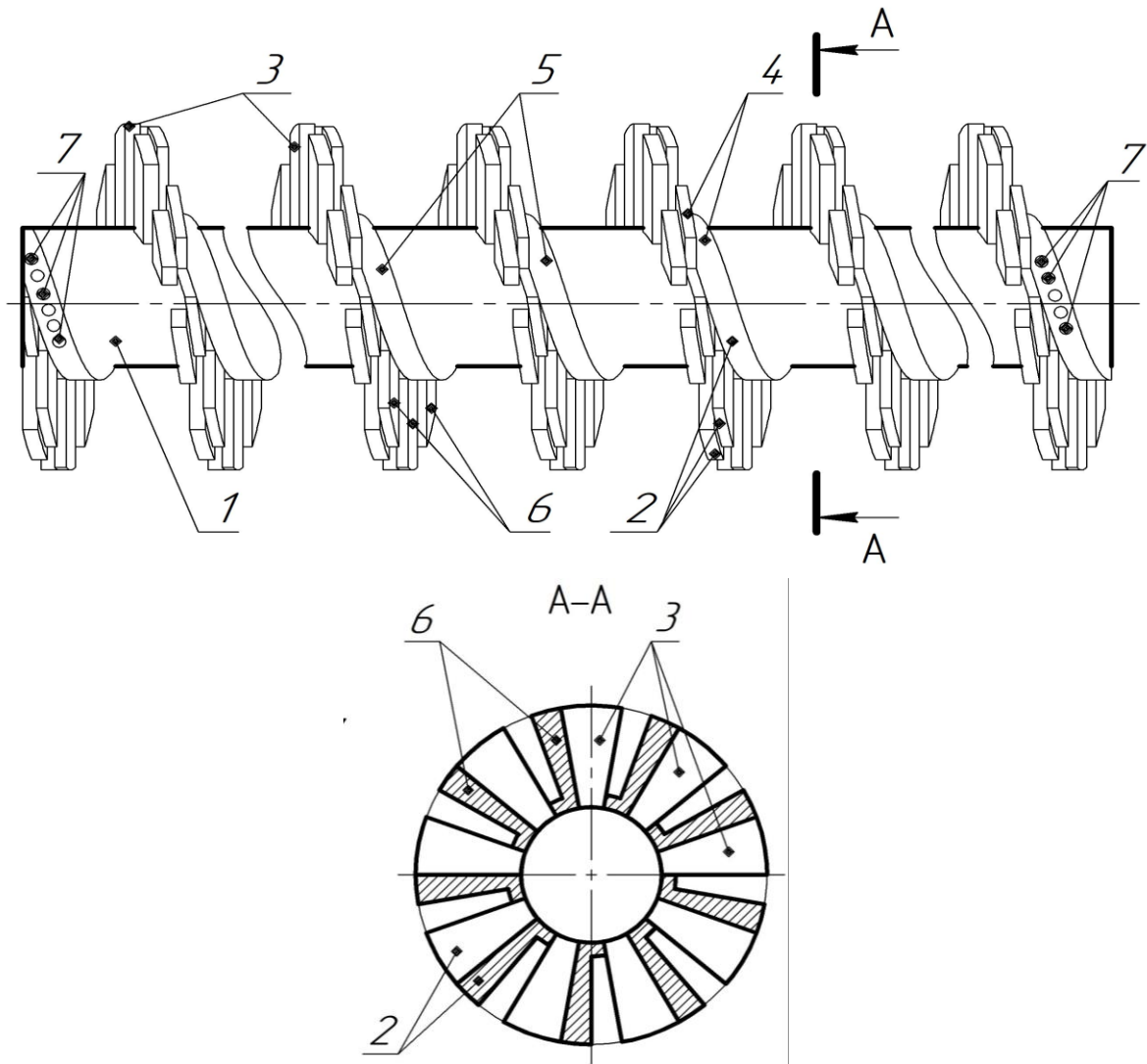


Рис 5.3. Конструктивна схема гвинтового робочого органу змішувача з можливістю вибору зазору між лопатями (пат. України № 153774 [161])

До переваг представлених гвинтових робочих органів змішувачів (рис. 5.2 і рис. 5.3) слід віднести можливість підбору необхідної величини зазору між лопатями для інтенсифікації процесу змішування матеріалів різних фракцій [145-148]. На їх основі була розроблена конструкція шнекового змішувача з регульованими отворами просипання [162].

Також для інтенсифікації процесу змішування компонентів різних габаритних розмірів у гвинтових змішувачах можна використовувати спіралі різного профілю, зокрема конструктивні ознаки 7 з табл. 5.1. Для забезпечення можливості заміни спіралей розроблено і запатентовано шнек з механічним

кріпленням спіралей (пат. України № 157050 [163], додаток Д), конструктивну схему якого зображено на рисунку 5.4. Так на пустотілому валу 1 розробленого шнека [163] можливе кріплення наступних спіралей: суцільних (ознака 7.1 з табл. 5.1), гофрованих (ознака 7.5 з табл. 5.1), з розрізами, отворами чи вирізами (ознака 7.6 з табл. 5.1), вузькополосних (ознака 7.7 з табл. 5.1), широкополосних (ознака 7.8 з табл. 5.1), із загинами по зовнішній кромці спіралі (ознака 7.10 з табл. 5.1) та конічних (ознака 7.11 з табл. 5.1).

Шнек (рис. 5.4) виконаний у вигляді пустотілого вала 1, на зовнішній поверхні якого по гвинтовій лінії закріплені спарені планки 2 меншої висоти спіралі 3. Причому відстань між спареними планками 2 відповідає товщині спіралі 3. Між спареними планками 2 по гвинтовій лінії встановлена спіраль 3, яка з обох сторін обмежена стопорними кільцями 5, що встановлені у виточках 4 пустотілого вала 1.

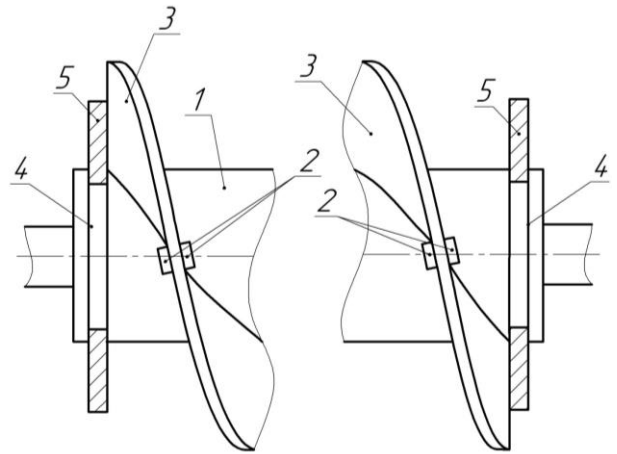


Рис 5.4. Конструктивна схема шнека з механічним кріпленням спіралей (пат. України № 157050 [163])

Працює шнек з механічним кріпленням спіралей наступним чином. Транспортований матеріал подається в зону перевантаження на зовнішню поверхню пустотілого вала 1 і за допомогою спіралей 3 переміщається в зону вивантаження (рис. 5.4). При необхідності заміни спіралі 3 з виточки 4 знімається стопорне кільце 5. Далі проводиться вигвинчування зі спарених планок 2 старої спіралі 3 і загвинчування на її місце нової. Після проведеної операції заміни спіраль 3 на пустотілому валу 1 фіксується стопорним кільцем 5, яке вставляється у виточку 4. Простота кріплення спіралей в розробленій конструкції є її перевагою [163].

Останнім часом широкого використання набувають шнеки з еластичними поверхнями, які широко можна використовувати для змішування сипких

матеріалів (конструктивна ознака 7.9 з табл. 5.1). Нами розроблено і запатентовано шнек для змішування з еластичною щіткоподібною поверхнею (пат. України № 157049 [164], додаток Д) і шнек із змінним еластичним елементом (пат. України № 157149 [165], додаток Д). До переваг розроблених шнеків [164, 165] для змішування з еластичною щіткоподібною поверхнею відноситься покращення процесу змішування матеріалів за рахунок їх просипання при потраплянні у зони еластичних елементів меншої висоти та можливість заміни еластичних елементів.

За результатами проведеного синтезу і використання вище представленої розробленої методики відбору варіантів було спроектовано нові типи ГКЗОК, на які отримано патенти України на корисну модель. Зокрема гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом (пат. України № 154380 [154], додаток Д), який зображено на рис. 5.5, і стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом (пат. України № 154996 [155], додаток Д), конструктивна схема якого зображена на рис. 5.6.

Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом виконано у вигляді вала 1 з гвинтом 2, який знаходиться у циліндричному кожусі 3 з можливістю кругового повертання [154, 156] (рис. 5.5). Гвинт 2 виконано у вигляді спіралеподібних елементів 4, які закріплено по гвинтовій лінії відомим способом на валу 1 з певною відстанню один від одного, яка забезпечує просипання матеріалів при їх змішуванні. Верхня частина вала 1 з гвинтом 2 жорстко з'єднана з двигуном 5, який закріплений на нерухомій верхній частині 6 циліндричного кожуха 3. На нерухомій верхній частині 6 циліндричного кожуха 3 розташований вивантажувальний патрубок 7. Нижній кінець вала 1 з гвинтом 2 та рухома нижня частина 8 циліндричного кожуха 3 встановлені з можливістю колового обертання у завантажувальному бункері 9. До завантажувального бункера 9 закріплений механізм регулювання 10 рухомої нижньої частини 8 циліндричного кожуха 3, який складається з кронштейна 11, у якому розташований гвинт з лівою та правою частиною різі 12, на яких встановлені ліву 13 та праву 14 щоки з гальмівними накладками 15. На кінці

однієї частини гвинта закріплено важіль обертання 16. До нерухомої верхньої частини циліндричного кожуха 5 закріплена регульовальна опора 17.

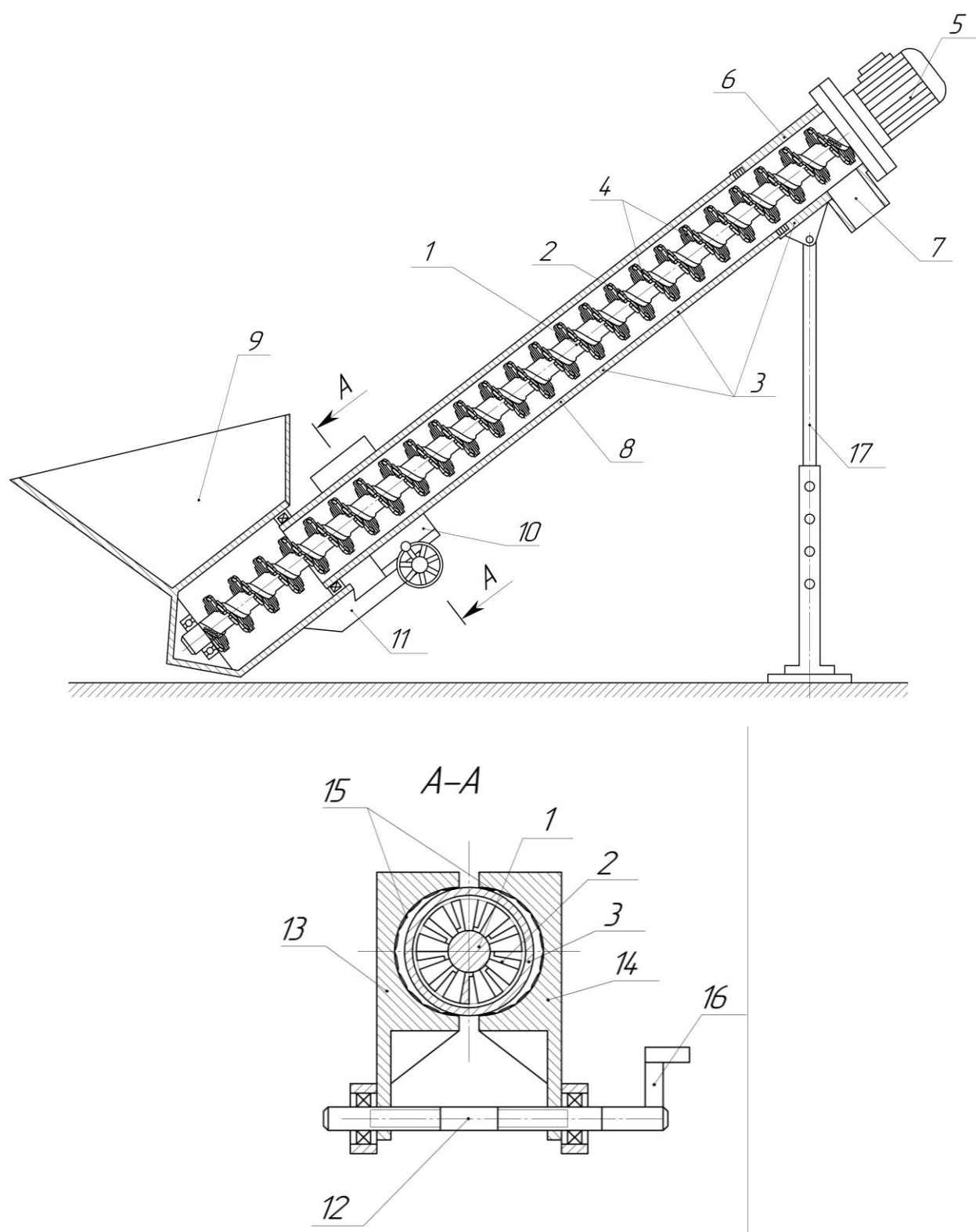


Рис. 5.5. Конструктивна схема конвеєра-змішувача з обертовим кожухом без примусового обертання кожуха та з можливістю його пригальмовування (пат. України № 154380 [154])

Працює гвинтовий конвеєр-змішувача з обертовим кожухом наступним чином. Матеріали для змішування подаються у завантажувальний бункер 9, а з нього потрапляють у зону змішування на зовнішню поверхню вала 1 з гвинтом 2 (рис. 5.5). Далі вмикають двигун 5, який приводить в обертовий рух вал 1 з гвинтом 2. Під дією гвинта 2 сипкі матеріали подаються до циліндричного кожуха 3, де за рахунок сил тертя зрушують і приводять в обертовий рух рухому нижню частину 8 циліндричного кожуха 3. При цьому сипкі матеріали транспортуються і перемішуються спіралеподібними елементами 4 гвинта 2, які закріплено по гвинтовій лінії відомим способом на валу 1 з певною відстанню один від одного, у зону вивантаження до вивантажувального патрубку 7, з якого вивантажуються на зовню. Для регулювання частоти обертання рухомої нижньої частини 8 циліндричного кожуха 3 з метою покращення процесу змішування матеріалів використовується механізм регулювання 10. За допомогою повертання важеля обертання 16 проводять притискання чи відтискання лівої 13 та правої 14 щок з гальмівними накладками 15 до рухомої нижньої частини 8 циліндричного кожуха 3, тим самим створюючи чи знімаючи пригальмовування нижньої частини 8 циліндричного кожуха 3. Потрібна висота підйому змішуваних матеріалів регулюється регулювальною опорою 17.

Стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом виконано у вигляді вала 1 з гвинтом 2, який знаходиться у циліндричному кожусі 3 з можливістю кругового повертання [155, 157] (рис. 5.6). Вал 1 з гвинтом 2 та рухома частина 4 циліндричного кожуха 3 виконані секційними. Зокрема верхня секція 5 рухомої частини 4 циліндричного кожуха 3 є у взаємодії з можливістю відносного осьового зміщення з нижньою секцією 6 рухомої частини 4 циліндричного кожуха 3, а нижня секція 7 вала 1 з гвинтом 2 є у взаємодії з можливістю відносного осьового зміщення з верхньою секцією 8 вала 1 з гвинтом 2. Верхня частина верхньої секції 8 вала 1 з гвинтом 2 жорстко з'єднана з двигуном 9, який закріплений на нерухомій частині 10 циліндричного кожуха 3. На нерухомій частині 10 циліндричного кожуха 3

розташовані вивантажувальний патрубок 11 і додатковий двигун 12, який приводить в обертання рухому частину 4 циліндричного кожуха 3. Нижній кінець нижньої секції 7 вала 1 з гвинтом 2 і нижній кінець нижньої секції 6 рухомої нижньої частини 4 циліндричного кожуха 3 встановлені з можливістю колового обертання у завантажувальному бункері 13. До нерухомої частини 10 циліндричного кожуха 3 закріплена регульовальна опора 14. Для фіксації досліджуваних характеристик стенд містить перший перетворювач частоти 15 обертання двигуна 9 і другий перетворювач частоти 16 обертання додаткового двигуна 12, керування якими здійснюється з першого персонального комп'ютера 17 та другого персонального комп'ютера 18.

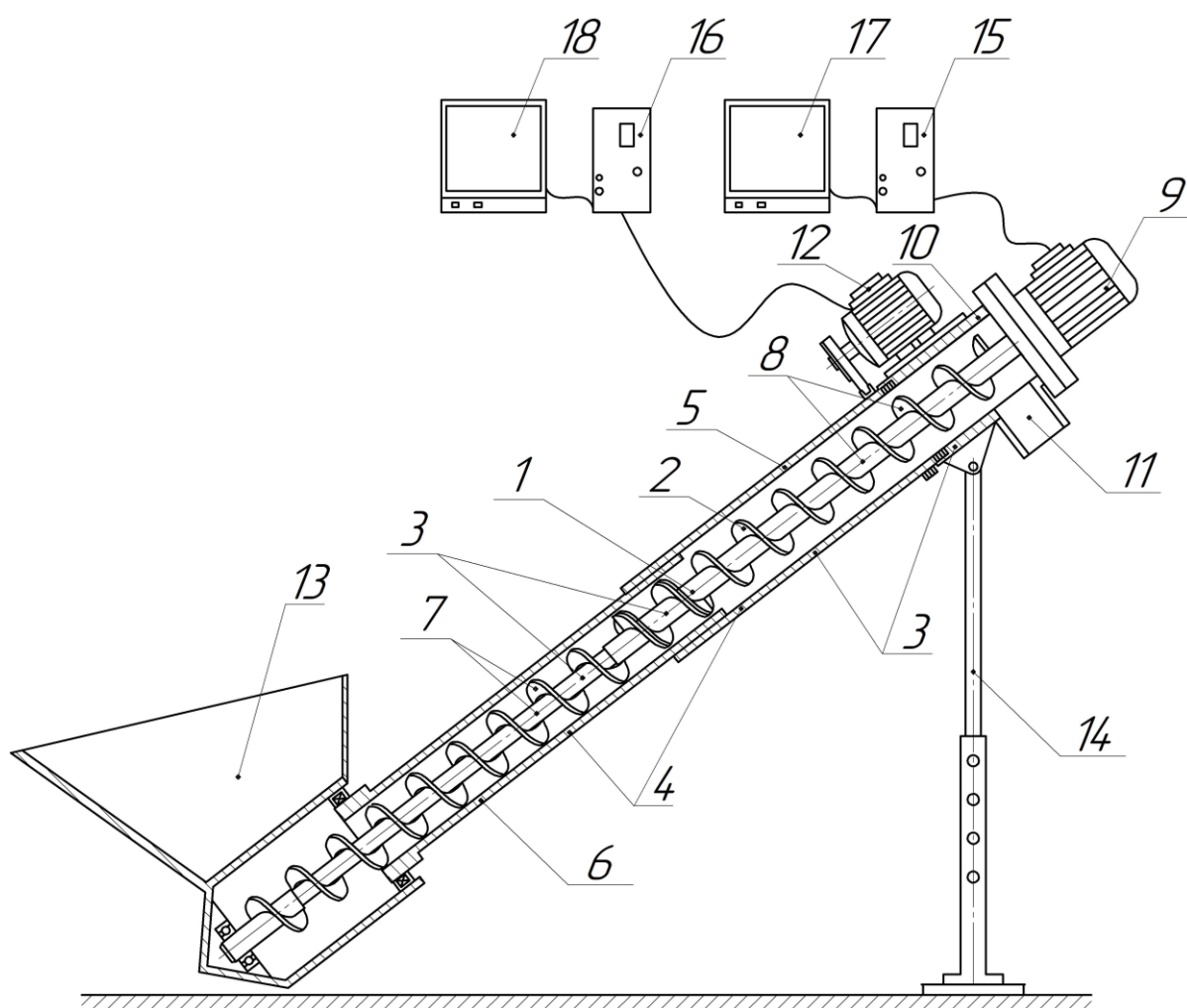


Рис. 5.6. Конструктивні схеми синтезованих конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом з регульованим обертанням кожуха (пат. України № 154996 [155])

Працює стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом наступним чином [155, 157] (рис. 5.6). Матеріали для змішування подаються у завантажувальний бункер 13, а з нього потрапляють у зону змішування на зовнішню поверхню вала 1 з гвинтом 2. Далі з першого персонального комп'ютера 17 та другого персонального комп'ютера 18 через перший перетворювач частоти 15 і другий перетворювач частоти 16 вмикають двигун 9 і додатковий двигун 12, які приводять в обертовий у потрібному напрямку рух вал 1 з гвинтом 2 та рухома частину 4 циліндричного кожуха 3. Під дією гвинта 2 сипкі матеріали подаються до циліндричного кожуха 3, де гвинтом 2 і рухома частиною 4 циліндричного кожуха 3 перемішуються і транспортуються в зону вивантаження до вивантажувального патрубку 11, з якого вивантажуються на зовню. При наявності потреби регулювання довжини магістралі гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом проводиться необхідне осьове зміщення верхньої секції 5 рухоми частини 4 циліндричного кожуха 3 відносно нижньої секції 6 рухоми частини 4 циліндричного кожуха 3 та нижньої секції 7 вала 1 з гвинтом 2 відносно верхньої секції 8 вала 1 з гвинтом 2. Для проведення експериментів частоти обертання двигуна 9 і додаткового двигуна 12 регулюються згідно потреби з першого персонального комп'ютера 17 та другого персонального комп'ютера 18 через перший перетворювач частоти 15 і другий перетворювач частоти 16. Потрібна висота підйому змішуваних матеріалів регулюється регулювальною опорою 14.

Дані конструктивні рішення ГКЗОК володіють рядом переваг, у порівнянні із традиційними гвинтовими змішувачами, позаяк можуть забезпечувати значно вищі показники продуктивності та ефективності виконання технологічного процесу змішування, а також володіти розширеними функціональними характеристиками. Зокрема до переваг розробленого ГКЗОК (рис. 5.5) відноситься можливість регулювання частоти обертання рухоми частини кожуха для покращення процесу змішування матеріалів, а також використання у його конструкції гвинтових робочих органів з можливістю

вибору зазору між лопатями. А до переваг розробленого ГКЗОК (рис. 5.6) доцільно віднести можливість регулювання частоти обертання двигунів для приведення у відповідний обертовий рух гвинта та рухомої частини кожуха для змішування матеріалів з візуалізацією та фіксацією експериментальних даних у персональних комп'ютерах, а також можливість зміни довжини траси змішування і переміщення матеріалів.

5.2. Методика проектування гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів

Особливості проектування гвинтових змішувачів та їх робочих органів, а також їх основні конструктивні характеристики, були викладені в даній дисертаційній роботі та працях [1-6, 21, 28-130]. Вони передбачають проведення конструкторського і технологічного проектування. При конструкторському проектуванні гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом роблять вибір за:

1. Конструктивними особливостями кожуха:

- можливостями забезпечення вільного чи примусового обертання;
- межами частоти і напрямку обертання;
- можливості його пригальмовування;
- підбору діаметра (внутрішнього і зовнішнього);
- довжині кожуха і його робочої частини;
- можливості зміни його довжини;
- можливості зміни його положення по відношенню до горизонту;
- конструкційними матеріалами, з якого він виготовляється;
- оснащеністю додатковими елементами для підвищення ефективності змішування;

2. Конструкції гвинтового робочого органу:

- профілю спіралі;

- діаметра шнека (з врахуванням величини зазору між зовнішньою поверхнею гвинтового робочого органу змішувача та внутрішньою поверхнею кожуха);

- кроку спіралі і можливості її зміни;

- багатозахідності гвинта;

- наявності і діаметра вала шнека;

3. Конструктивних особливостях приводів:

- кількості;

- типу;

- потужності;

- можливості регулювання частоти обертання кожуха і гвинтового робочого органу;

4. Конструктивних особливостях бункера:

- профілю і секційності;

- розташуванню відносно шнека.

Проведення технологічного проектування гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом роблять вибір по [154-157]:

- матеріалах, які використовуються при виготовленні;

- технологічних процесах виготовлення окремих елементів змішувача і складання його окремих частин та в цілому конструкції;

- застосуванні типізації і конструктивної наслідуваності при розробленні процесів виготовлення і складання;

- використанню уніфікованих і стандартизованих елементів конструкції змішувача;

- використанню стандартного та оригінального оснащення та обладнання, а також їх розробленні при потребі;

- здешевленню собівартості виготовлення змішувача;

- можливостях спрощення використовуваних процесів;

- можливостях забезпечення безпеки виконання процесів виготовлення і складання.

Особливості технологічного проектування і виготовлення лопатевих та інших типів спіралей було обґрунтовано в працях [166-168], а окремі способи виготовлення гвинтових заготовок запатентовано [169, 170] (додаток Д).

При проектуванні ГКЗОК слід враховувати найважливіші фактори, такі, як: загальна вартість, продуктивність, ефективність технологічного процесу змішування та кількість функціональних характеристик. Кінцевий вибір синтезованих конструктивних рішень ГКЗОК доцільно проводити шляхом відбору альтернатив з максимізацією очікуваного позитивного результату [152, 153]:

$$A_{\text{ГКЗОК}} = \frac{\frac{3B_{mn}}{\sum_{i=1}^n EB_i} \cdot k_{\text{ваг}1} + \frac{Q_{\text{нк}}}{Q_{\text{бн}}} \cdot k_{\text{ваг}2} + \frac{V_{\text{нк}}}{V_{\text{бн}}} \cdot k_{\text{ваг}3} + \frac{N_{\text{нк}}}{N_{\text{бн}}} \cdot k_{\text{ваг}4}}{k_{\text{ваг}1} + k_{\text{ваг}2} + k_{\text{ваг}3} + k_{\text{ваг}4}}, \quad (5.1)$$

де $3B_{mn}$ – загальна вартість базового представника гвинтового змішувача (включає витрати на купівлю, доставку, монтаж, обслуговування, ремонт та експлуатаційні витрати), грн.; EB_i – елементи витрат пов'язані із набуттям і використанням ГКЗОК (вартість купівлі, доставки, монтажу, обслуговування, ремонту та експлуатації), грн.; n – кількість елементів витрат пов'язаних із набуттям і використанням ГКЗОК; $Q_{\text{нк}}$, $Q_{\text{бн}}$ – відповідно продуктивність змішування новою конструкцією ГКЗОК і базовим представником гвинтового змішувача, кг/год.; $V_{\text{нк}}$, $V_{\text{бн}}$ – відповідно ефективність технологічного процесу змішування новою конструкцією ГКЗОК і базовим представником гвинтового змішувача, %; $N_{\text{нк}}$, $N_{\text{бн}}$ – відповідно кількість функціональних характеристик нової конструкції ГКЗОК і базового представника гвинтового змішувача (можливість мобільної зміни місця завантаження чи напрямку вивантаження, довжини траси змішування і переміщення, виконання додаткових функцій, таких як пресування, сепарація тощо); $k_{\text{ваг}1}$, $k_{\text{ваг}2}$, $k_{\text{ваг}3}$, $k_{\text{ваг}4}$ – відповідно ваги показників загальної вартості, продуктивності, ефективності технологічного процесу змішування та кількості функціональних характеристик, що враховують їх важливість і пріоритетність, $k_{\text{ваг}} = 0,01 \dots 1$.

5.3. Техніко-економічне обґрунтування доцільності використання гвинтових змішувачів

Якщо порівнювати з точки зору техніко-економічної ефективності розроблену і досліджену конструкцію гвинтового конвеєра-змішувача з обертовими кожухом [152, 154] з існуючими варіантами гвинтових змішувачів, то можна зробити висновок, що для досягнення високої якості змішування суміші в діючих варіантах [171]:

- жорстких гвинтових конвеєрів-змішувачів [3, 5] існують підвищені витрати на їх виготовлення, пов'язані із значною матеріаломісткістю за рахунок значної довжини їх робочої частини, та підвищені витрати на електроенергію, враховуючи значну довжину траси перелопачування суміші від завантажувального бункера до вивантажувального вікна;

- шнекових змішувачів з пересипанням [3, 5] існують підвищені експлуатаційні витрати, враховуючи значну кількість циклів для перелопачування суміші, а також часто неможливість переміщення суміші в потрібному напрямку і потребу у додатковому транспортері.

Відтак, проведемо порівняльний розрахунок витрат на використання жорсткого гвинтового конвеєра-змішувача [3, 5], шнекового змішувача з пересипанням [3, 5] і гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом [152, 154] при умові досягнення ними відповідної неоднорідності суміші за використання стандартних суцільних спіралей однакового типорозміру [171].

В результаті проведених експериментальних досліджень розробленого гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом з робочою довжиною зони змішування і переміщення суміші 1,7 м і діаметром шнека 96 мм було встановлено [158], що найнижче значення коефіцієнта неоднорідності при змішуванні трьохкомпонентної суміші сільськогосподарських матеріалів становило 7,32 % (при частоті обертання шнека 250 об/хв. і кожуха 100 об/хв.), а при змішуванні двохкомпонентної суміші становило 6,4 % (при частоті обертання шнека 250 об/хв. і кожуха 100 об/хв.).

Конструктивні параметри інших гвинтових змішувачів для отримання ідентичної неоднорідності сумішей можна встановити лише наближено. Так, в роботі [21] було встановлено, що неоднорідність двохкомпонентної суміші сільськогосподарських матеріалів отримана з допомогою жорсткого гвинтового транспортера-змішувача з робочою довжиною зони змішування і переміщення суміші – 1,97 м, коливається в межах 10,5 ... 15,1 % в залежності від частоти обертання шнека в межах 56,8 ... 227,2 об/хв. Тому, для досягнення якості суміші аналогічної, до якості отриманої в результаті її змішування гвинтовим конвеєром-змішувачем з обертовим кожухом, процес її перелопачування повинен бути мінімум в тричі тривалішим, що відповідно відобразиться у габаритних розмірах (робочій довжині зони змішування і переміщення суміші) жорсткого гвинтового транспортера-змішувача.

Також в роботі [21] було встановлено, що найнижча неоднорідність двохкомпонентної суміші сільськогосподарських матеріалів отримана з допомогою гвинтового змішувача з пересипом з робочою довжиною зони змішування і переміщення суміші – 1,97 м; кутом нахилу змішувача - 36°, при її змішуванні протягом 60 с становила 9,2 при 227,2 об/хв. обертання шнека, що є значно вищим за неоднорідність двохкомпонентної суміші отриманої при проведенні експериментальних досліджень гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом. Для покращення результату і наближення до якості суміші, отриманої в результаті її змішування гвинтовим конвеєром-змішувачем з обертовим кожухом, тривалість процесу змішування у гвинтовому змішувачі з пересипом повинна складати до 300 с.

При виборі гвинтових змішувачів слід враховані окремі фактори, які впливають на ефективність їх роботи, до яких доцільно віднести [171]:

- витрати на застосування, які включають собівартість виготовлення або ціну, витрати на експлуатацію та витрати на технічний огляд і ремонт;
- якість виконання процесу змішування;
- продуктивність виконання операції змішування;
- необхідність у додатковому засобі для переміщення змішаних матеріалів

(для гвинтових змішувачів з пересипом).

Провівши порівняльний аналіз щодо отримання приблизно однакової якості змішування різними гвинтовими засобами, було встановлено їх основні конструктивно-технологічні параметри, які відображено в таблиці 5.2 [171]. При цьому потужність приводу для усіх представлених типів гвинтових змішувачів становить 2,2 кВт, а частота обертання приводу - 1500 об/хв., що дозволить з допомогою пасової передачі та шківів відповідних діаметрів отримати вихідну частоту обертання шнека 250 об/хв.

Таблиця 5.2

Основні конструктивно-технологічні параметри гвинтових змішувачів з умови отримання певної якості змішування

№	Тип гвинтового змішувача	Час виконання процесу, с	Робоча (загальна) довжина шнека, м	Частота обертання шнека, об/хв.	Частота обертання кожуха, об/хв.	Кут нахилу шнека, град.	Зовнішній діаметр шнека, мм
1	Змішувач з обертовим кожухом	92	1,7 (2,2)	250	100	30	96
2	Жорсткий транспортер-змішувач	250	6 (6)	250	-	30	96
3	Змішувач з пересипом	300	2 (2)	250	-	30	96

Проведено укрупнений економічний підрахунок собівартості виготовлення, експлуатаційних витрат та витрат на технічний огляд і ремонт окремих гвинтових змішувачів за умови досягнення ними однакової якості змішування з використанням даних таблиці 5.2, результати якого відображено в таблиці 5.3 [171]. При проведенні розрахунків було використано методику, викладену в [172], а також прийнято вартість матеріалів з прайс-листа ПМП «Рост» на 24.01.2025 р.; годинну тарифну ставку для робітника 1-го розряду (01.01.2025 р.) - 48 грн.; тарифні коефіцієнти для робітників: для другого розряду - 1,09, для третього розряду - 1,24, для четвертого розряду - 1,35, для п'ятого розряду - 1,54; вартість електроенергії (01.01.2025 р.) - 2256,66 грн. за 1

МВт-год. без ПДВ (тариф на розподіл електроенергії «Укренерго» для побутових споживачів в Тернопільській обл.) і 686,23 грн. за 1 МВт-год. без ПДВ (тариф на передачу електроенергії «Укренерго» для побутових споживачів); термін роботи - 5 років; тривалість роботи на добу – 1 год. (враховуючи те, що гвинтові змішувачі даного типу в основному призначені для малих і середніх сільськогосподарських господарств); кількість робочих днів в році – 251, з них експлуатації – 240 днів.

Таблиця 5.3

Укрупнені витрати на застосування гвинтових змішувачів з умови досягнення ними однакової якості змішування

№	Тип гвинтового змішувача	Собівартість виготовлення, тис. грн.	Річні витрати на експлуатацію (з/п + ел. ен.), тис. грн.	Річні витрати на технічний огляд і ремонт, тис. грн.
1	Змішувач з обертовим кожухом	25,0	11,79	1,61
2	Жорсткий транспортер-змішувач	29,0	12,27	1,86
3	Змішувач з пересипом	24,0	11,77	1,54

При проведенні економічного підрахунку собівартості виготовлення враховувались додаткові витрати на виготовлення механізму пригальмовування рухомої частини кожуха та його кріплення, а також на виготовлення механізму пересипу у гвинтовому змішувачі з пересипом.

При розрахунку експлуатаційних витрат приймалось, що при роботі гвинтового змішувача буде залучений один працівник 1-го розряду. Також враховувались додаткові непродуктивні витрати на обертання кожуха у розмірі 10 % [3, 173] від використовуваної потужності електродвигуна (0,16 % використовувана потужність електродвигуна шнека стнда гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом при швидкості його обертання 250 об/хв. від зазначеної потужності приводу 2,2 кВт [173]), а для жорсткого транспортера-змішувача вони становили 0,52 % від зазначеної потужності

приводу 2,2 кВт, за рахунок значної довжини кожуха.

В табл. 5.4 наведено укрупнені витрати на змішування 1 тонни суміші при застосуванні наведених типів гвинтових змішувачів [171]. Для визначення продуктивності процесу враховувались результати попередніх досліджень, викладених у працях [4, 5, 117, 158] та інших. Так, середня продуктивність гвинтового змішувача з обертовим кожухом і жорсткого транспортера-змішувача становить 3,5 т/год. при зазначених конструктивно-технологічних параметрах (табл. 5.2), а гвинтового змішувача з пересипом – 0,97 т/год. (з врахуванням часу на розвантаження після кожного циклу).

Таблиця 5.4

Укрупнені витрати на змішування 1 тонни суміші при застосуванні гвинтових змішувачів

№	Тип гвинтового змішувача	Витрати на виготовлення, грн.	Витрати на експлуатацію, грн.	Витрати на технічний огляд і ремонт, грн.	Разом витрат, грн.
1	Змішувач з обертовим кожухом	5,95	14,04	1,92	21,91
2	Жорсткий транспортер-змішувач	6,91	14,68	2,21	23,8
3	Змішувач з пересипом	19,4	49,04	6,22	74,66

Можна зробити висновок, що найнижчі витрати на змішування при застосуванні гвинтових змішувачів належать гвинтовому змішувачу з обертовим кожухом.

При виборі гвинтових змішувачів слід враховувати фактори, зазначені вище. У нашому випадку можна скористатись формулою вибору [152, 153], яка включатиме сукупні витрати на змішування 1 тонни суміші при досягненні однакової якості змішування аналізованого і базового представника гвинтового змішувача (у якості базового представника приймемо гвинтовий жорсткий транспортер-змішувач) та кількості функціональних характеристик

аналізованого і базового представника гвинтового змішувача (до них віднесемо дві функціональні характеристики: змішування і переміщення) [171]:

$$A_{ГЗ} = \frac{\frac{3B_m}{3B_n} \cdot k_{ваз1} + \frac{N_{нк}}{N_{бн}} \cdot k_{ваз2}}{k_{ваз1} + k_{ваз2}}, \quad (5.2)$$

де $3B_m$ і $3B_n$ – відповідно загальна вартість базового і аналізованого представника гвинтового змішувача (включає витрати на виготовлення чи купівлю, експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування і ремонт), грн.; $k_{ваз1}$, $k_{ваз2}$ – відповідно ваги показників загальної вартості та кількості функціональних характеристик, які враховують їх важливість і пріоритетність ($k_{ваз} = 0,01 \dots 1$).

Результати розрахунку ефективності наведених типів гвинтових змішувачів (при $k_{ваз1} = 0,75$ і $k_{ваз2} = 0,25$) наступні: гвинтовий змішувач з обертовим кожухом – 1,06; гвинтовий жорсткий транспортер-змішувач (базовий представник) – 1,0; гвинтовий змішувач з пересипом - 0,36.

Аналізуючи вище виконані розрахунки можна зробити наступні висновки [171]:

1. Встановлено, що укрупнені витрати на змішування 1 тонни суміші при застосуванні гвинтовим змішувачем з обертовим кожухом становлять 21,91 грн., гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем – 23,8 грн., а гвинтовим змішувачем з пересипом - 74,66 грн.

2. Гвинтовий змішувач з обертовим кожухом є найбільш ефективний і може забезпечувати отримання найнижчої неоднорідності суміші за найнижчих витрат. Витрати на змішування суміші при його застосуванні є в 1,09 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем і в 3,41 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим змішувачем з пересипом.

3. Для досягнення якості суміші гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем аналогічної, до якості отриманої в результаті її змішування

гвинтовим конвеєром-змішувачем з обертовим кожухом, процес її перелопачування повинен бути мінімум в тричі тривалішим, що відповідно відображається у його габаритних розмірах (робочій довжині зони змішування і переміщення суміші). При використанні шнекових змішувачів з пересипом існують підвищені витрати на експлуатацію, враховуючи значну кількість циклів для перелопачування суміші, а також часто є неможливим переміщення суміші в потрібному напрямку і потреба у додатковому транспортері.

Про ефективність використання розроблених гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та шнеків для змішування свідчать акти впроваджень (додаток Е). Так у ТОВ «Сієфджи Трейдинг» Компанії «Контінентал Фармерз Груп» (м. Тернопіль) і ФГ «КРОК ВПЕРЕД 2019» (Терн. обл., с. Трибухівці) підтверджено ефективність виконання технологічного процесу змішування сумішей із застосуванням гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, розроблених на основі патентів України № 154380 і № 154547. Конструкції шнеків для змішування з механічним кріпленням елементів, які виготовлені на основі патентів України № 153687 і № 153774, використовувались при виготовленні змішувальних апаратів у ФГ «ДАРИ ДОЛИНИ» (Терн. обл., смт. Гусятин) і ПП «Хлопівецьке» (Терн. обл., м. Копичинці). Економічний ефект від впровадження і використання технічних засобів, розроблених на основі зазначених патентів, склав 534000 грн.

5.4. Висновки

1. Проведено структурно-схемний синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу й отримано ефективні конструктивні рішення гвинтових робочих органів змішувачів з можливістю підбору необхідної величини зазору між лопатями гвинтового робочого органу для інтенсифікації процесу змішування матеріалів різних фракцій, на які отримано патенти України, а також конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом без примусового

обертання кожуха з можливістю пригальмовування і з примусовим обертанням кожуха з можливістю зміни довжини траси змішування і переміщення матеріалів, на які отримано патенти України. Розроблені конструкції можуть забезпечувати значно вищі показники продуктивності та ефективності виконання технологічного процесу змішування гвинтовими конвеєрами-змішувачами, а також володіти розширеними функціональними характеристиками.

2. Обґрунтовано методику проектування гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та їх робочих органів і визначено, що при проектуванні ГКЗОК слід враховувати найважливіші фактори, такі, як: загальна вартість, продуктивність, ефективність технологічного процесу змішування та кількість функціональних характеристик. Розроблено залежність, за якою проводиться кінцевий відбір синтезованих конструктивних рішень ГКЗОК шляхом максимізації очікуваного позитивного результату, що враховує вагу таких факторів, як загальна вартість, продуктивність, ефективність технологічного процесу змішування та кількість функціональних характеристик.

3. Проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності використання гвинтових змішувачів і встановлено, що укрупнені витрати на змішування 1 тонни суміші при застосуванні гвинтовим змішувачем з обертовим кожухом становлять 21,91 грн., гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем – 23,8 грн., а гвинтовим змішувачем з пересипом - 74,66 грн. Гвинтовий змішувач з обертовим кожухом є найбільш ефективний і може забезпечувати отримання найнижчої неоднорідності суміші за найнижчих витрат. Витрати на змішування суміші при його застосуванні є в 1,09 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим жорстким транспортером-змішувачем і в 3,41 рази нижчими, ніж при її змішуванні гвинтовим змішувачем з пересипом.

4. Ефективність використання розроблених гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом та шнеків для змішування підтверджено актами впроваджень. Зокрема у ТОВ «Сієфджи Трейдинг» Компанії

«Контінентал Фармерз Груп» (м. Тернопіль) і ФГ «КРОК ВПЕРЕД 2019» (Терн. обл., с. Трибухівці) підтверджено ефективність виконання технологічного процесу змішування сумішей із застосуванням гвинтових конвеєрі-змішувачів з обертовими кожухами, розроблених на основі патентів України № 154380 і № 154547. Конструкції шнеків для змішування з механічним кріпленням елементів, які виготовлені на основі патентів України № 153687 і № 153774, використовувались при виготовленні змішувальних апаратів у ФГ «ДАРИ ДОЛИНИ» (Терн. обл., смт. Гусятин) і ПП «Хлопівецьке» (Терн. обл., м. Копичинці). Економічний ефект від впровадження і використання технічних засобів, розроблених на основі зазначених патентів, склав 534000 грн.

ВИСНОВКИ

1. У дисертації шляхом виконання теоретичного та експериментального дослідження здійснено вирішення наукового завдання, яке полягає у підвищенні однорідності змішування сумішей гвинтовими транспортно-технологічними змішувачами за рахунок збільшення інтенсивності перемішування при незначних довжинах шнекової магістралі за рахунок тертя матеріалів з обертовими гвинтовим робочим органом та кожухом, шляхом розроблення і дослідження шнекових змішувачів з обертовим кожухом з регульованою подачею та вибором їх раціональних конструктивних і технологічних параметрів.

2. На основі проведеного аналізу потоку суміші в гвинтових конвеєрах змішувачах при перехідних режимах показано, що транспортування суміші проходить із осьовою та коловою швидкостями з відривом від кожуха у верхній його частині, а на дузі піднімання утворюється динамічне тіло волочіння із стаціонарним осьовим рухом. Встановлено, що основним фактором, що впливає на колове переміщення суміші є обертовий рух кожуха, а обертанням гвинта забезпечується її осьове переміщення.

3. За результатами розв'язку диференціальних рівнянь руху потоку вантажу визначено кінематичні та динамічні параметри транспортування суміші, зокрема осьові та колові складові швидкості потоку частинок суміші, а також продуктивність конвеєра-змішувача та його потужність і значення моментів приводу робочих органів. Показано, що рух динамічного тіла волочіння можна привести до руху частинки з приведеними параметрами.

4. Встановлено, що згладжувальна здатність похилого гвинтового конвеєра-змішувача оптимізується при ймовірності просипання суміші через вал $p = 0,5$ та зростає із ростом кількості комірок, тобто із збільшенням довжини конвеєра-змішувача L , зменшенням кроку гвинта T та різниці між кутовими швидкостями гвинта та кожуха $\omega_1 - \omega_2$, при раціональному значенні кутової швидкості кожуха ω_2 .

5. Представлено програму і методику проведення експериментальних досліджень лабораторного розробленого і виготовленого основі отриманих патентів України зразка шнекового конвеєра з регульованою подачею матеріалу у зоні завантаження із бункера та з наданим обертовим рухом кожуху в напрямку обертання шнека для одночасного змішування та транспортування матеріалів. Проведено статистичне оброблення результатів повнофакторних експериментів з виведенням емпіричних рівнянь регресії, що дають можливість прогнозувати потужність приводу обертання шнека, потужність приводу обертання кожуха, продуктивність шнекового змішувача та коефіцієнта неоднорідності змішування при комбінації різних сипких матеріалів від зміни трьох основних факторів: частоти обертання шнека n_1 , частоти обертання кожуха n_2 , кута нахилу α шнекового змішувача.

6. Встановлено, що при зменшенні частоти обертання шнека, збільшенні частоти обертання кожуха в іншому напрямку і кута нахилу змішувача величина коефіцієнта неоднорідності змішування трьохкомпонентної та двохкомпонентних сумішей зменшується. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,07...1,15 разів. Збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. забезпечує зменшення коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,2...1,22 рази. Зміна кута нахилу α шнека від 0 град. до 30 град. сприяє зменшенню коефіцієнта неоднорідності змішування в 1,11...1,14 рази. Загалом коефіцієнт неоднорідності змішування двохкомпонентної суміші шнековим змішувачем з обертовим кожухом є в 1,64 рази меншим ніж при змішуванні класичним гвинтовим конвеєром із спіральним шнеком в межах досліджуваних частот його обертання від 250 об/хв. до 350 об/хв.

7. Визначено, що при збільшенні частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів збільшується. Значення потужності приводу обертання

шнека при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші коливалось в межах 0,078 кВт... 0,164 кВт, а для двохкомпонентних сумішей від 0,087 кВт 0,189 кВт. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання потужності приводу обертання шнека в 1,4 рази. При цьому збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. призводить до збільшення потужності приводу обертання шнека в 1,28 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. сприяє збільшенню потужності приводу обертання шнека в 1,23 рази.

8. Встановлено, що при збільшенні частоти обертання шнека, частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні комбінації різних сипких матеріалів збільшується. Потужність приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші змінювалась від 0,017 кВт до 0,045 кВт, а для двохкомпонентних сумішей ці значення коливались в межах 0,019 кВт... 0,052 кВт. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв. призводить до зростання потужності приводу обертання кожуха в 1,16 рази. Збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. призводить до збільшення потужності приводу обертання кожуха в 2 рази, Зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. сприяє збільшенню потужності приводу обертання кожуха в 1,18 рази.

9. Визначено, що при збільшенні частоти обертання шнека, зменшенні частоти обертання кожуха і кута нахилу шнекового змішувача величина продуктивності транспортування та змішування комбінації різних сипких матеріалів шнековим змішувачем зростає. При транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші продуктивність коливалась в межах від 0,56 т/год. до 3,78 т/год., а для двохкомпонентної суміші в межах від 0,62 т/год. до 4,37 т/год. Збільшення частоти обертання шнека n_1 від 250 об/хв. до 350 об/хв.

призводить до зростання продуктивності шнекового змішувача в 1,85 рази. Збільшення частоти обертання кожуха n_2 від 100 об/хв. до 200 об/хв. призводить до зменшення продуктивності шнекового змішувача в 1,58 рази, а зміна кута нахилу α шнекового змішувача від 0 град. до 30 град. призводить до зменшення продуктивності шнекового змішувача в 1,38 рази.

10. Виконано структурний синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами за допомогою морфологічного аналізу і отримано нові конструкції гвинтових робочих органів змішувачів та конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами. Розроблені конструкції гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, шнеків для змішування та способів їх виготовлення захищені дев'ятьма патентами України на корисні моделі. У ТОВ «Сієфджи Трейдинг» Компанії «Контінентал Фармерз Груп» (м. Тернопіль) і ФГ «КРОК ВПЕРЕД 2019» (Тернопільська обл., с. Трибухівці) підтверджено ефективність виконання технологічного процесу змішування сумішей із застосуванням гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами, розроблених на основі патентів України № 154380 і № 154547. Конструкції шнеків для змішування, які виготовлені на основі патентів України № 153687 і № 153774, використовувались при виготовленні змішувальних апаратів у ФГ «ДАРИ ДОЛИНИ» (Тернопільська обл., смт. Гусятин) і ПП «Хлопівецьке» (Тернопільська обл., м. Копичинці). Економічний ефект від впровадження і використання технічних засобів, розроблених на основі зазначених патентів, склав 534000 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гевко Б. М., Данильченко М.Г., Рогатинський Р.М. Механізми з гвинтовими пристроями. Львів : Світ, 1993. 208 с.
2. Гудь В. З. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. *Журнал «Інженерія природокористування»*. Харків, 2020. Вип. № 1(15). С. 66-72.
3. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження : монографія. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
4. Рогатинський Р., Гевко І., Рогатинська Л. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно–технологічних систем. *Вісник ТНТУ*. 2013. № 1 (69). С. 116–125.
5. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
6. Гудь В. З. Механіко-технологічні основи розробки багатофункціональних секційних шнеків для зернового матеріалу: дис. ... докт. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2021. 410 с.
7. Веб-сайт. URL: <https://spetsbud.vimal.ua/> (дата звернення: 20.10.2024).
8. Веб-сайт. URL: <https://ogrant.com.ua/> (дата звернення: 20.10.2024).
9. KWS. Screw Conveyors Engineering Guide. Conveying Knowledge, Workmanship, Solutions. Release Date 4.1.16. 2015. 72 p.
10. Веб-сайт. URL: <https://technik.ua/> (дата звернення: 25.10.2024).
11. Веб-сайт. URL: <https://service-pack.kiev.ua/> (дата звернення: 25.10.2024).

12. Швидкісний двовальний гвинтовий конвеєр: пат. 52567. Україна: МПК В65G 33/08. № u201003998. заявл. 06.04.10; опубл. 25.08.10, Бюл. №16. 5 с.
13. Веб-сайт. URL: <https://www.ukrsintgas.net/snd/> (дата звернення: 27.10.2024).
14. Веб-сайт. URL: <https://ua.tksservis.com/smesiteli-shnekovye-modeli-shs-200/> (дата звернення: 27.10.2024).
15. Веб-сайт. URL: <https://vodrem.com.ua/> (дата звернення: 28.10.2024).
16. Веб-сайт. URL: <https://greens-sumy.prom.ua/ua/g29698786-smesiteli-vertikalnye-dlya> (дата звернення: 28.10.2024).
17. Вертикальний гвинтовий змішувач-транспортер: пат. 63392. Україна: МПК В65G 33/00. № u201102469. заявл.02.03.11; опубл.10.10.11, Бюл. №19. 2 с.
18. Веб-сайт. URL: <https://demi-mix.com.ua/> (дата звернення: 28.10.2024).
19. Веб-сайт. URL: <http://silence.ua/oborudovanie/hlebopekarskoe-i-konditerskoe/smesiteli-sypuchih-i-pastoobraznyh-produktov/> (дата звернення: 28.10.2024).
20. Веб-сайт. URL: <https://ribbonblender.en.made-in-china.com/> (дата звернення: 29.10.2024).
21. Гевко І. Б. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : дис. ... доктора техн. наук: 05.02.02. Львів, 2013. 439 с.
22. Змішувач гвинтовий з пересипом: пат. 34056. Україна: МПК В01F 7/00. № u200802639. заявл. 29.02.08; опубл. 25.07.08, Бюл. № 14. 3 с.
23. Змішувач гвинтовий з замкнутим циклом роботи: пат. 34406. Україна: МПК В01F 7/00. № u200803172. заявл. 12.03.08; опубл. 11.08.08, Бюл. №15.-2с.
24. Гвинтовий змішувач-транспортер зі спареними шнеками: пат. 78323. Україна: МПК F16D 7/06. № u201211801. заявл. 12.10.12р.; опубл. 11.03.13, Бюл. №5. 4 с.

25. Гвинтовий транспортер-змішувач з циклічним зміщенням спіралі : пат. 79516. Україна: МПК В65G 33/16. № u201212039. заявл. 19.10.12; опубл. 25.04.13, Бюл. №8. 4 с.

26. Змішувач сипких матеріалів циклічної дії: пат. 80789. Україна: МПК В01F 7/08; В65G 33/00. №u201212039. заявл. 24.10.12; опубл. 10.06.13, Бюл. №11.2 с.

27. Гвинтовий змішувач сипких матеріалів зі спареними шнеками: пат. 80790. Україна: МПК В01F 7/08; В01F 7/02; В65G 33/16. №u201214772. заявл. 24.10.12; опубл. 10.06.13, Бюл. № 11. 2 с.

28. Дідух В.Ф., Бабарика С.Ф., Заїкін М.М., Гевко І.Б. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу поверхневого внесення сапропелів в ґрунт. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. «Вдосконалення технологій і обладнання виробництва продукції тваринництва і птахівництва»*. Харків, 2009. Вип. №78. С. 76-83.

29. Пилипець М., Бабарика С., Гевко І. Обґрунтування параметрів гвинтових роторних робочих органів розкидачів сапропелів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2008. Том 13., № 3. С. 104-108.

30. Гевко І.Б., Бабарика С.Ф. Дослідження технологічності процесу розкидання органічних добрив вертикальними шнеками. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. «Механізація сільськогосподарського виробництва»*. 2008. Вип. № 75, Том 2. С. 142-148.

31. Гевко І., Бабарика С., Вовк Ю., Влас Н. Техніко-економічна ефективність модернізованої машини для внесення твердих органічних добрив з вертикальними гвинтовими робочими органами. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2010. Том 15. №3. С. 90-94.

32. 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.

33. Romanovsky R.M., Baranovsky V.M., Nevko R.B., Dzyura V.O., Klendii O.M., Klendii M.B. Justification of rational parameters of a pneumoconveyor screw feeder. *INMATEH: Agricultural engineering*. Bucharest/Romania, 2018. vol. 54. no. 1. P. 15-24.

34. Барановський В. М. Механіко-технологічні основи розробки адаптованих коренезбиральних машин : автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.05.11. Тернопіль, 2013. 44 с.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. Ревенко І.І., Брагінець М.В., Ребенко В.І. Машини та обладнання для тваринництва: підручник. Київ: Кондор, 2009. 731 с.

39. Васильків В. В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: автореф. дис. ... д-ра техніч. наук: 05.02.08. Львів, 2015. 48 с.

40. Васильків В. В., Радик Д. Л., Гевко І. Б. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату. *Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»): «Наукові нотатки»*. ЛДТУ, 2004. Вип. 14. С. 12–18.

41. Гевко Б. М., Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л. Технологічні основи формотворення різнопрофільних гвинтових заготовок. Тернопіль: Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 457 с. ISBN966-305-014-4.

42. Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л., Пилипець О. М. Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. *Перспективні технології та прилади*. 2021. Вип. 18. С. 112–123.

43. Diachun A., Vasytkiv V., Korol O., Myhailiuk V., Golovaty I., Kuras A. Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2021. Vol. 101. No. 1. P. 68–78. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.01.068.

44. Vasytkiv V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*. Tern.: TNTU, 2021. Vol. 104. No. 4. P. 33–43. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033

45. Васильків В.В., Гевко І.Б., Бабарика С.Ф. Синтез нових конструкцій гвинтових робочих органів машин внесення твердих органічних добрив. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. Дніпропетровськ, 2009. №2. С. 170-173.

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

47. Гевко І.Б., Вітровий А.О., Гурик О.Я. Динамічна модель процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром. *Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей*. Луцьк, 2001. Вип. 8. С. 72-82.

48. Пилипець М.І., Гевко І.Б., Вітровий А.О. Оптимізація робочого органу з секційними елементами для гнучких гвинтових конвеєрів. *Збірник наукових статей "Сільськогосподарські машини"*. ЛДТУ, Луцьк, 1999. Вип. 5, С. 207-217.

49. Гевко Р. Б., Вітровий А. О., Пік А. І. Підвищення технічного рівня гнучких гвинтових конвеєрів. Тернопіль, 2012. 204 с.
50. Гевко Б. М., Рогатынский Р. М. Гвинтові подаючі механізми сільськогосподарських машин. Львів : Вища школа, 1989. 176 с.
51. Гевко Б. М., Гевко І. Б., Радик Д. Л. Технологія сільськогосподарського машинобудування: навч. посіб. К. : Кондор, 2006. 496 с.
52. Гевко Б.М., Мельничук А.Л., Шуст І.М. Дослідження технологічного процесу транспортування сипких матеріалів широко-універсальним шнековим транспортером. *Вісник ТНТУ*. 2015. Том 79. № 3. С. 143–148.
53. Hewko B.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., Lyashuk O.L., Liubachivskyi 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.
54. 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. Збірник наукових статей*. Луцьк, 2013. Вип. 26. С. 3-12.
55. Гевко І. Б., Гурик О. Я. Визначення динамічних навантажень у гвинтовому змішувачі. *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2002. № 442. С. 90–93.
56. Гевко І. Б., Капаціла Ю. Б., Левенець В. Д. Змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами. *Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»): «Наукові нотатки»*. ЛДТУ. 2002. Вип. 11. С. 75–81.
57. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
58. Гевко І., Дячун А. , Любачівський Р. Структурний синтез гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями методом

морфологічного аналізу. *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. 2012. Вип. 128/2012. С. 37–41.

59. Гевко Ів. Б., Гудь В. З. Синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник»*. Кропивницький, 2019. Вип. №2(33). С. 25-33.

60. 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.

61. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Пік А.І., Марчук Н.М., Маруніч О.П. Синтез гвинтових транспортерів-змішувачів. *Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей*. Луцьк, 2020. Вип. 45. С. 35-44.

62. Hevko I., Pik A., Komar R., Stibaylo O., Koval' S. Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2024. Vol. 113, no 1, P. 5–15.

63. Гевко І.Б., Лещук Р.Я., Брикса А.О., Стібайло О.Ю., Коваль С.О. Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39). ч. 2. С. 24-34.

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

65. 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.

66. 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). P. 73–82.

67. 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.

68. 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/Romania, 2016. Vol. 48. No. 1. P. 35-42.

69. 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.

70. Гевко Ів. Б., Дячун А. Є., Тарасюк Ю. М. Результати експериментальних досліджень якості змішування кормових сумішей гвинтовим транспортером-змішувачем. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. Житомир, 2014. № 2 (45), Т. 4, Ч. 1. С. 308-315.

71. Гевко Ів., Дячун А., Любачівський Р. Розширення технологічних можливостей гвинтових конвеєрів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2012. № 3(67). С. 143–150.

72. 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.

73. Гевко Р.Б., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Залуцький С. З., Станько А. І., Довбуш Т. А. Гвинтові конвеєри з еластичними поверхнями. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. 239 с.

74. Гевко Р. Б., Залуцький С. З. Розробка конструкції шнека з еластичною гвинтовою поверхнею та результати її експериментальних досліджень. *Вісник інженерної академії України*. Київ : ІАУ. С. 241-246.

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. 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.

79. 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.

80. Грицай Ю. В. Обґрунтування параметрів комбінованого шнекового транспортера-подрібнювача коренеплодів. автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2020. 23 с.

81. Grytsay Yu. Analysis of technological processes and structural features of screw conveyors. *Scientific journal innovative solutions in modern science*. Dubai. 2018. № 2 (21). P. 17 – 32.

82. 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.

83. Грудовий Р.С. Обґрунтування конструкцій і параметрів робочих органів шнекових транспортерів зерна: дис...канд. тех. наук: 05.05.11. Вінниця, 2013. 157 с.

84. Грудовий Р. С. Нові типи гвинтових механізмів з покращеними експлуатаційними характеристиками. *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький : ХНУ, 2013. Вип. 1. (197). С. 24 – 27.

85. 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 is a bulk environment caused by external periodic forces. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. No 60(1). P. 29–39.

86. Hud V., Hevko I., Lyashuk O., Hevko O., Sokil M., Shust I. Research of resonance vibrations of the system “Telescopic screw is a bulk medium” caused by torsional vibrations. Karaganda, 2020. № 2 (98). P. 119-126.

87. Hud V., Lyashuk O., Hevko I., Ungureanu N., Vlăduț N.-V., Stashkiv M., Hevko O., Pik A.. Enhancement of Agricultural Materials Separation Efficiency Using a Multi-Purpose Screw Conveyor-Separator. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, № 4. P. 870-880.

88. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В., Гудь В.З., Дмитрів О.Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. *Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей*. Луцьк, 2020. Вип. 45. С. 84-93.

89. Гудь В. З. Резонансні коливання процесу транспортування зернової суміші гвинтовим шнеком із сепарацією. *Міжнародна науково-практична конференція «Підвищення надійності машин і обладнання»*. Кропивницький, 2020. С. 144-147.

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

91. Гурик О. Я., Гевко І. Б., Драган А. П. До питання моделювання геометрії робочих органів гвинтових змішувачів. *Вісник ТДТУ*. 2002. Т. 7, № 4. С. 54–60.

92. Гурик О. Я., Гевко І. Б., Солтисюк В. І. До питання змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка: «Механізація сільськогосподарського виробництва»*. 2010. Т. 1, № 93. С. 132–137.

93. Дмитрів Д. В. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів малогабаритних кормозмішувачів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль, 2001. 179 с.
94. Дмитрів Д. Оптимізація конструктивних параметрів робочих органів кормозмішувачів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2003. Т.8, №4. С. 37-43.
95. 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.
96. 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.
97. Diachun A., Nevko I., Lyashuk O, Stanko A., Pik A.I., Omelyanskyi Y. Study of fiber deformation of elastic brush-like screws during grain material transportation. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 72, № 1. P. 579-588.
98. Diachun A., Nevko 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.
99. Залуцький С.З. Обґрунтування параметрів шнеків з робочою еластичною поверхнею для транспортування сільськогосподарських матеріалів: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05. Тернопіль, 2018. 197 с.
100. 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.
101. Іванченко Ф. К. Підйомно-транспортні машини. К. : Вища школа, 1993. 412 с.

102. Капаціла Ю. Б. Розробка і дослідження технологічних процесів багатофункціональних агрегатів для кормовиробництва : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 Луцк, 1999. 18 с.

103. Куликівський В. Л. Розробка гвинтових транспортерів з підвищеним ресурсом для зерноочисних машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 Вінниця, 2012. 20 с.

104. Лещук Р. Я. Обґрунтування конструктивно-силових параметрів секційних робочих органів гвинтових перевантажувальних механізмів : дис. ... канд. техн. наук. : 05.02.02. Тернопіль, 2004. 166 с.

105. Лещук Р., Гевко І., Комар Р. Результати експериментальних досліджень гвинтових перевантажувальних механізмів. *Вісник ТДТУ*. Тернопіль, 2003. Том 8. № 4. С. 56-61.

106. 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.

107. Ловейкін В. С., Рогатинська О. Р. Оптимізація режимів роботи гвинтових конвеєрів. *Підйомно-транспортна техніка*. К., 2004. № 2. С. 8-15.

108. Lyashuk O. L., Nevko I. B., Hud V. Z., Tkachenko I. G., Nevko 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.

109. Lyashuk O., Rohatynskyi R., Nevko 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.

110. 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.

111. Клендій М. В. Обґрунтування параметрів перевантажувального патрубку гвинтового конвеєра : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.05. Тернопіль, ТДТУ. 2007. 137 с.

112. Паньків В.Р. Обґрунтування параметрів гвинтового конвеєра з комбінованим робочим органом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.05 Тернопіль, 2018. 24 с.

113. 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.

114. Пилипець М. І. Розробка і дослідження гнучких гвинтових конвеєрів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.04. Тернопіль, 1993. 23 с.

115. 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.

116. Рогатинська О. Р. Обґрунтування параметрів навантаження і конструкцій гвинтових конвеєрів : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05. Тернопіль, 2006. 167 с.

117. Rogatynskiy R., Nevko 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.

118. Rohatynskiy R. M., Nevko 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.

119. Rohatynskiy 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.

120. Rohatynskyi 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.

121. 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.

122. 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.

123. 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.

124. Рогатинський Р., Гевко І. Модель конструювання і вибору гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями. *Вісник ТНТУ*. 2012. № 3 (67). С.197–210.

125. 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.

126. 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.

127. Станько А.І. Обґрунтування параметрів шнекових механізмів з еластичними змінними поверхнями для транспортування насінневих зернових матеріалів: дис. ... докт. філософії : 133.- Тернопіль, 2023. 207 с.

128. Дерев'янюк Д.А. Механіко-технологічне обґрунтування процесів зниження травмування насіння зернових культур технічними засобами : дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Тернопіль, 2018. 416 с.

129. Братішко В. В. Механіко-технологічні основи приготування повнорационних комбікормів гвинтовими грануляторами : автореф. дис. ... докт. технічних наук : 05.05.11. Глеваха, 2017. 43 с.
130. Маруніч О.П. Обґрунтування параметрів багатофункціонального гвинтового конвеєра для транспортування та змішування сипких матеріалів: дис. ... докт. філософії : 133 . Тернопіль, 2023. 222 с.
131. Васильків В. Структура геометричного моделювання об'єктів в уніфікаційному синтезі. *Праці 9-го Міжнародного симпозиуму українських інженерів – механіків у Львові*. Львів, 2009. С. 158-160.
132. Душинський В. В. Основи наукових досліджень. Теорія та практикум з програмним забезпеченням: навчальний посібник. К. : НТУУ «КПІ», 1998. 408 с.
133. Кіндрацький Б. І. Концепція і алгоритм багатокритеріального структурно-параметричного синтезу машинобудівних конструкцій. *Вісник ТДТУ*. 2003. Т. 8. № 1. С. 73–82.
134. Кіндрацький Б. І., Сулим Г. Т. Рациональне проектування машинобудівних конструкцій. Львів : КІНПАТРІ ЛТД, 2003. 280 с.
135. Кузнецов Ю. М., Склярів Р. А. Прогнозування розвитку технічних систем. К. : ТОВ «ЗМОК». ПП «ГНОЗІС», 2004. 323 с.
136. Кузнецов Ю. М. Патентознавство та авторське право. 2-е видання, перероблене і доповнене. К.: ТОВ «Кондор», 2009. 446 с.
137. Finan J.S., Hurley W.J. Transitive calibration of the ANP verbal scale. *European Journal of Operational Research*. 1999. V112.
138. Wong F., Yong Tan P. Neural Networks And Genetic Algorithm For Economic Forecasting. *AI in economics and business administration*. Institute of systems Science, National University of Singapore, 1999.
139. Гевко І.Б., Гевко Б. М. Управління процесом розробки і освоєння виробництва нових виробів: підручник..Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2015. 199 с.

140. Nevko I., Diachun A., Dmytriv O., Koval S., Leskiv P., Okhivskyi R. Research of horizontal screw conveyors-mixers with rotating casing. *Scientific Journal of TNTU*. Tern.: TNTU, 2024. Vol 115. No 3. P. 130–141.

141. Ляшук О.Л., Рогатинська О.Р., Пелешок Т.М., Любачівський Р.О.. Дослідження процесу транспортування сипкого вантажу похилими гвинтовими конвеєрами. *Вісник ТНТУ*. Т. : ТНТУ, 2015. Том 79. № 3. С. 137-143.

142. Гевко І., Дячун А., Дмитрів О., Коваль С. Моделювання роботи похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Збірник тез доповідей XXV міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвяченій 124-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 95-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України (Київ, 17–19 жовтня, 2024)*. Київ, 2024. С. 130-133.

143. Hewko B.M., Popovich P.V., Diachun A.Y., Lyashuk O.L., Liubachivskyi 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.

144. Hu G., Chen J., Jian B., Wan H., Liu L. Modeling and simulation of transportation system of screw conveyors by the discrete element method. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE2010*. 2010. 5536244. P. 927-930.

145. Дячун А.Є., Дмитрів О.Р., Гевко Б.Р., Коваль С.О., Цапик Р.П. Експериментальна автоматизована установка гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для змішування сипких матеріалів. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2024. Вип. 24. С.38-44.

146. Дячун А. Є., Ляшук О. Л., Котик Р. М., Михайлюк В. П., Гандзій В. С. Дослідження кінематики сипкого матеріалу у гвинтовому конвеєрі-змішувачі із обертовим кожухом та гофрованим шнеком. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, «Механізація сільськогосподарського виробництва»*. 2019. Вип. 198. С. 233-243.

147. Гевко І., Коваль С. Моделювання процесу змішування похилими гвинтовими конвеєрами-змішувачами з обертовим кожухом. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвяченої 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя* (Тернопіль, 28-29 травня 2025). Тернопіль, 2025. С. 127.

148. Крот О. П., Ровенський О. І. Ланцюги Маркова при моделюванні змішування компонентів у барабанній печі при спалюванні муніципальних відходів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 170. С. 48-60.

149. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дмитрів Д. В. Моделювання роботи малогабаритного лопатевогвинтового змішувача. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2000. Вип. 6. С. 129–135.

150. Сацюк В. В. Оцінка згладжуючої здатності змішувачів безперервної дії. *Сільськогосподарські машини*. 2016. Вип. 35. С. 88-91.

151. Алієв Е. Б. Результати чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією віброуючого решета. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2017. 6 (105). С. 97–103.

152. Коваль С.О. Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Центральноукраїнський науковий вісник*. Кропивницький, 2023. Вип. №8(39). ч. I. С. 85-94.

153. Коваль С.О. Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Збірник тез XII Міжнародної наук.-прак. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»* (Тернопіль, 6-7 грудня 2023). Тернопіль, 2023. С. 51-52.

154. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом: пат. 154380. Україна: МПК 65G 33/08 (2006.01). № u202302288. заявл. 15.05.23; опубл. 09.11.23, Бюл. № 45. 5 с.

155. Стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом: пат. 154996. Україна: МПК 65G 33/08 (2006.01). № u202302289. заявл. 15.05.23; опубл. 10.01.24, Бюл. №2. 4 с.

156. Гевко І.Б., Коваль С.О., Стібайло О.Ю., Брикса А.О., Бучинський В.М. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом. *Матеріали V Міжнародної наук.-практ. конф. «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем»* (Кропивницький, 19-21 квітня 2023). Кропивницький, 2023. С. 124-125.

157. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Гевко Б.Р., Довбуш Т.А., Коваль С.О., Стібайло О.Ю., Брикса А.О. Стенд для дослідження характеристик гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами. *Збірник тез IX Міжнародної наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в АПК»* (Луцьк, 7-8 червня 2023). Луцьк, 2023. С. 27-29.

158. Дячун А.Є., Гевко І.Б., Золотий Р.З., Коваль С.О., Дериш О.Б., Брикса А.О. Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвеєра з обертовим кожухом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький, 2024. Вип. №10(41). ч. I. С. 133-143.

159. Гевко І., Коваль С., Брикса А. Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром з обертовим кожухом. *Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»* (Тернопіль, 11-12 грудня 2024). Тернопіль, 2024. С. 137-138.

160. Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів: пат. № 153687. Україна: МПК 65G 33/16, 65G 33/26. № u202301003. заявл. 13.03.23; опубл. 10.08.23, Бюл. №32. 5 с.

161. Гвинтовий робочий орган змішувача: пат. № 153774. Україна: МПК 65G 33/16. № u202301002. заявл. 13.13.23; опубл. 24.08.23, Бюл. №34. 5 с.

162. Гевко Ів.Б., Гудь В.З., Гурик О.Я., Коваль С.О. Шнековий змішувач з регульованими отворами просипання. *Процеси, машини та обладнання*

агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. присвячена 90-річчю Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин (Тернопіль, 29–30 вересня 2022). Тернопіль, 2022. С. 48.

163. Шнек з механічним кріпленням спіралей: пат. 157050. Україна: МПК В65G 33/26, В65G 33/16. № u202400170. заявл. 11.01.24; опубл. 04.09.24, Бюл. №36. 4 с.

164. Шнек для змішування з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат.157049. Україна: МПК В65G 33/16. № u202400169. заявл. 11.01.24; опубл. 04.09.24, Бюл. №36. 5 с.

165. Шнек із змінним еластичним елементом: пат. 157149. Україна: МПК В65G 33/16. № u2024 00165. заявл. 11.01.24; опубл. 12.09.24, Бюл. №37. 5 с.

166. Коваль С.О., Стібало О.Ю. Особливості виготовлення лопатевих спіралей змішувачів. *Матеріали та програма XI Всеукраїнської наук.-техн. конф. «Сучасні технології у промисловому виробництві»* (Суми, 23-26 квітня 2024). Суми, 2024. С. 40-41.

167. Гевко І.Б., Лещук Р.Я., Брикса А.О., Стібайло О.Ю., Коваль С.О. Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39). ч. 2. С. 24-34.

168. Nevko I., Pik A., Komar R., Stibaylo O., Koval' S. Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2024. vol. 113, no 1. P. 5–15.

169. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок: пат. 157048. Україна: МПК В21Н 3/12, В21D 11/06. №u202400164. заявл. 11.01.24; опубл. 05.09.24, Бюл. №36. 5 с.

170. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок: пат. 157208. Україна: МПК В21Н 3/12, В21D 11/06. № u202400167. заявл. 11.01.24; опубл. 19.09.24, Бюл. №38. 4 с.

171. Гевко І.Б., Гупка А.Б., Коваль С.О., Брикса А.О., Бучинський В.М. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42). ч.1. С. 129-138.

172. Гевко І. Б. Економічне обґрунтування вибору транспортерів для перевантаження сипких вантажів по криволінійних траєкторіях. *Галицький економічний вісник*. Тернопіль : ТНТУ, 2014. Том 45. № 2. С. 10-16.

173. І. Гевко, А. Дячун, О. Скиба, А. Мельничук, Р. Золотий, І. Шуст. 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*. 2018. Вип. 190. С. 318–326.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1

План-матриця проведення повного факторного експерименту 3^3 для дослідження параметрів шнекового змішувача з регульованою подачею

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У			Середні значення
									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	У _{сер.}
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	У11	У12	У13	У1с
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	У21	У22	У23	У2с
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	У31	У32	У33	У3с
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	У41	У42	У43	У4с
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	У51	У52	У53	У5с
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	У61	У62	У63	У6с
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	У71	У72	У73	У7с
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	У81	У82	У83	У8с
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	У91	У92	У93	У9с
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	У10	У10	У10	У10с
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	У11	У11	У11	У11с
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	У12	У12	У12	У12с
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	У13	У13	У13	У13с
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	У14	У14	У14	У14с
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	У151	У152	У153	У15с
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	У161	У162	У163	У16с
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	У171	У172	У173	У17с
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	У181	У182	У183	У18с
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	У191	У192	У193	У19с
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	У201	У202	У203	У20с
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	У211	У212	У213	У21с
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	У221	У222	У123	У22с
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	У231	У232	У233	У23с
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	У241	У242	У243	У24с
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	У251	У252	У253	У25с
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	У261	У262	У263	У26с
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	У271	У272	У273	У27с

Додаток Б

Результати експериментальних досліджень потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів

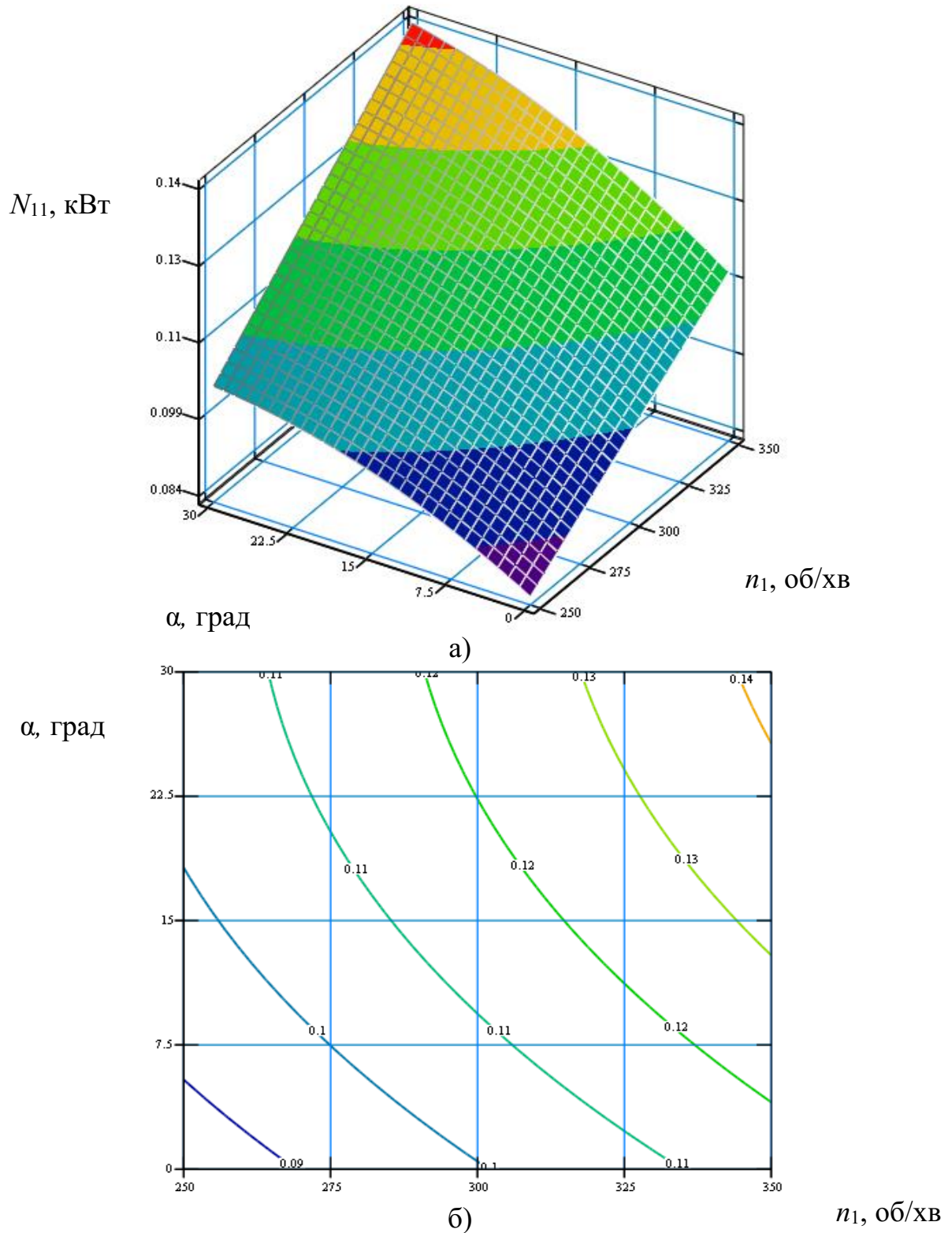
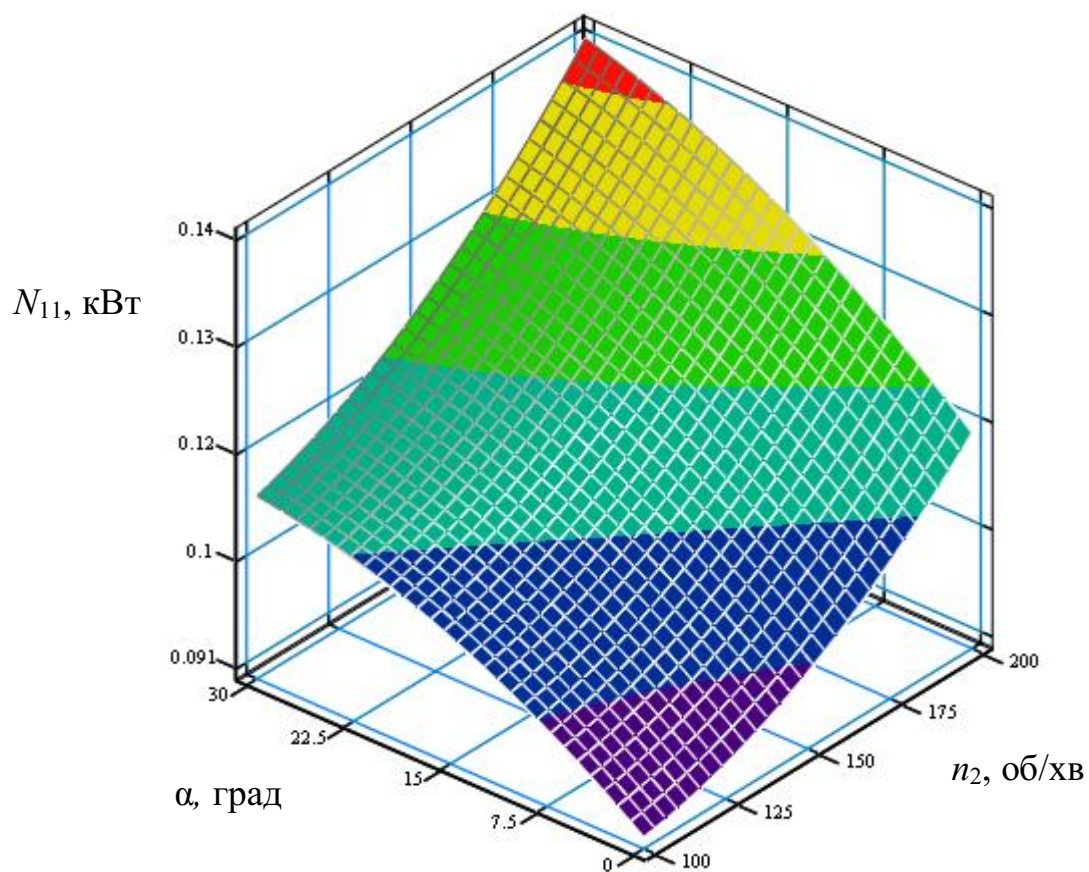
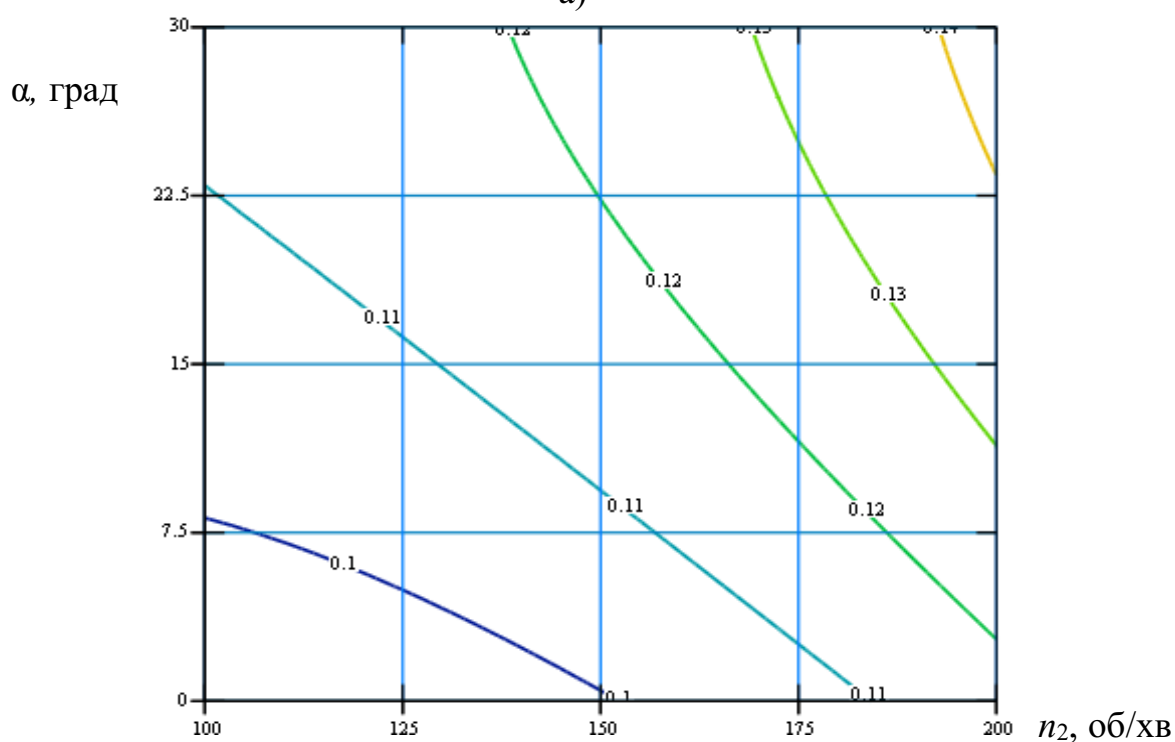


Рис. Б.1. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_2 = 150$ об/хв.)



а)



б)

Рис. Б.2. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)

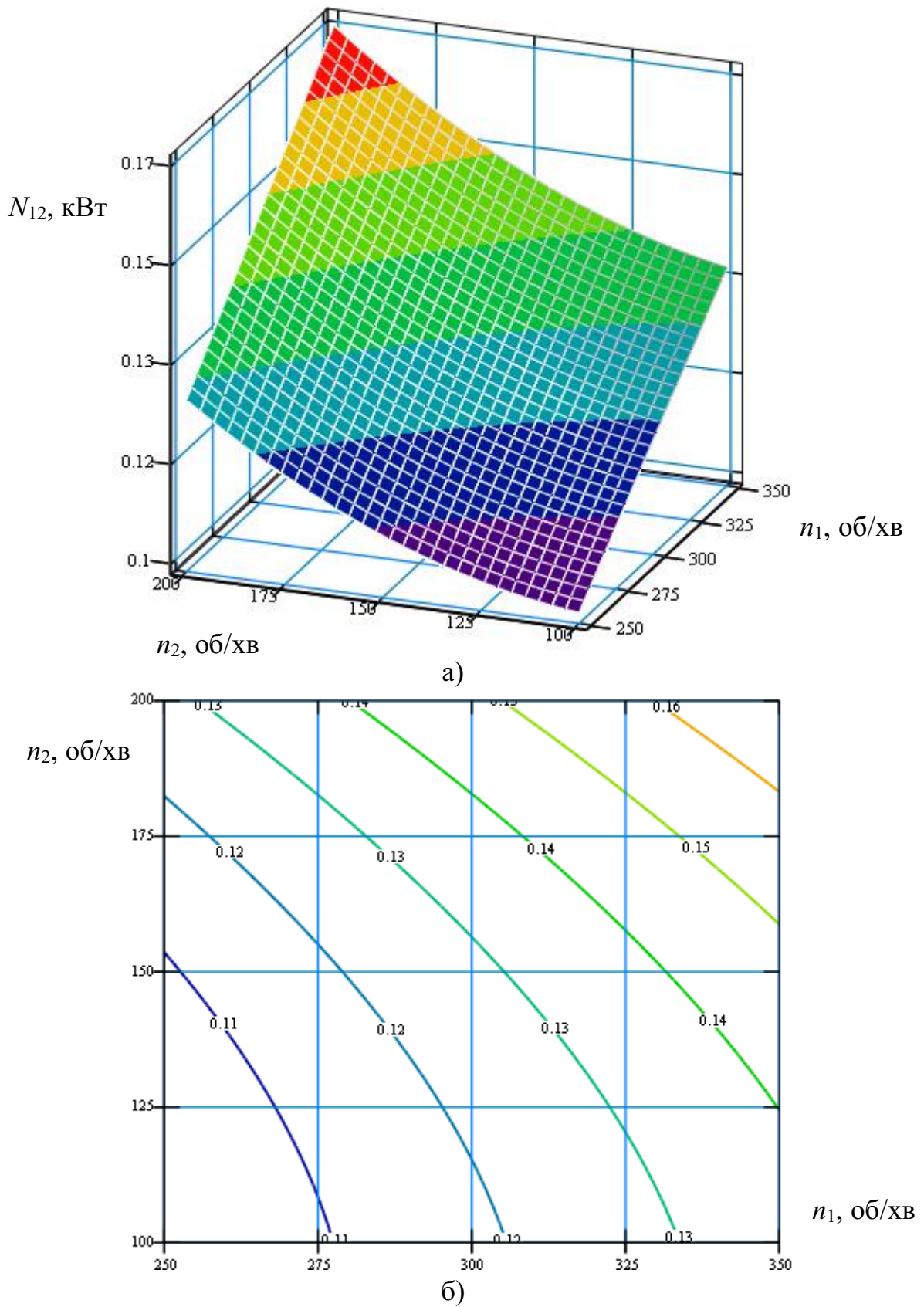


Рис. Б.3. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності привода обертання шнека при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертним кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)

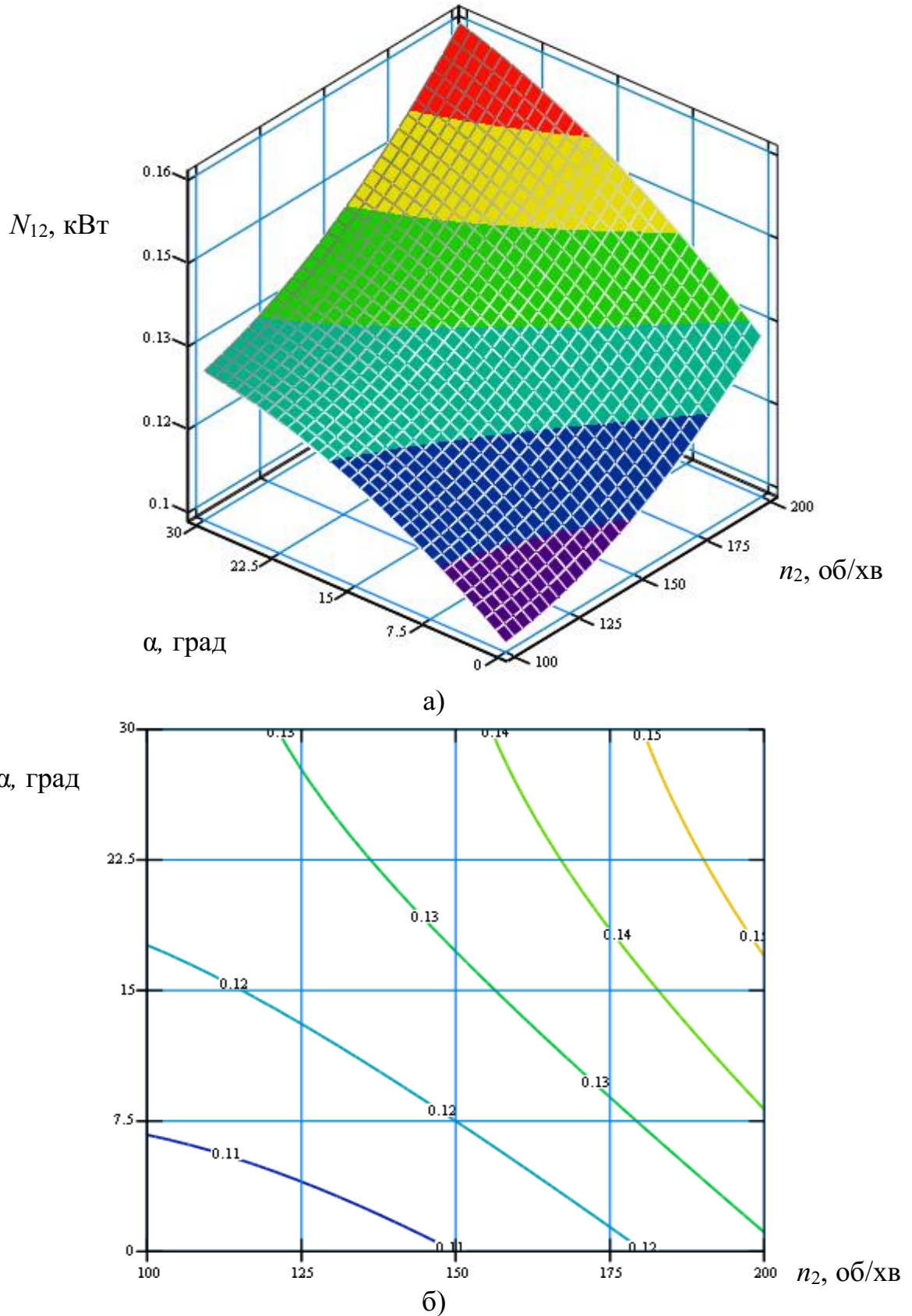


Рис. Б.4. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)

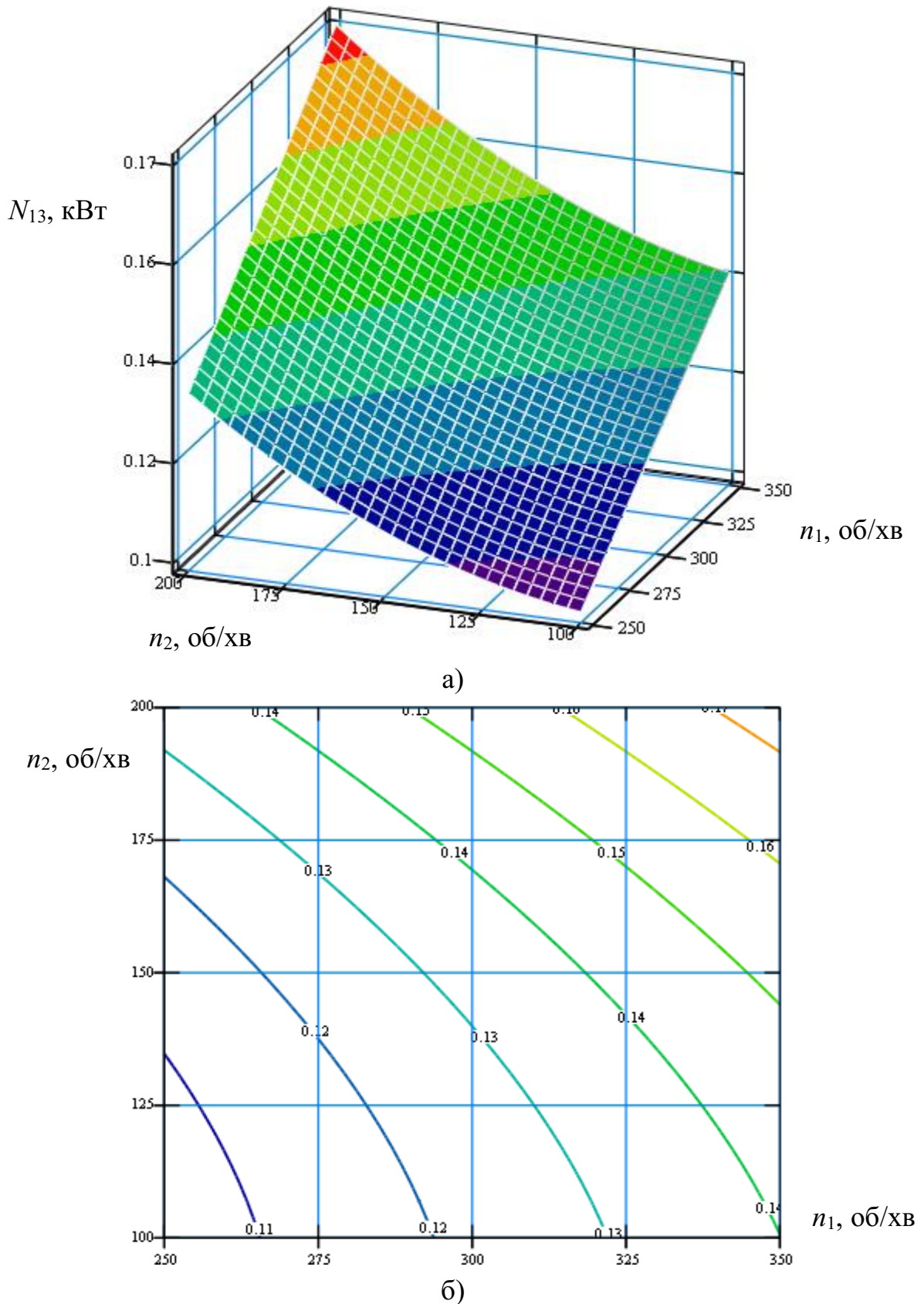


Рис. Б.5. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)

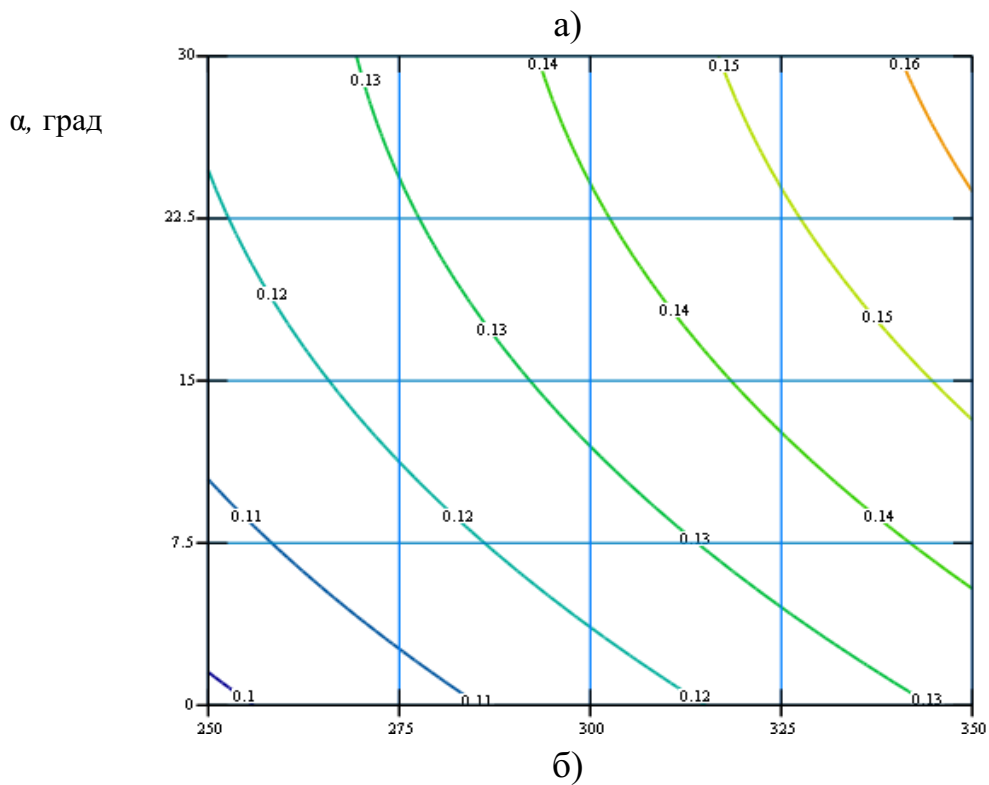
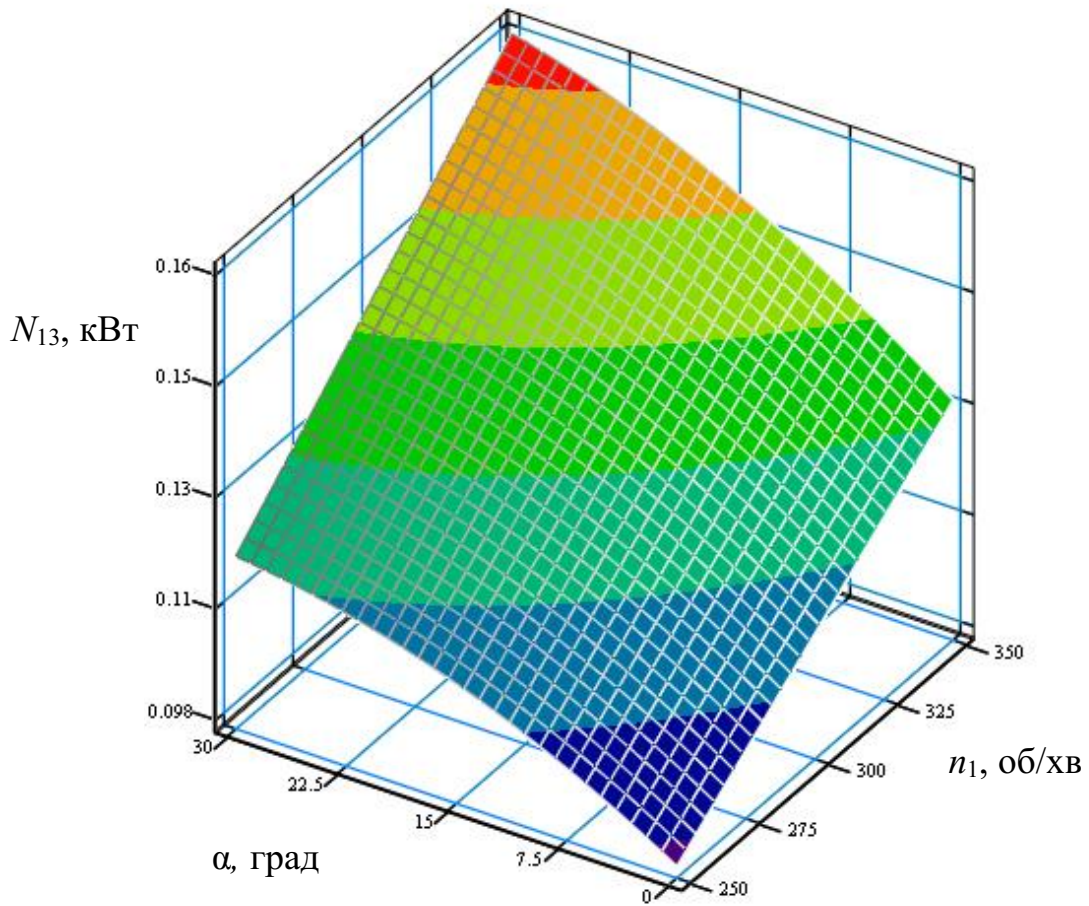


Рис. Б.6. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання шнека при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_2 = 150$ об/хв.)

Додаток В

Результати експериментальних досліджень потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні зернових матеріалів

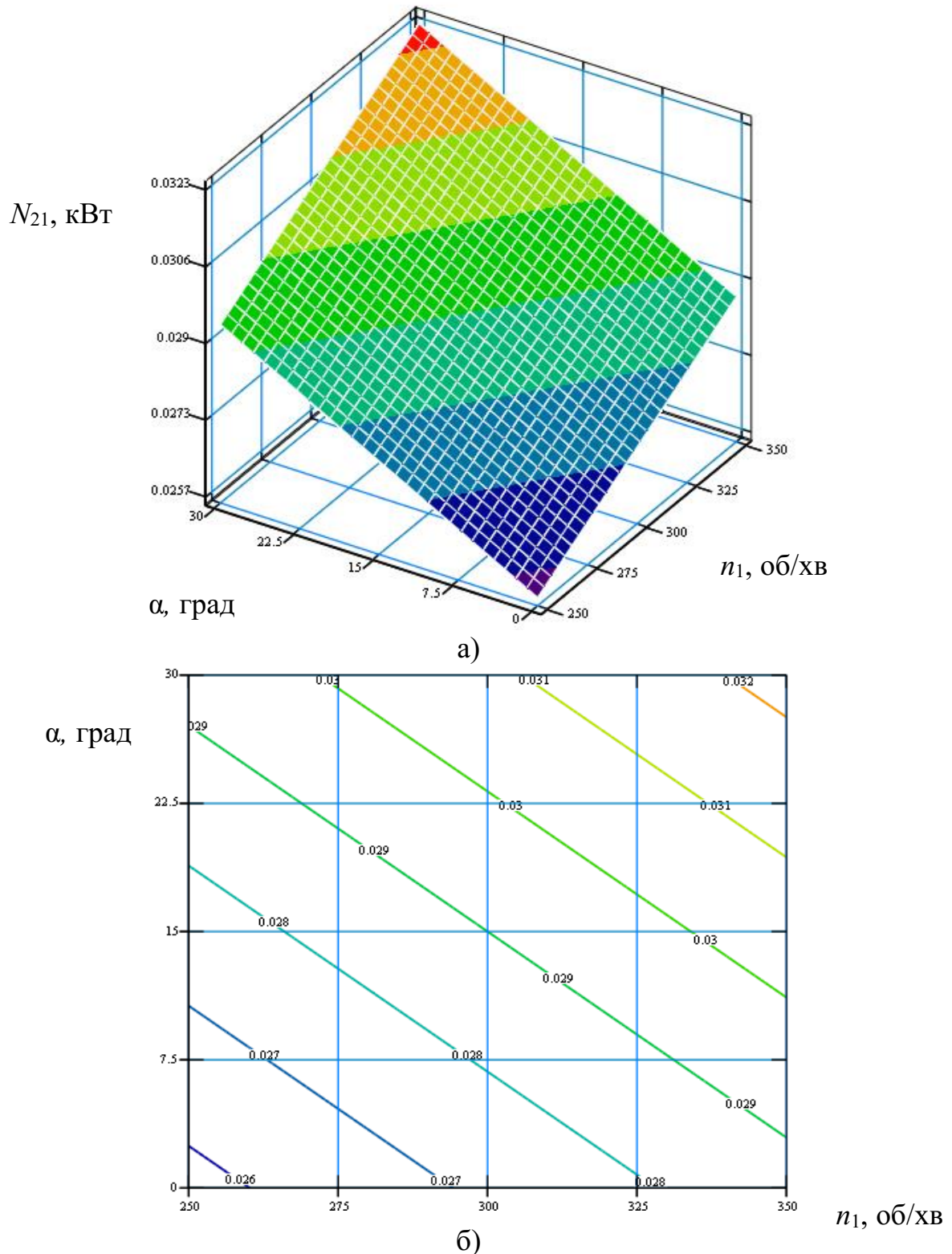


Рис. В.1. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_2 = 150$ об/хв.)

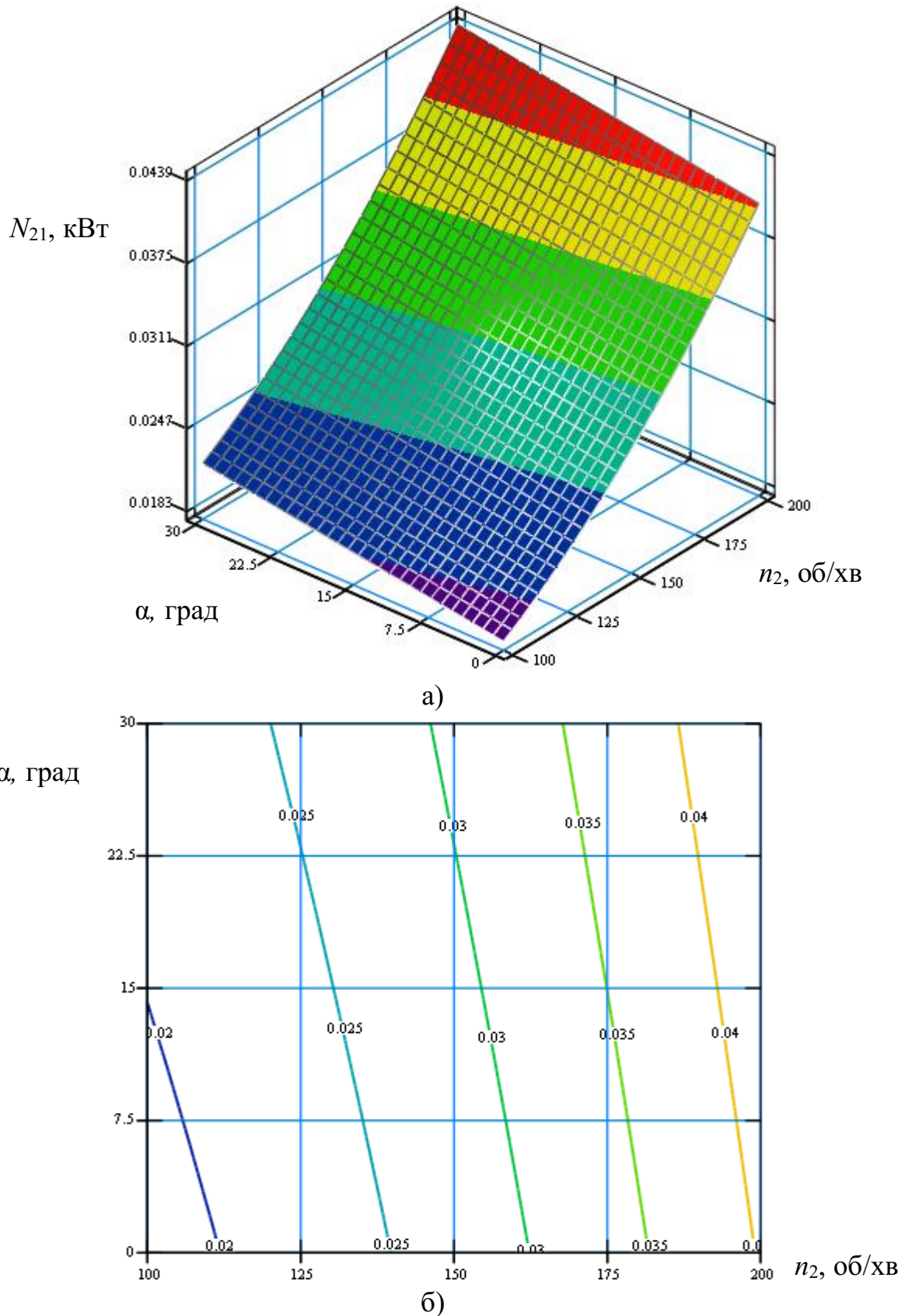
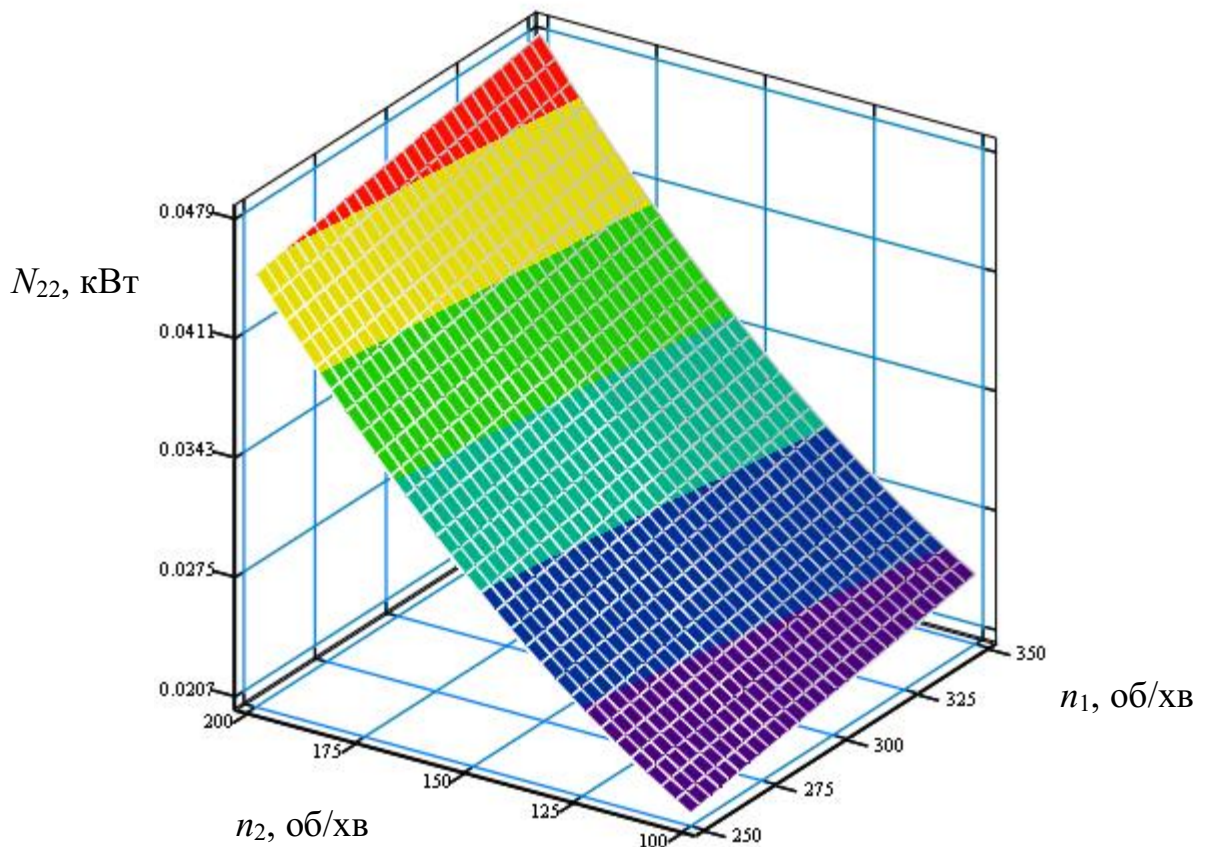
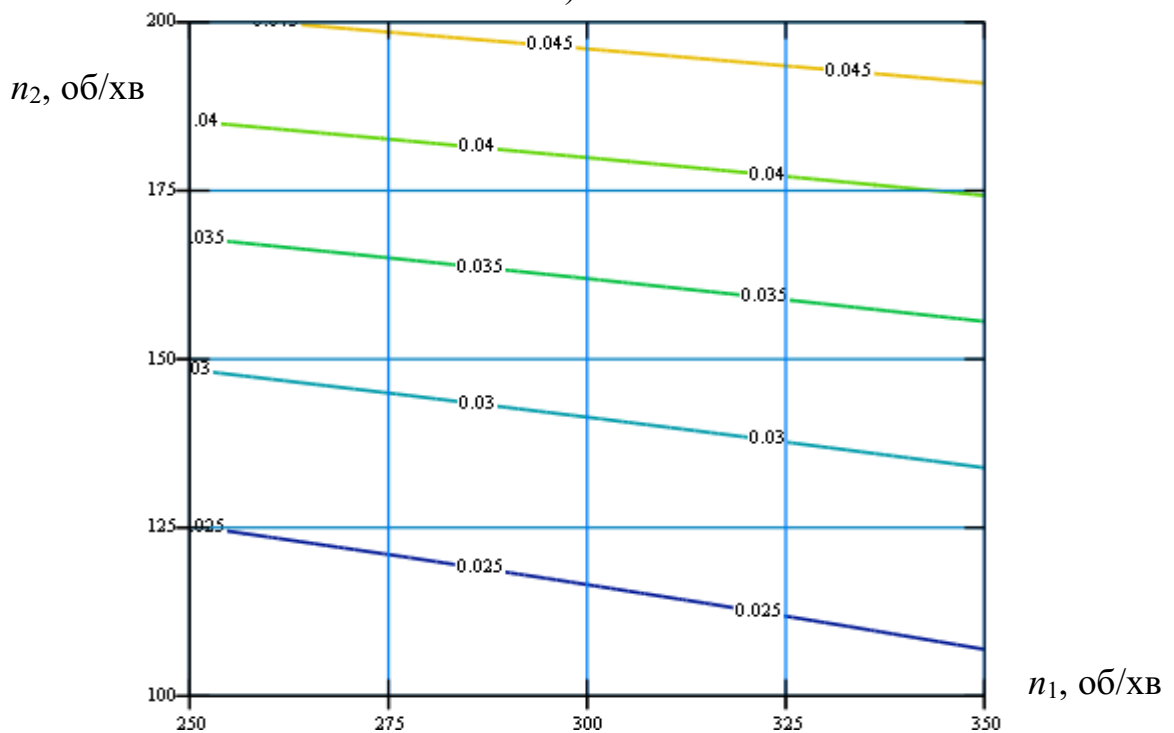


Рис. В.2. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)



а)



б)

Рис. В.3. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)

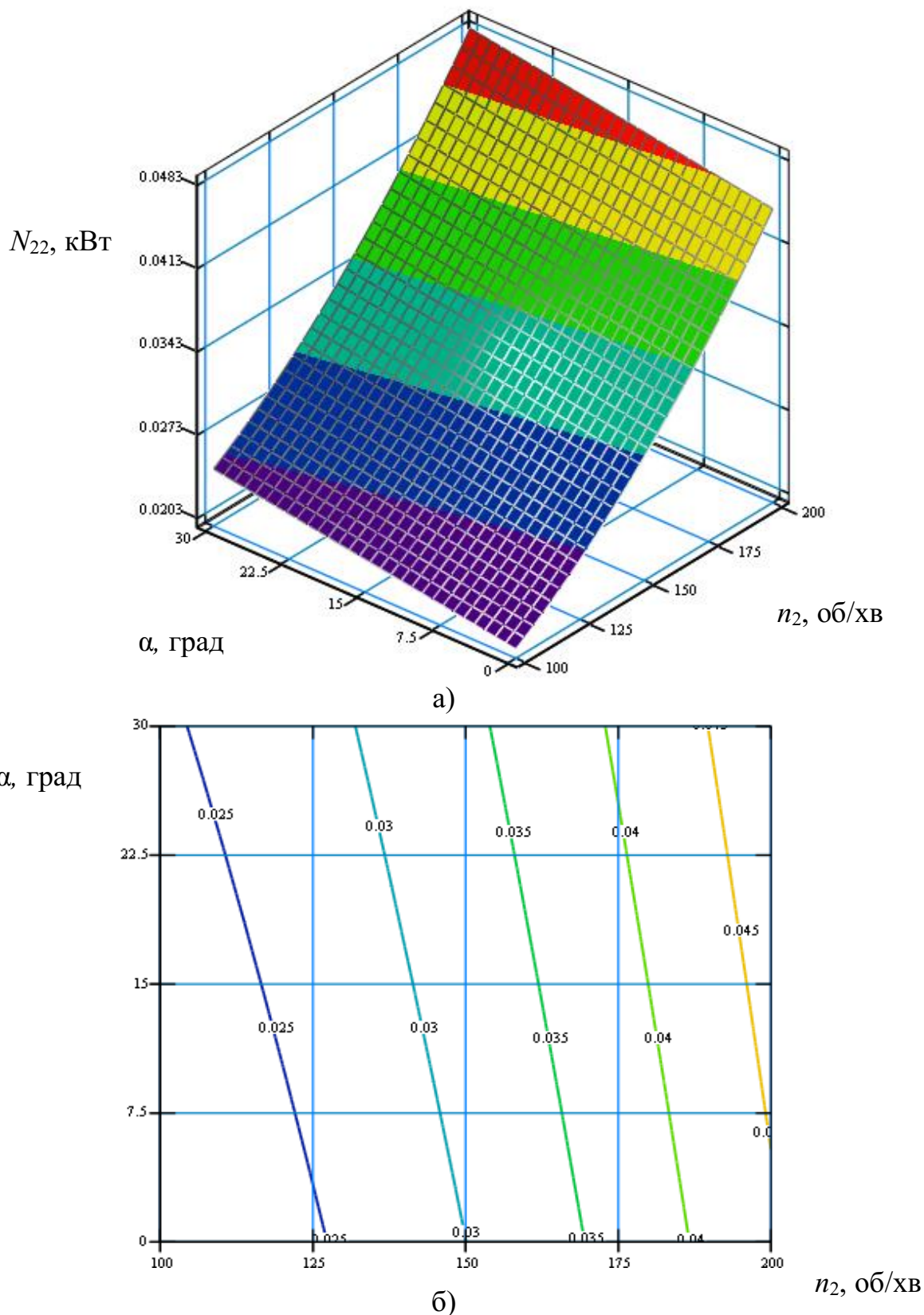
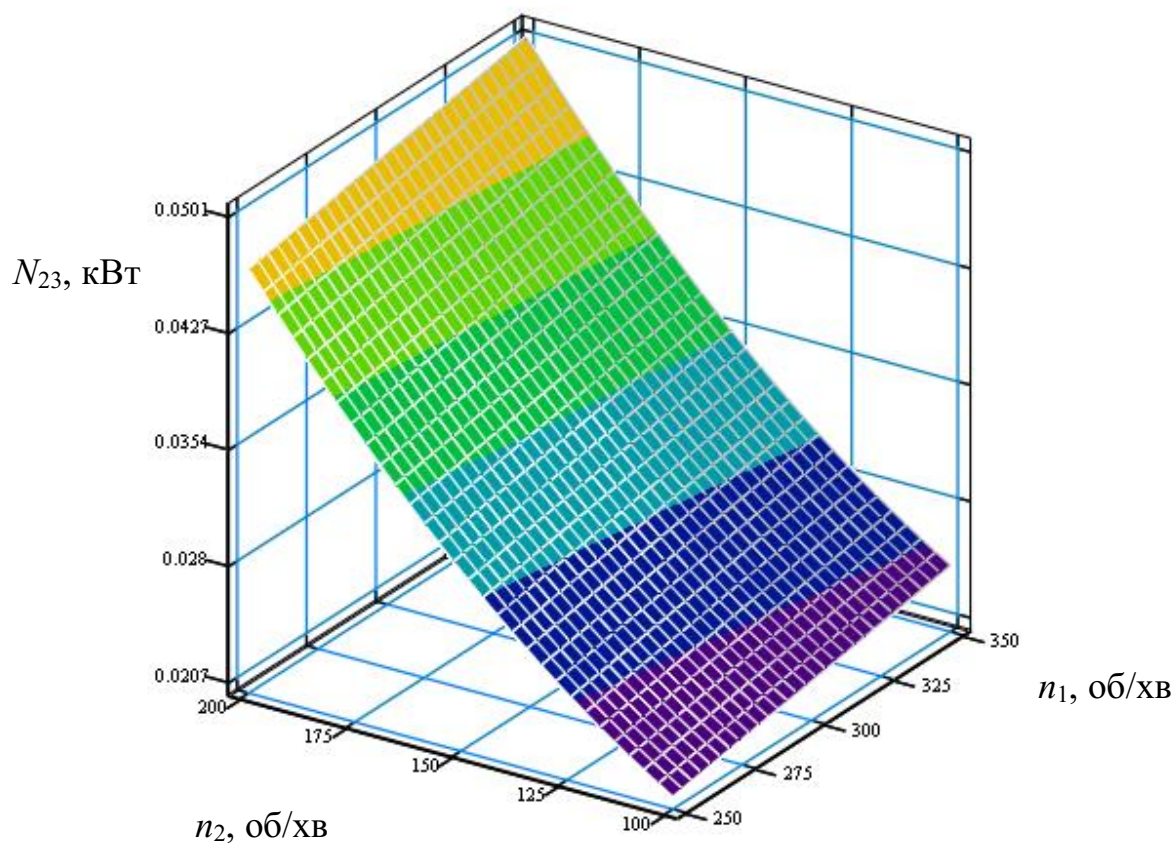
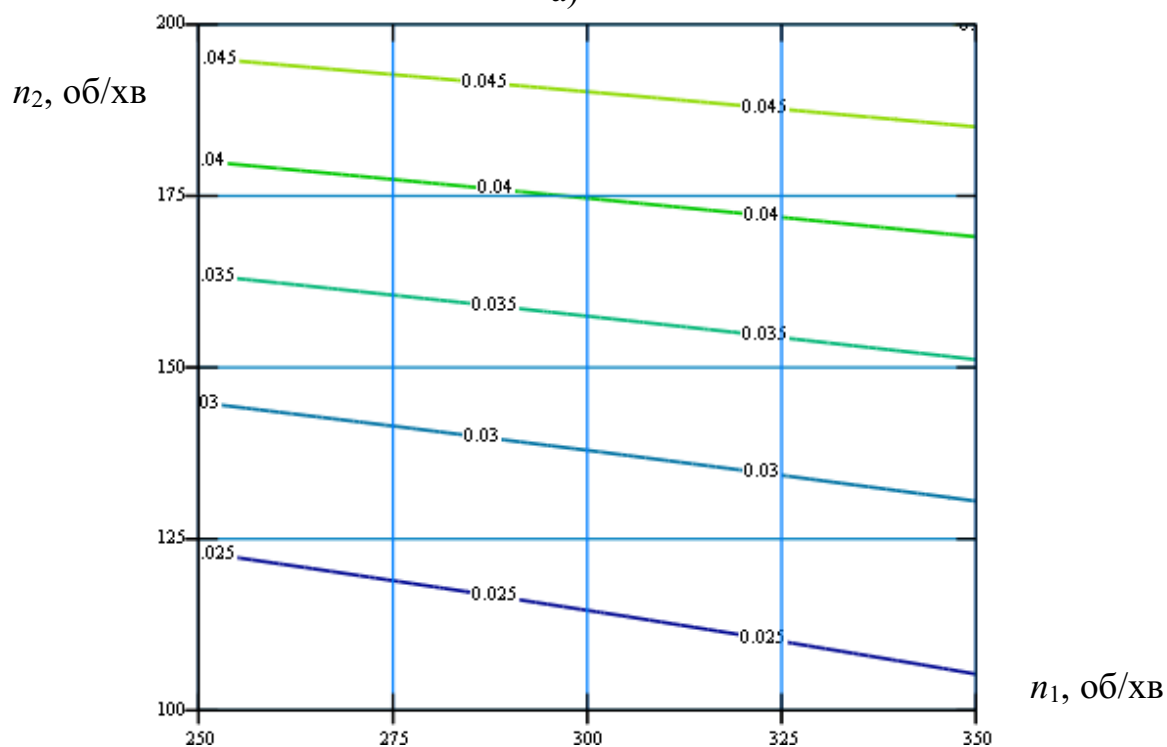


Рис. В.4. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)

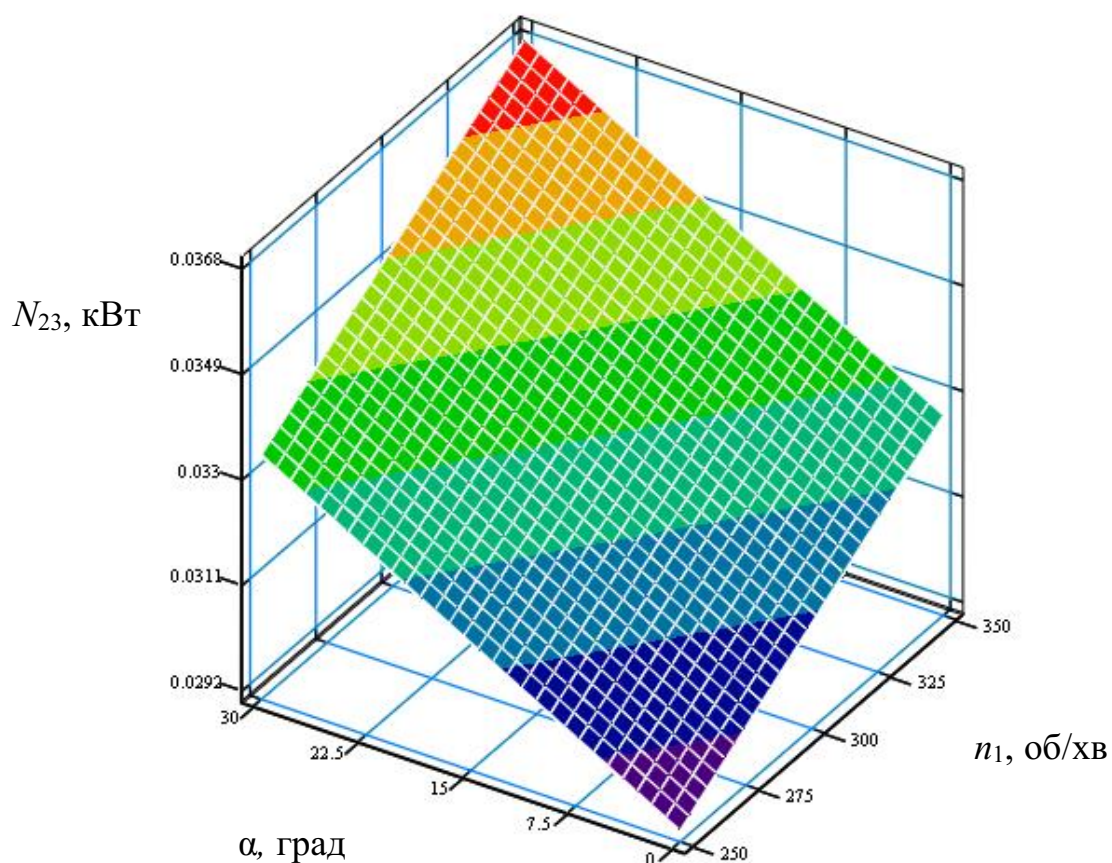


а)

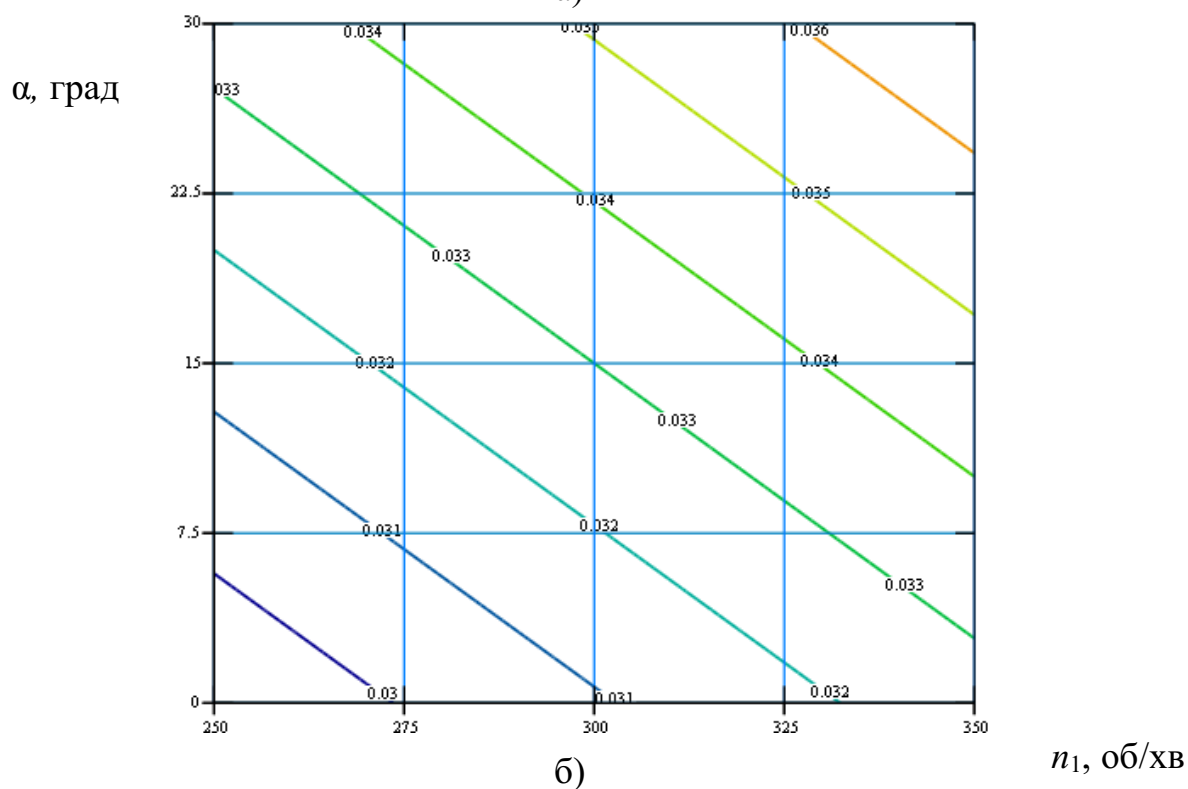


б)

Рис. В.5. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)



а)



б)

Рис. В.6. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності потужності приводу обертання кожуха при транспортуванні та змішуванні двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_2 = 150$ об/хв.)

Додаток Г

Результати експериментальних досліджень продуктивності транспортування та змішування зернових матеріалів шнековим змішувачем

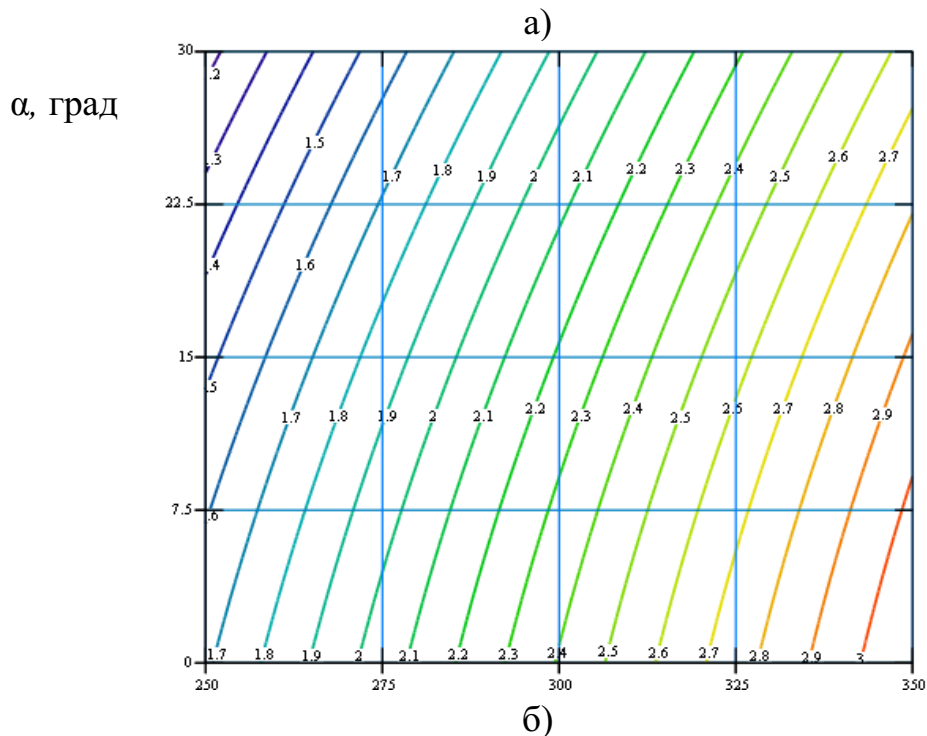
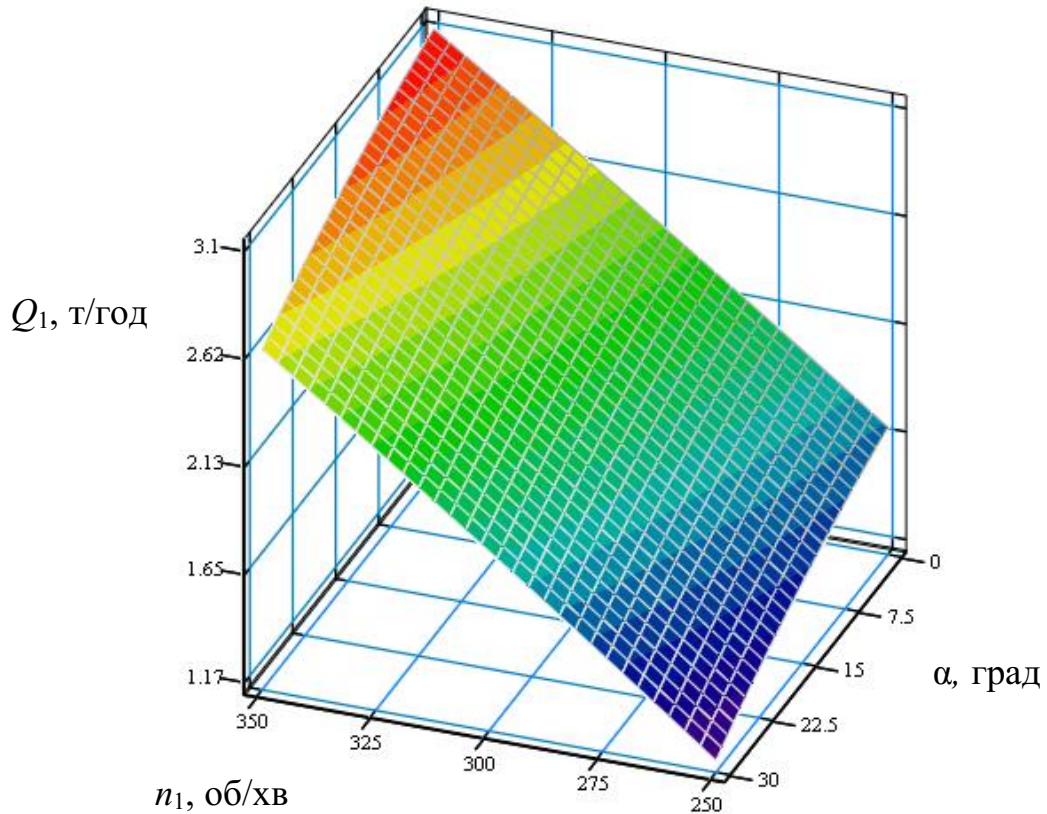


Рис. Г.1. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_2 = 150$ об/хв.)

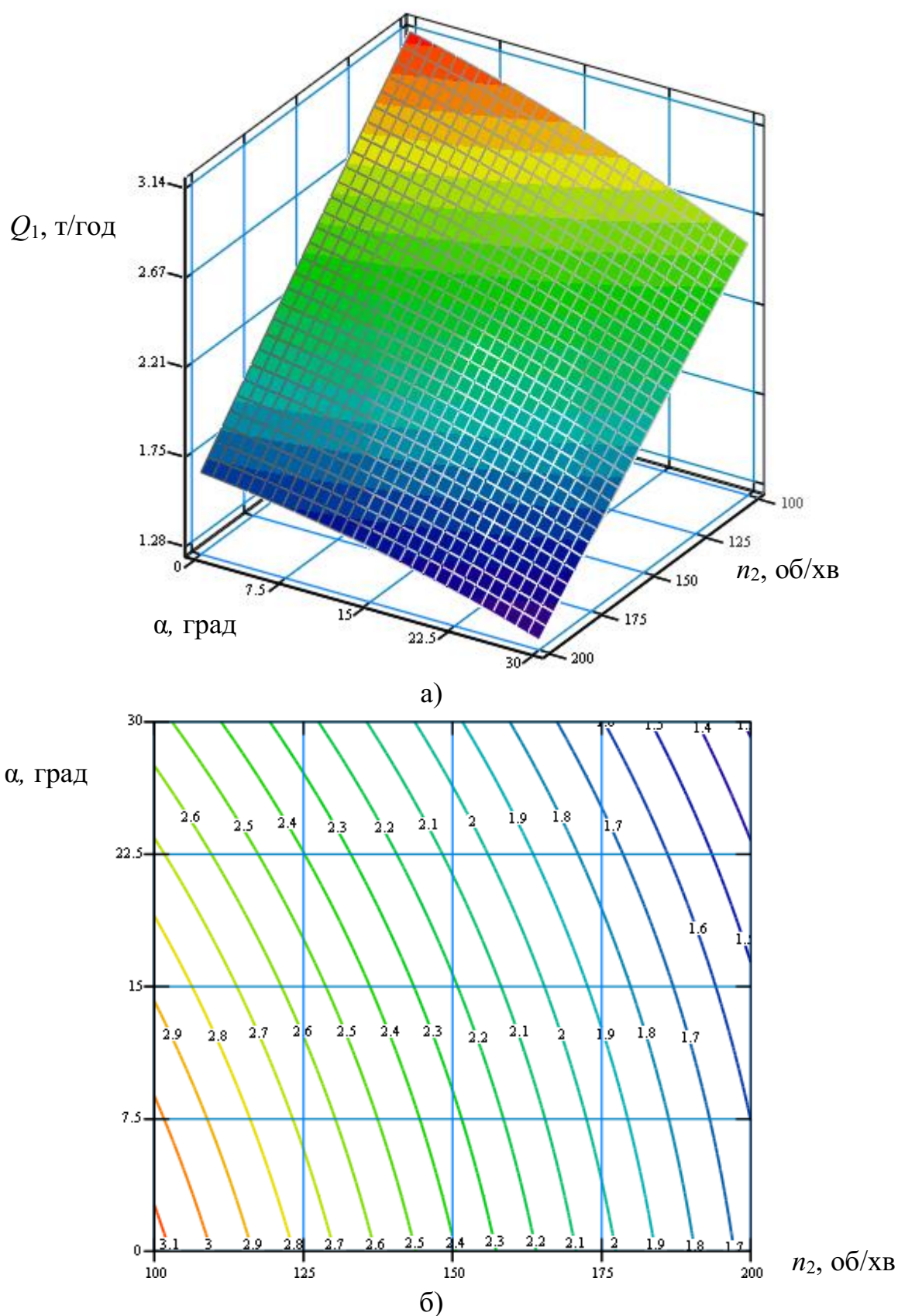


Рис. Г.2. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування трьохкомпонентної суміші зерен кукурудзи, гречки та проса шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)

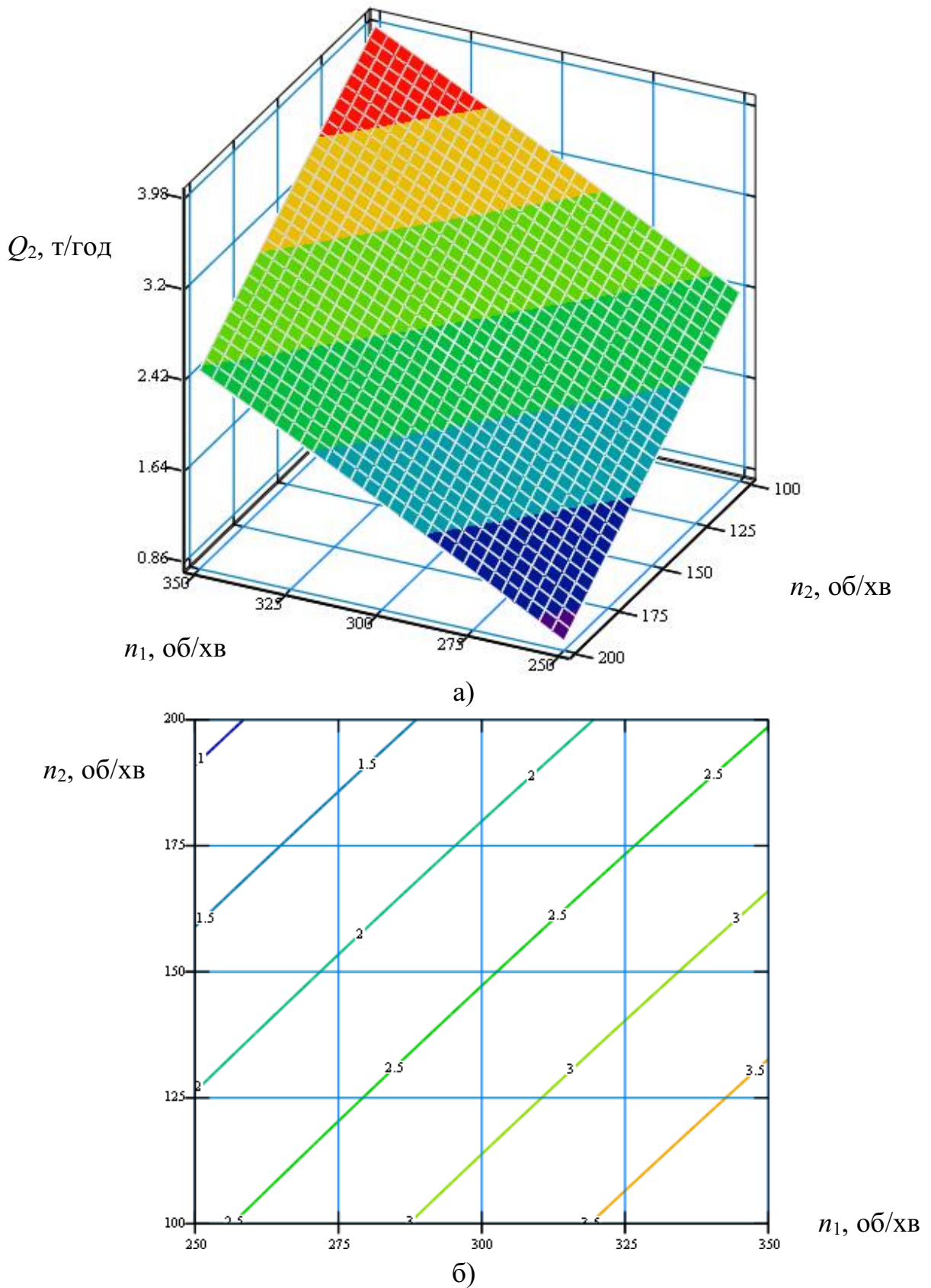
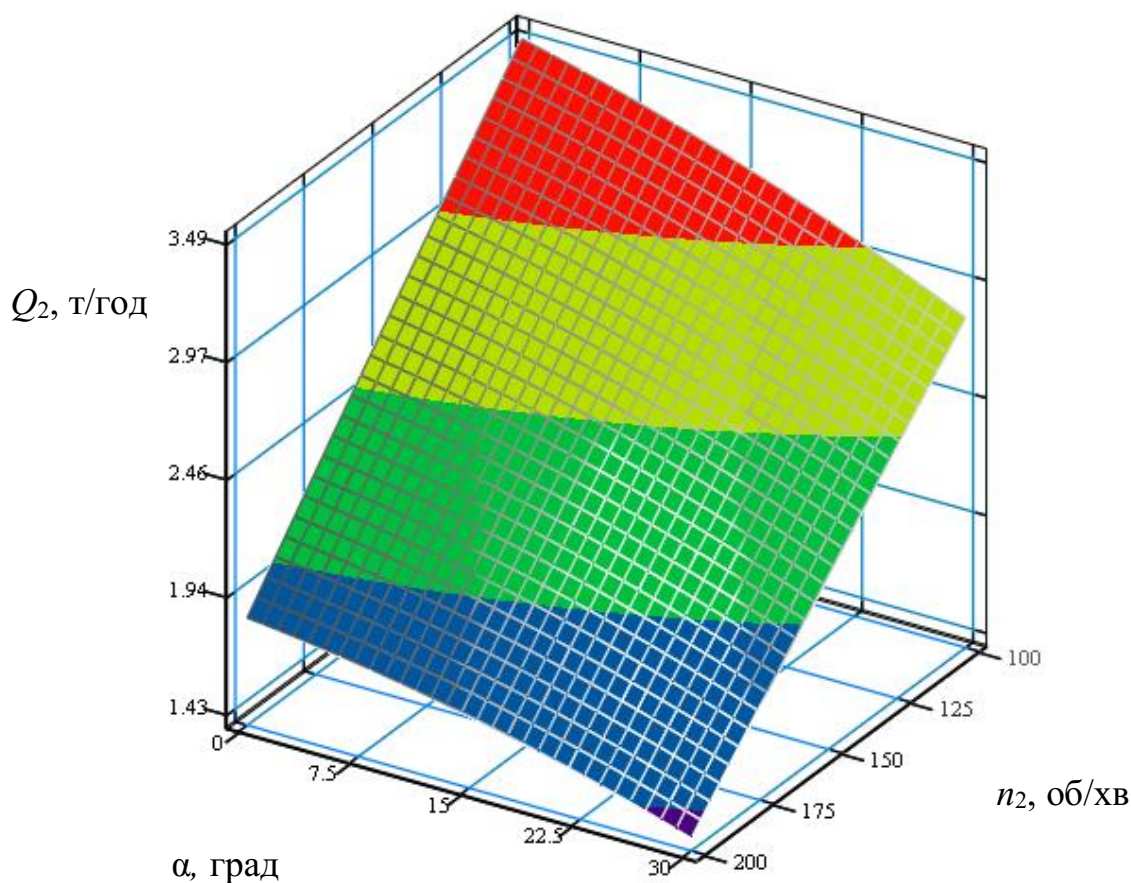
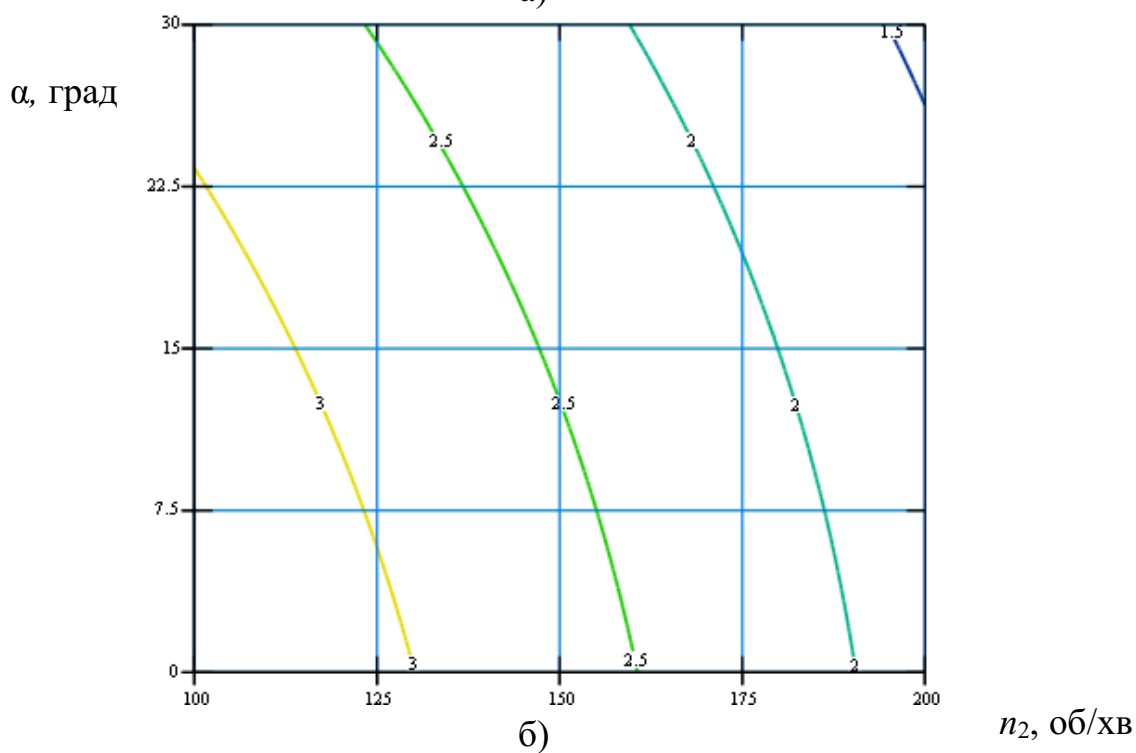


Рис. Г.3. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)

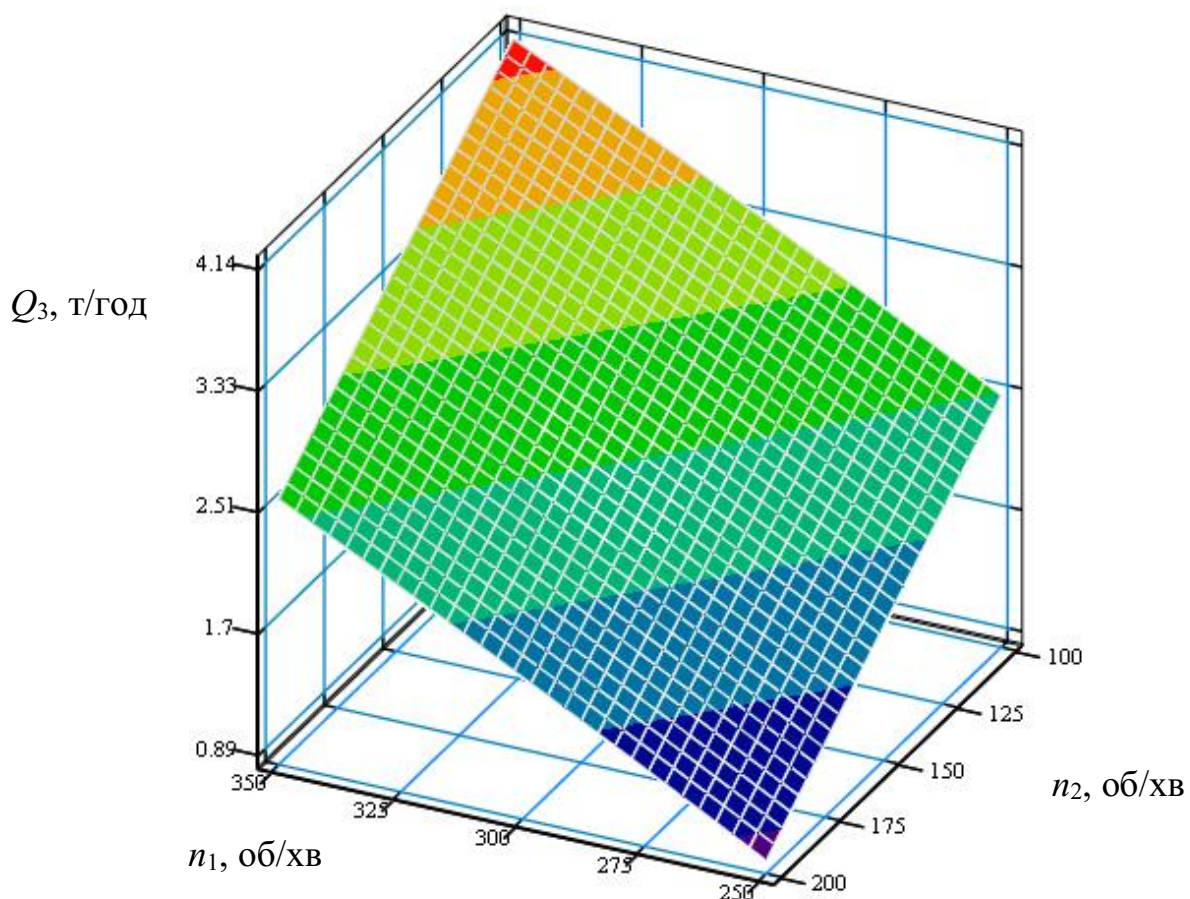


а)

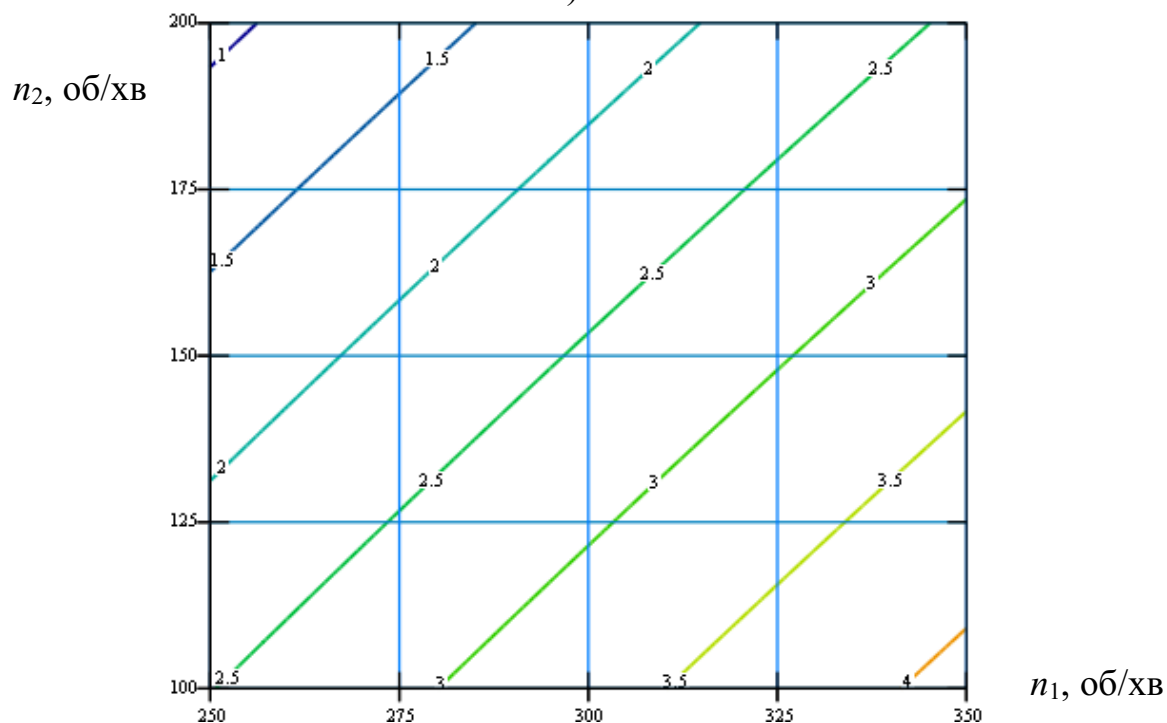


б)

Рис. Г.4. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування двохкомпонентної суміші зерен кукурудзи та гречки шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання кожуха n_2 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_1=300$ об/хв.)

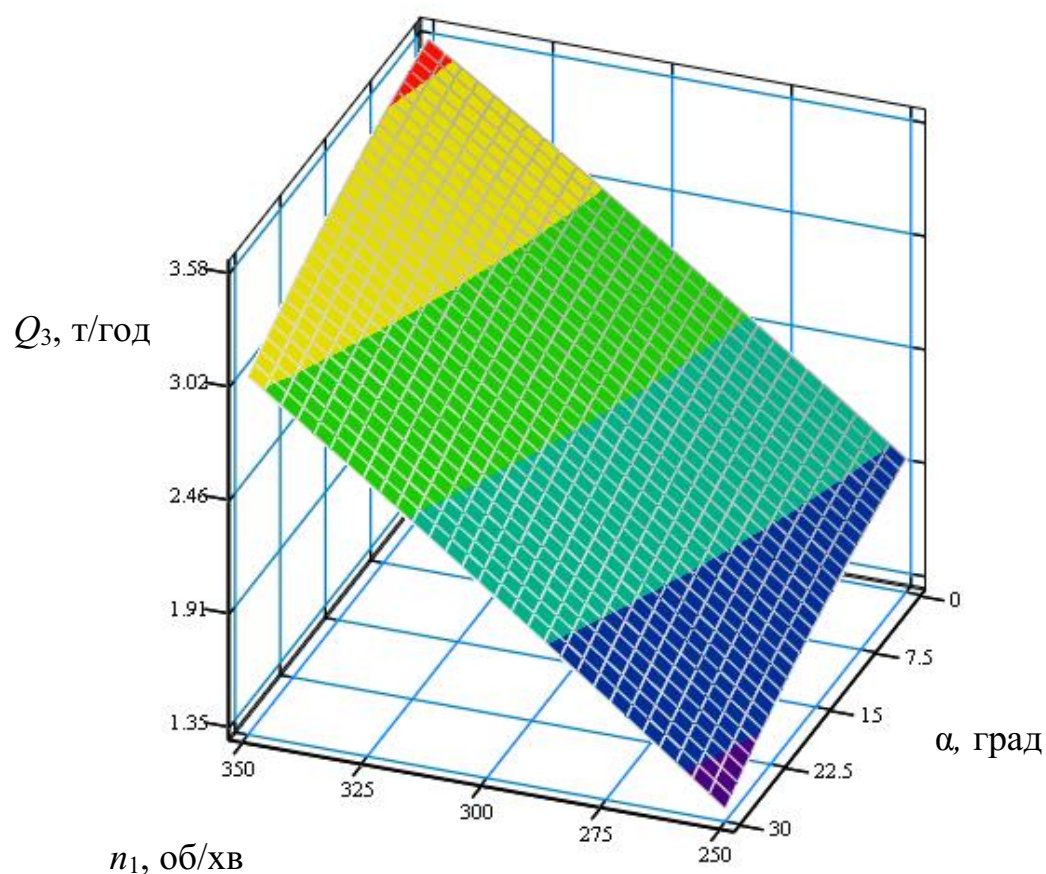


а)

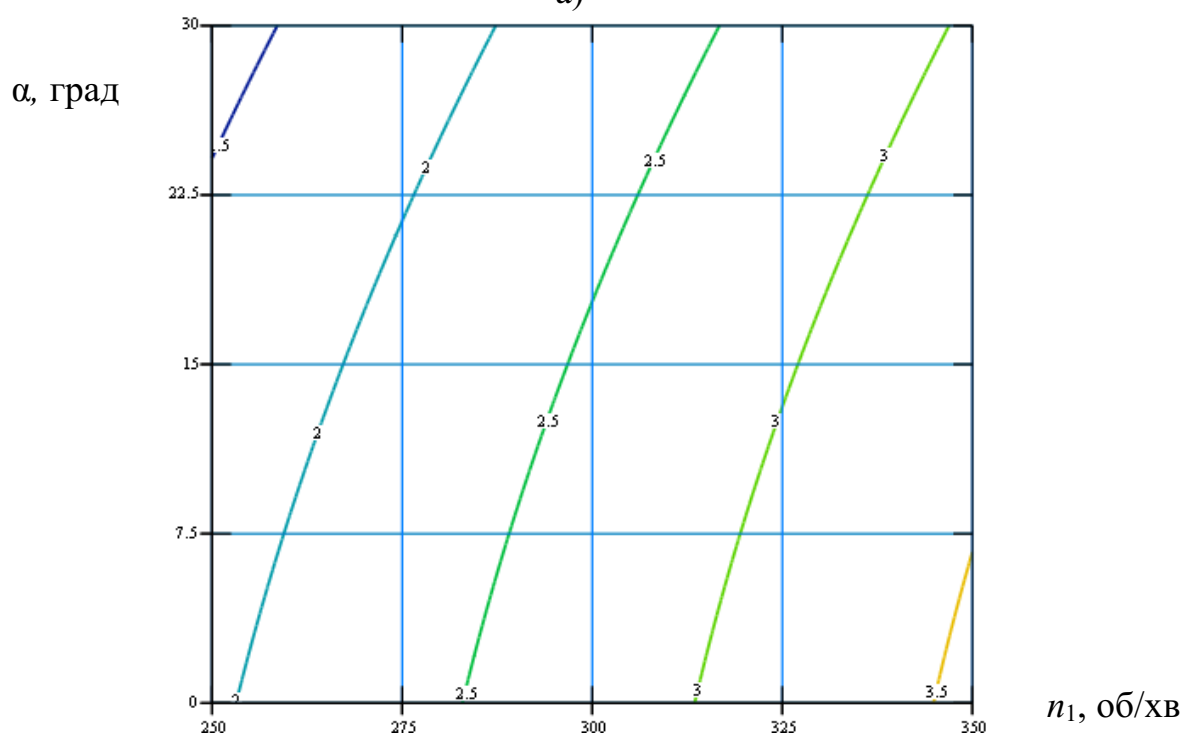


б)

Рис. Г.5. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обортовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та частоти обертання кожуха n_2 ($\alpha = 15$ град.)



а)



б)

Рис. Г.6. Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку (б) залежності продуктивності транспортування та змішування двохкомпонентної суміші зерен пшениці та гороху шнековим змішувачем з обертовим кожухом від частоти обертання шнека n_1 та кута нахилу α шнекового змішувача ($n_2 = 150$ об/хв.)

Додаток Д



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **153774** (13) **U**
 (51) МПК
B65G 33/16 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2023 01002**
 (22) Дата подання заявки: **13.03.2023**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **24.08.2023**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **23.08.2023, Бюл.№ 34**

(72) Винахідник(и):
Гевко Іван Богданович (UA),
Лещук Роман Ярославович (UA),
Окіпний Ігор Богданович (UA),
Довбуш Тарас Анатолійович (UA),
Довбуш Анатолій Дмитрович (UA),
Гурик Олег Ярославович (UA),
Радик Дмитро Леонідович (UA),
Мариненко Сергій Юрійович (UA),
Коваль Сергій Олександрович (UA),
Стібайло Олег Юрійович (UA)

(73) Володілець (володільці):
Гевко Іван Богданович,
 вул. Крушельницької, 6, с. Гаї-Гречинські,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 46016 (UA),
Лещук Роман Ярославович,
 вул. Лесі Українки, 7, кв. 14, м. Тернопіль,
 46000 (UA),
Окіпний Ігор Богданович,
 вул. Руська, 54, кв. 16, м. Тернопіль, 46000
 (UA),
Довбуш Тарас Анатолійович,
 вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль,
 46003 (UA),
Довбуш Анатолій Дмитрович,
 вул. Броварна, 25, кв. 30, м. Тернопіль,
 46003 (UA),
Гурик Олег Ярославович,
 вул. 15 Квітня, 5, кв. 84, м. Тернопіль, 46000
 (UA),
Радик Дмитро Леонідович,
 вул. Симоненка, 5, кв. 208, м. Тернопіль,
 46016 (UA),
Мариненко Сергій Юрійович,
 вул. Шептицького, 111, с. Петриків,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 47720 (UA),
Коваль Сергій Олександрович,
 вул. Шевченка, 3, кв. 12, смт Гусятин,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 48201 (UA),
Стібайло Олег Юрійович,
 вул. Лесі Українки, 3, кв. 8, м. Львів, 49008
 (UA)

UA 153774 U

(54) ГВИНТОВИЙ РОБОЧИЙ ОРГАН ЗМІШУВАЧА

(57) Реферат:

Гвинтовий робочий орган змішувача, який виконано у вигляді вала з гвинтом. Гвинт виконано збірним з двох лопатевих спіралей однакового зовнішнього діаметра та кроку, з яких базову лопатеву спіраль жорстко закріплено на валу, а іншу виконано Г-подібної форми із внутрішньою суцільною циліндричною частиною та зовнішньою спіральною лопатевою частиною, крім того, спіраль Г-подібної форми внутрішньою поверхнею контактує з валом, а торцевою - з базовою лопатевою спіраллю, крім того, спіраль Г-подібної форми на кінцях зафіксовано на валу відомим способом з можливістю повертання відносно вала.



УКРАЇНА

(19) UA (11) 154380 (13) U

(51) МПК

B65G 33/08 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2023 02288**
 (22) Дата подання заявки: **15.05.2023**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **09.11.2023**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **08.11.2023, Бюл.№ 45**

(72) Винахідник(и):
**Гевко Іван Богданович (UA),
 Коваль Сергій Олександрович (UA),
 Дячун Андрій Євгенович (UA),
 Гевко Богдан Романович (UA),
 Довбуш Тарас Анатолійович (UA),
 Довбуш Анатолій Дмитрович (UA),
 Ткаченко Ігор Григорович (UA),
 Радик Дмитро Леонідович (UA),
 Стібайло Олег Юрійович (UA),
 Брикса Андрій Олегович (UA)**

(73) Володілець (володільці):
**Гевко Іван Богданович,
 вул. Крушельницької, 8, с. Гаї-Гречинські,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 46016 (UA),
 Коваль Сергій Олександрович,
 вул. Шевченка, 3, кв. 12, смт Гусятин,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 48201 (UA),
 Дячун Андрій Євгенович,
 вул. Сонячна, 3, с. Нижчі Луб'янки,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 47361 (UA),
 Гевко Богдан Романович,
 вул. Сірка, 10, м. Тернопіль, Тернопільська
 обл., 46020 (UA),
 Довбуш Тарас Анатолійович,
 вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль,
 46003 (UA),
 Довбуш Анатолій Дмитрович,
 вул. Броварна, 25, кв. 30, м. Тернопіль,
 46003 (UA),
 Ткаченко Ігор Григорович,
 бул. Дмитра Вишневецького, 2, кв. 47, м.
 Тернопіль, Тернопільська обл., 46016 (UA),
 Радик Дмитро Леонідович,
 вул. Симонянка, 5, кв. 208, м. Тернопіль,
 46016 (UA),
 Стібайло Олег Юрійович,
 вул. Лесі Українки, 3, кв. 8, м. Львів, 49008
 (UA),
 Брикса Андрій Олегович,
 вул. Митрополита Шептицького, 15, кв. 10,
 м. Тернопіль, 46008 (UA)**

UA 154380 U

(54) ГВИНТОВИЙ КОНВЕЄР-ЗМІШУВАЧ З ОБЕРТОВИМ КОЖУХОМ

(57) Реферат:

Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом виконано у вигляді у вигляді вала з гвинтом, що знаходиться в циліндричному кожусі з можливістю кругового повертання, верхню частину якого жорстко з'єднано з двигуном, який закріплено на нерухомій верхній частині циліндричного кожуха, де розташовується вивантажувальний патрубок, рухомої нижньої частини циліндричного кожуха та регулювальної опори, закріпленої до нерухомої верхньої частини кожуха. Гвинт виконано у вигляді спіралеподібних елементів, які закріплено по гвинтовій лінії відомим способом на валу з певною відстанню один від одного, яка забезпечує просипання матеріалів при їх змішуванні. Нижній кінець вала з гвинтом та рухому нижню частину циліндричного кожуха встановлено з можливістю колового обертання у завантажувальному бункері. До завантажувального бункера закріплено механізм пригальмовування рухомої нижньої частини циліндричного кожуха, який складається з кронштейна, у якому розташовано гвинт з лівою та правою частинами різі, на яких встановлено ліву та праву щочки з гальмівними накладками. На кінці однієї частини гвинта закріплено важіль обертання.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157149** (13) **U**
 (51) МПК
B65G 33/16 (2006.01)
B65G 33/26 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2024 00165</p> <p>(22) Дата подання заявки: 11.01.2024</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 12.09.2024</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 11.09.2024, Бюл.№ 37</p>	<p>(72) Винахідник(и): Гевко Іван Богданович (UA), Довбуш Тарас Анатолійович (UA), Гевко Богдан Романович (UA), Довбуш Анатолій Дмитрович (UA), Хорошун Роман Васильович (UA), Брикса Андрій Олегович (UA), Коваль Сергій Олександрович (UA), Стібайло Олег Юрійович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(54) ШНЕК ІЗ ЗМІННИМ ЕЛАСТИЧНИМ ЕЛЕМЕНТОМ**(57) Реферат:**

Шнек із змінним еластичним елементом, виконано у вигляді пустотілого вала, в якому по гвинтовій лінії закріплено еластичні елементи. Еластичний елемент у нижній частині виконують суцільним із приєднаною до його торцевої частини по усій її довжині "липучкою", яку прикріплюють до іншої "липучки". Яку приєднують до верхньої торцевої частини гвинтової спіралі, яку жорстко закріплюють до пустотілого вала.

UA 157149 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157049** (13) **U**
 (51) МПК
B65G 33/26 (2006.01)
B65G 33/16 (2006.01)

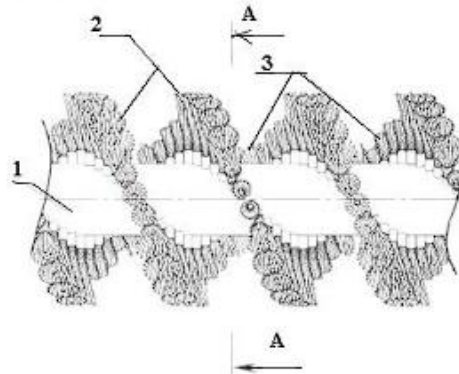
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 00169	(72) Винахідник(и): Гевко Іван Богданович (UA), Довбуш Тарас Анатолійович (UA), Гевко Богдан Романович (UA), Никеруй Юрій Степанович (UA), Хорошун Роман Васильович (UA), Брикса Андрій Олегович (UA), Коваль Сергій Олександрович (UA), Стібайло Олег Юрійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 11.01.2024	(73) Володілець (володільці): ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 05.09.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 04.09.2024, Бюл.№ 36	

(54) ШНЕК ДЛЯ ЗМІШУВАННЯ З ЕЛАСТИЧНОЮ ЩІТКОПОДІБНОЮ ПОВЕРХНЕЮ**(57) Реферат:**

Шнек для змішування з еластичною щіткоподібною поверхнею виконано у вигляді пустотілого вала, в якому по гвинтовій лінії закріплені еластичні елементи. Еластичні елементи періодично закріплені меншої та більшої висоти відносно пустотілого вала.



Фіг. 1

UA 157049 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157208** (13) **U**
 (51) МПК
B21H 3/12 (2006.01)
B21D 11/06 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2024 00167</p> <p>(22) Дата подання заявки: 11.01.2024</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 19.09.2024</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 18.09.2024, Бюл.№ 38</p>	<p>(72) Винахідник(и): Гевко Іван Богданович (UA), Пік Андрій Іванович (UA), Комар Роман Васильович (UA), Гевко Богдан Романович (UA), Брикса Андрій Олегович (UA), Коваль Сергій Олександрович (UA), Стібайло Олег Юрійович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ ЗАГОТОВОК

(57) Реферат:

Спосіб виготовлення гвинтових заготовок здійснюють шляхом нанесення U-подібних вминань і навивання. Спочатку на оправі з U-подібним спіральним виступом закріплюють стрічку прямокутного перерізу гвинтами, а оправу з U-подібним спіральним виступом закріплюють в привідній опорі та центрі. Здійснюють на стрічці прямокутного перерізу навивання U-подібного спірального виступу по усій її довжині шляхом вминання за допомогою формувального ролика з U-подібною западиною, яка геометрично відповідає U-подібному спіральному виступу оправі, що під відповідним кутом, який відповідає кроку U-подібного спірального виступу оправі, розташовано на осі з можливістю колового обертання та осьового зміщення. Довжину стрічки прямокутного перерізу визначають довжиною оправі з U-подібним спіральним виступом.

UA 157208 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157048** (13) **U**
 (51) МПК
B21H 3/12 (2006.01)
B21D 11/06 (2006.01)
B29C 59/14 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2024 00164</p> <p>(22) Дата подання заявки: 11.01.2024</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 05.09.2024</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 04.09.2024, Бюл.№ 36</p>	<p>(72) Винахідник(и): Гевко Іван Богданович (UA), Пік Андрій Іванович (UA), Комар Роман Васильович (UA), Гевко Богдан Романович (UA), Брикса Андрій Олегович (UA), Коваль Сергій Олександрович (UA), Стібайло Олег Юрійович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ ЗАГОТОВОК**(57) Реферат:**

Спосіб виготовлення гвинтових заготовок здійснюють шляхом нанесення U-подібних вмінань і навивання. Спочатку на оправі з U-подібним спіральним виступом закріплюють трубну заготовку гвинтами, а оправу з U-подібним спіральним виступом - в привідній опорі та центрі, і здійснюють на трубній заготовці навивання U-подібного спірального виступу по усій її довжині шляхом вмінання за допомогою формувального ролика з U-подібною западиною, яка геометрично відповідає U-подібному спіральному виступу оправі, що під відповідним кутом, який відповідає кроку U-подібного спірального виступу оправі, розташовано на осі з можливістю колового обертання та осевого зміщення. Крім цього, довжина трубної заготовки визначається довжиною оправі з U-подібним спіральним виступом.

UA 157048 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157050** (13) **U**
(51) МПК**B65G 33/26** (2006.01)
B65G 33/16 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2024 00170</p> <p>(22) Дата подання заявки: 11.01.2024</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 05.09.2024</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 04.09.2024, Бюл.№ 36</p>	<p>(72) Винахідник(и): Гевко Іван Богданович (UA), Довбуш Тарас Анатолійович (UA), Гевко Богдан Романович (UA), Зяйлик Марія Федорівна (UA), Хорошун Роман Васильович (UA), Брикса Андрій Олегович (UA), Коваль Сергій Олександрович (UA), Стібайло Олег Юрійович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001 (UA)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(54) ШНЕК З МЕХАНІЧНИМ КРІПЛЕННЯМ СПІРАЛЕЙ**(57) Реферат:**

Шнек з механічним кріпленням спіралей виконаний у вигляді пустотілого вала, де по гвинтовій лінії закріплено елементи. Елементи виконано у вигляді спарених планок меншої висоти спіралі, які розташовано між собою на відстані товщини спіралі і закріплено на зовнішній поверхні пустотілого вала. Між спареними планками по гвинтовій лінії встановлено спіраль, яку з обох сторін обмежено стопорними кільцями, що встановлені у виточках пустотілого вала.

UA 157050 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **153687** (13) **U**
 (51) МПК
B65G 33/16 (2006.01)
B65G 33/26 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2023 01003**
 (22) Дата подання заявки: **13.03.2023**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **10.08.2023**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **09.08.2023, Бюл.№ 32**

(72) Винахідник(и):
Гевко Іван Богданович (UA),
Лещук Роман Ярославович (UA),
Гурик Олег Ярославович (UA),
Довбуш Тарас Анатолійович (UA),
Довбуш Анатолій Дмитрович (UA),
Мариненко Сергій Юрійович (UA),
Сенчишин Віктор Степанович (UA),
Коваль Сергій Олександрович (UA),
Стібайло Олег Юрійович (UA),
Головко Володимир Васильович (UA)

(73) Володілець (володілці):
Гевко Іван Богданович,
 вул. Крушельницької, 6, с. Гаї-Гречинські,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 46016 (UA),
Лещук Роман Ярославович,
 вул. Лесі Українки, 7, кв. 14, м. Тернопіль,
 46000 (UA),
Гурик Олег Ярославович,
 вул. 15 Квітня, 5, кв. 84, м. Тернопіль, 46000
 (UA),
Довбуш Тарас Анатолійович,
 вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль,
 46003 (UA),
Довбуш Анатолій Дмитрович,
 вул. Броварна, 25, кв. 30, м. Тернопіль,
 46003 (UA),
Мариненко Сергій Юрійович,
 вул. Шептицького, 111, с. Петриків,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 47720 (UA),
Сенчишин Віктор Степанович,
 вул. Морозенка, 62, с. Колодне,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 47335 (UA),
Коваль Сергій Олександрович,
 вул. Шевченка, 3, кв. 12, смт Гусятин,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 48201 (UA),
Стібайло Олег Юрійович,
 вул. Лесі Українки, 3, кв. 8, м. Львів, 49008
 (UA),
Головко Володимир Васильович,
 вул. Пушкіна, 5, кв. 1, м. Тернопіль, 46024
 (UA)

UA 153687 U

(54) ШНЕК ДЛЯ ЗМІШУВАННЯ З МЕХАНІЧНИМ КРІПЛЕННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ

(57) Реферат:

Шнек для змішування виконаний у вигляді пустотілого вала, в якому по гвинтовій лінії закріплено елементи. При цьому елементи закріплено відомим способом в кріпильних отворах спіралі незначної висоти, яку жорстко закріплено на пустотілому валу, а між елементами утворені отвори для просипання та змішування матеріалів.



УКРАЇНА

(19) UA (11) 154996 (13) U
 (51) МПК
 B65G 33/08 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2023 02289**
 (22) Дата подання заявки: **15.05.2023**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **11.01.2024**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **10.01.2024, Бюл.№ 2**

(72) Винахідник(и):
Гевко Іван Богданович (UA),
Коваль Сергій Олександрович (UA),
Дячун Андрій Євгенович (UA),
Гевко Богдан Романович (UA),
Стібайло Олег Юрійович (UA),
Довбуш Тарас Анатолійович (UA),
Довбуш Анатолій Дмитрович (UA),
Дмитрів Олена Романівна (UA),
Сокіл Марія Богданівна (UA),
Брикса Андрій Олегович (UA)

(73) Володівець (володільці):
Гевко Іван Богданович,
 вул. Крушельницької, 6, с. Гаї-Гречинські,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 46016 (UA),
Коваль Сергій Олександрович,
 вул. Шевченка, 3, кв. 12, смт Гусятин,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 48201 (UA),
Дячун Андрій Євгенович,
 вул. Сонячна, 3, с. Нижчі Луб'янки,
 Тернопільський р-н, Тернопільська обл.,
 47361 (UA),
Гевко Богдан Романович,
 вул. Сірка, 10, м. Тернопіль, Тернопільська
 обл., 46020 (UA),
Стібайло Олег Юрійович,
 вул. Лесі Українки, 3, кв. 8, м. Львів, 49008
 (UA),
Довбуш Тарас Анатолійович,
 вул. Березова, 14-а, кв. 25, м. Тернопіль,
 46003 (UA),
Довбуш Анатолій Дмитрович,
 вул. Броварна, 25, кв. 30, м. Тернопіль,
 46003 (UA),
Дмитрів Олена Романівна,
 вул. Бережанська, 53, кв. 54, м. Тернопіль,
 46027 (UA),
Сокіл Марія Богданівна,
 вул. Війтовича, 16, кв. 19, м. Львів, 79016
 (UA),
Брикса Андрій Олегович,
 вул. Митрополита Шептицького, 15, кв. 10,
 м. Тернопіль, 46008 (UA)

UA 154996 U

(54) СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГВИНТОВОГО КОНВЕСРА-ЗМІШУВАЧА З ОБЕРТОВИМ КОЖУХОМ**(57) Реферат:**

Стенд для дослідження характеристик гвинтового конвесра-змішувача з обертовим кожухом виконано у вигляді вала з гвинтом, що розміщений в циліндричному кожусі з можливістю кругового повертання, верхню частину якого жорстко з'єднано з двигуном, який закріплено на нерухомій верхній частині циліндричного кожуха, де розташовано вивантажувальний патрубок і додатковий двигун, який приводить в обертання рухому нижню частину циліндричного кожуха, та регульовальної опори, закріпленої до нерухомої верхньої частини циліндричного кожуха. Вал з гвинтом та рухому частину циліндричного кожуха виконано секційними, де верхня секція рухомої частини циліндричного кожуха знаходиться у взаємодії з можливістю відносного осьового зміщення з нижньою секцією рухомої частини циліндричного кожуха, а нижня секція вала з гвинтом знаходиться у взаємодії з можливістю відносного осьового зміщення з верхньою секцією вала з гвинтом, верхню частину якого жорстко з'єднано з двигуном. Нижній кінець нижньої секції вала з гвинтом і нижній кінець нижньої секції рухомої частини циліндричного кожуха встановлено з можливістю колового обертання у завантажувальному бункері. Для фіксації досліджуваних характеристик стенд містить перший перетворювач частоти обертання двигуна і другий перетворювач частоти обертання додаткового двигуна, керування якими здійснюють з першого персонального комп'ютера та другого персонального комп'ютера.

Додаток Е
Акти впровадження

Приватне підприємство
« ХЛОПІВЕЦЬКЕ »

48260, м. Копичинці, вул. Мазепи 18, Тернопільської обл., тел. (035-57) 4-24-32, код ЄДРПОУ 34036731

від 14.11 2024р. № 81-237

АКТ
впровадження у виробництво гвинтових робочих органів змішувачів

У ПП «ХЛОПІВЕЦЬКЕ» при розробці змішувальних апаратів було використано конструкції гвинтових робочих органів, виготовлених на основі пат. України №153687 та №153774. Вони забезпечують високу однорідність сумішей в процесі виконання технологічного процесу змішування сільськогосподарських компонентів, а також характеризуються високою надійністю.

Економічний ефект від впровадження і використання даних винаходів на корисні моделі (пат. України №153687 та №153774) становив 38100 грн.

Директор ПП «Хлопівецьке»



Романовський О.Я.

АКТ впровадження

Об'єкт впровадження: Методика розрахунку гвинтового конвеєра змішувач з обертовим кожухом,

Ким запропоновано, виконавці, адреса: науково-педагогічні працівники Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя (вул. Руська, 56, м. Тернопіль): Гевко Ів.Б., Коваль С.О., Дячун А.Є., Довбуш Т.А., Стібайло О.Ю., Брикса А.О., Гевко Б.Р., Довбуш А.Д., Ткаченко І.Г., Радик Д.Л., Дмитрів О.Р., Бабій А.В., Хомик Н.І., Сташків М.Я., Олексюк В.П., Цьонь Г.Б.

Джерела інформації:

1. Коваль С.О. Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник». Кропивницький, 2023. Випуск №8(39) І. С. 85-94.

2. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Гевко Б.Р., Довбуш Т.А., Коваль С.О., Стібайло О.Ю., Брикса А.О. Стенд для дослідження характеристик гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами / Збірник тез ІХ Міжнародної наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в АПК». Луцьк, 2023. (7-8 червня 2023 р.) – с. 27-29.

3. Патенти на корисну модель України № 154380 і № 154547.

Ким впроваджено: ФГ "КРОК ВПЕРЕД 2019"

Термін виконання: 2024 р.

Висновок по впровадженню: За допомогою запропонованої методики спроектовано гвинтовий конвеєр змішувач з обертовим кожухом, який дозволяє отримати високу якість суміші при змішуванні кількох компонентів.

Засновник



Гаврилюк В.М.

ФЕРМЕРСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО "ДАРИ ДОЛИНИ"**АКТ****впровадження у виробництво гвинтових робочих органів змішувачів**

У фермерському господарстві "ДАРИ ДОЛИНИ" в 2024 році у змішувальних апаратах було використано конструкції гвинтових робочих органів, виготовлених на основі пат. України №153687 та №153774, що забезпечують високу однорідність сумішей в процесі виконання технологічного процесу змішування компонентів, а також характеризуються високою надійністю.

Економічний ефект від впровадження і використання даних винаходів на торисні моделі становив 15300 грн.

Керівник



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Лисак".

Леся ЛИСАК



АКТ впровадження

Об'єкт впровадження: Змішування сільськогосподарських матеріалів з допомогою гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом.

Ким запропоновано, виконавці, адреса: науковці Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя (вул. Руська, 56, м. Тернопіль): Гевко І.Б., Коваль С.О., Дячун А.Є., Довбуш Т.А. та інші

Джерело інформації: Патенти на корисну модель України № 154380 і № 154547.

Ким впроваджено: ТОВ «Сієфджи Трейдинг» Компанії «Контінентал Фармерз Груп».

Термін виконання: 2024 р.

Висновок по впровадженню: За допомогою запропонованої методики змішування спроектовано гвинтовий конвеєр змішувач з обертовим кожухом, який дозволяє отримати високу якість суміші при змішуванні сільськогосподарських матеріалів.

Уповноважений представник



В.Ставнічук

Додаток Є

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Публікації у фахових виданнях

1. Коваль С.О. Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький, 2023. Вип. №8(39), ч. I. С. 85-94.
2. Гевко І.Б., Лещук Р.Я., Брикса А.О., Стібайло О.Ю., Коваль С.О. Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький, 2023. Вип. 8(39), ч. II. С. 24-34. (Автором запропоновано спосіб виготовлення гвинтового лопатевого робочого органу змішувача та окремі конструктивні і технологічні особливості його проектування).
3. Nevko I., Pik A., Komar R., Stibaylo O., Koval' S. Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2024. Vol. 113, No 1. P. 5–15. (Автором запропоновано спосіб виготовлення U-подібного шнека та окремі конструктивні і технологічні особливості його проектування).
4. Дячун А.Є., Дмитрів О.Р., Гевко Б.Р., Коваль С.О., Цапик Р.П. Експериментальна установка гвинтового конвеєра з обертовим кожухом для змішування сипких матеріалів. *Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»*. Луцьк, 2024. Вип. 24. С. 38-44. (Автором запропоновані окремі конструктивні рішення при проектуванні експериментальної установки, зокрема використання двох частотних перетворювачів для регулювання різностороннього руху приводів установки).
5. Nevko I., Diachun A., Dmytriv O., Koval S., Leskiv P., Okhnivskyi R. Research of horizontal screw conveyors-mixers with rotating casing. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2024. Vol. 115. No 3. P. 130–141. (Автором виведені

окремі аналітичні залежності з визначення конструктивних, кінематичних і силових параметрів горизонтальних гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами).

6. Дячун А.Є., Гевко І.Б., Золотий Р.З., Коваль С.О., Дериш О.Б., Брикса А.О. Результати експериментальних досліджень якості змішування сипких матеріалів автоматизованою установкою гвинтового конвеєра з обертовим кожухом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* Кропивницький, 2024. Вип. №10(41), ч. I. С. 133-143. (Автором проведено експериментальні дослідження та виконано оброблення окремих статистичних даних експерименту).

7. Гевко І.Б., Гупка А.Б., Коваль С.О., Брикса А.О., Бучинський В.М. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* Кропивницький, 2025. Вип. 11(42). ч. 1. С. 129-138. (Автором запропоновано спосіб визначення очікуваного економічного ефекту та формулу вибору гвинтових змішувачів).

Тези конференцій та семінари

8. Гевко І.Б., Гудь В.З., Гурик О.Я., Коваль С.О. Шнековий змішувач з регульованими отворами просипання. *Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики* : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. присвячена 90-річчю Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, м. Тернопіль, 29–30 вересня 2022. Тернопіль, 2022. С. 48. (Автором запропоновано окремі конструктивні рішення при проектуванні нових конструкцій шнекових змішувачів).

9. Гевко І.Б., Коваль С.О., Стібайло О.Ю., Брикса А.О., Бучинський В.М. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом. *Матеріали V Міжнародної наук.-практ. конф. «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем»*, м. Кропивницький, 19-21 квітня 2023. Кропивницький, 2023. С. 124-

125. (Автором запропоновано окремі конструктивні рішення при проектуванні нових конструкцій шнекових змішувачів).

10. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Гевко Б.Р., Довбуш Т.А., Коваль С.О., Стібайло О.Ю., Брикса А.О. Стенд для дослідження характеристик гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами. *Збірник тез ІХ Міжнародної наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в АПК»*, м. Луцьк, 7-8 червня 2023. Луцьк, 2023. С. 27-29. (Автором запропоновані окремі конструктивні рішення при проектуванні експериментальної установки, зокрема використання двох частотних перетворювачів для регулювання різностороннього руху приводів установки).

11. Коваль С.О. Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Збірник тез XII Міжнародної наук.-практ. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, м. Тернопіль, 6-7 грудня 2023. Тернопіль, 2023. С. 51-52.

12. Коваль С.О., Стібало О.Ю. Особливості виготовлення лопатевих спіралей змішувачів. *Матеріали та програма XI Всеукраїнської наук.-техн. конф. «Сучасні технології у промисловому виробництві»*, м. Суми, 23-26 квітня 2024. Суми, 2024. С. 40-41. (Автором запропоновано окремі конструктивні і технологічні особливості виготовлення лопатевих спіралей змішувачів).

13. Гевко І., Дячун А., Дмитрів О., Коваль С. Моделювання роботи похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом. *Збірник тез доповідей XXV міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвяченій 124-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 95-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України*, м. Київ, 17–19 жовтня, 2024. Київ, 2024. С. 130-133. (Автором виведені окремі аналітичні залежності з визначення конструктивних, кінематичних і силових параметрів похилих гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами).

14. Гевко І., Коваль С., Брикса А. Результати експериментальних

досліджень якості змішування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром з обертовим кожухом. *Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, м. Тернопіль, 11-12 грудня 2024. Тернопіль, 2024. С. 137-138. (Автором проведено експериментальні дослідження та виконано оброблення окремих статистичних даних експерименту).

15. Гевко І., Коваль С. Моделювання процесу змішування похилими гвинтовими конвеєрами-змішувачами з обертовим кожухом. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвяченої 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, м. Тернопіль, 28-29 травня 2025. Тернопіль, 2025. С. 127. (Автором виведені окремі аналітичні залежності з моделювання процесу змішування похилими гвинтовими конвеєрами-змішувачами з обертовим кожухом).

Патенти України

16. Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів: пат. 153687 Україна: МПК 65G 33/16, 65G 33/26. № u202301003; заявл. 13.03.2023; опубл. 10.08.2023, Бюл. №32. 3 с. (Частка всіх авторів однакова).

17. Гвинтовий робочий орган змішувача: пат. 153774 Україна: МПК 65G 33/16. № u 202301002; заявл. 13.13.2023; опубл. 24.08.2023, Бюл. №34. 3 с. (Частка всіх авторів однакова).

18. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом: пат. 154380 Україна: МПК 65G 33/08 (2006.01). № u202302288; заявл. 15.05.2023; опубл. 09.11.2023, Бюл. №45. 4 с. (Частка всіх авторів однакова).

19. Стенд для дослідження характеристик гвинтового конвеєра-змішувача з обертовим кожухом: пат. 154996 Україна: МПК 65G 33/08 (2006.01). № u202302289; заявл. 15.05.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. №2. 5 с. (Частка всіх авторів однакова).

20. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок: пат. 157048 Україна: МПК В21Н 3/12, В21D 11/06. № u202400164; заявл. 11.01.2024; опубл. 05.09.2024, Бюл. №36. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

21. Шнек для змішування з еластичною щіткоподібною поверхнею: пат. 157049 Україна: МПК В65G 33/16. № u202400169; заявл. 11.01.2024; опубл. 05.09.2024, Бюл. №36. 3 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

22. Шнек із змінним еластичним елементом: пат. 157149 Україна: МПК В65G 33/16. № u202400165; заявл. 11.01.2024; опубл. 05.09.2024, Бюл. №36. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

23. Шнек з механічним кріпленням спіралей: пат. 157050 Україна: МПК В65G 33/26, В65G 33/16. № u2024 00170; заявл. 11.01.2024; опубл. 05.09.2024, Бюл. №36. 3 с. (*Частка всіх авторів однакова*).

24. Спосіб виготовлення гвинтових заготовок: пат. 157208 Україна: МПК В21Н 3/12, В21D 11/06. № u202400167; заявл. 11.01.2024; опубл. 19.09.2024, Бюл. №38. 4 с. (*Частка всіх авторів однакова*).